

# Algorithmen zur Steigerung der Qualitätsleistung und Verfügbarkeit automatisierter Montage- und Prüfsysteme

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTORINGENIEUR

(Dr.-Ing.)

Vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau

der

Technischen Universität Ilmenau

von

Dipl.-Wirtsch.-Ing.

Stephan Sommer

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß, TU Ilmenau
2. Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Wisweh, Univ. Magdeburg
3. Dr.-Ing. Ralf Gottmann, Schaeffler KG Herzogenaurach

Tag der Einreichung: 05.10.2005

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 22.06.2006

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2006000062

„Es war mir immer ein unerträglicher Gedanke,  
es könnte jemand bei der Prüfung eines meiner Erzeugnisse  
nachweisen, dass ich irgendwie Minderwertiges leiste. „

Robert Bosch (1861-1942)

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Leiter der Abteilung Qualitätssicherung im Zentralbereich Entwicklung Maschinensysteme der Schaeffler KG in Herzogenaurach.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß danke ich sehr herzlich für seine Anregung zu dieser Arbeit und für seine fachliche Unterstützung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Wisweh gilt mein Dank für die wertvollen Hinweise und für die Übernahme des Korreferats.

Dem Leiter des Zentralbereiches Entwicklung Maschinensysteme Herrn Dr.-Ing. Ralf Gottmann danke ich sehr herzlich für die rege fachliche Diskussion und für die Bereitschaft zur Übernahme des zweiten Korreferats.

Meine Verbundenheit gilt dem Unternehmen Schaeffler KG. Stellvertretend möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Rainer Woska, Geschäftsleiter des Bereiches Einkauf und Produktionsverfahren, bei Herrn Dipl.-Ing. Walter Süß, Leiter Zentrale Qualitätssicherung der Schaeffler Gruppe und bei Herrn Bernd Wolle-  
nick, Leiter des Bereiches Entwicklung Maschinensysteme in Herzogenaurach, für ihre wohlwollende Unterstützung bedanken.

Für die entgegengebrachte Diskussionsbereitschaft danke ich den Herren Dr. rer. pol. Heiner Diefenbach, Dipl.-Ing. Wolfgang Metzgeroth, Dipl.-Ing. Walter Scharf, Dipl.-Ing. Kurt Will, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Carsten Zinner und Frau Dipl.-Wirtsch.-Ing. Karina Weißensee sowie meinen Praktikanten und Diplomanden.

Meiner gesamten Familie, insbesondere meiner Frau Sabine, danke ich von ganzem Herzen für die Unterstützung, den vermittelten Rückhalt und die sorgfältige Korrektur des Manuskriptes.

Herzogenaurach, 23. Juni 2006

Stephan Sommer

## Kurzzusammenfassung

Das Qualitätsniveau von Lieferungen in der Automobilindustrie strebt eine Fehlerquote von „Null Fehlern“ an. Einen wesentlichen Beitrag dazu liefern automatisierte Montage- und Prüfsysteme (AMPS). Der große Investitionsaufwand in diese Systeme muss durch eine hohe Qualitätsleistung und Verfügbarkeit möglichst schnell kompensiert werden.

Stand der Technik für die Beschreibung der Qualitätsmerkmale des Betriebsverhaltens von AMPS sind die Qualitätsfähigkeit von Messmitteln, Maschinen und Prozessen, das Verfügbarkeitsverhalten und die Leistungsfähigkeit. Als Ergänzung wird eine Differenzierung zwischen maschinenbedingten und nicht maschinenbedingten Einflussgrößen sowie eine neue Berechnung der Qualitätsleistung vorgenommen. Die Zusammenfassung der Qualitätsmerkmale des Betriebsverhaltens von AMPS ergibt die Systemfähigkeit.

Die Strukturierung von AMPS in die Funktionsbereiche Messkette, Station, Prozess und manueller Eingriff erleichtert die Reduktion der vielfältigen Fehlermöglichkeiten in AMPS auf wenige, aber signifikante finale Fehler.

Zur Vermeidung der finalen Fehler wird die Systematisierung von bekannten und die Entwicklung von neuen Methoden der Fehlererkennung durchgeführt. Die Methoden sind gegliedert in Redundanzkonzepte, Selbsttests und Plausibilitätskriterien.

Zwei neuartige Absicherungs-Algorithmen führen eine bedarfs- und risikogerechte Kombination verschiedener Methoden der Fehlererkennung durch. Dies ist zum einen ein Standard-Absicherungs-Algorithmus, der für alle AMPS gilt, und zum anderen ein Erweiterter-Absicherungs-Algorithmus, dessen Planung mithilfe eines neu entwickelten Computerprogramms durchgeführt wird. Ergebnis sind fehlersichere AMPS, die auftretende Fehler selbstständig erkennen.

Der Beitrag der Absicherungs-Algorithmen zur Steigerung der Qualitätsleistung besteht in der Minimierung der Produktion von Schlechtteilen durch die sofortige Fehlererkennung (Fehlersicherheit). Der Beitrag zur Steigerung der Verfügbarkeit ist die zeitliche Verkürzung und die Reduktion der Häufigkeit manueller Überwachungsmaßnahmen.

Die praktische Erprobung der Absicherungs-Algorithmen am Beispiel eines AMPS für Nockenwellenverstellungssysteme ergibt einen Verfügbarkeitsgewinn von etwa sieben Prozent bei gleichzeitig sehr guter Qualitätsleistung

## Abstract

The aim in automotive engineering is to achieve an error rate of “zero defects”. Automated Assembly and Workpiece Inspection Systems (AAWIS) can contribute significantly to this. The considerable investment expenditure in these systems has to be quickly compensated by a high quality performance and availability.

The quality characteristics of an AAWIS’s operating behavior are determined by the quality capability of measuring devices, machines, and processes, the availability behavior and the performance capability. In addition, there is a differentiation between machine-related and not machine-related influencing factors as well as a new calculation of the quality performance. The combination of the quality characteristics of AAWIS determines the system capability.

Dividing AAWIS into the functional areas of measuring chain, station, process and manual interference facilitates the reduction of various error possibilities to few but significant final errors.

To avoid final errors, the systematization of known methods and the development of new methods in error detection is carried out. The methods are divided up into redundancy concepts, self-tests and plausibility criteria.

Two new monitoring algorithms execute a combination of different error detection methods, according to the needs and risks. One is the standard monitoring algorithm that is valid for all AAWIS, the other is an extended monitoring algorithm which is planned with a newly developed computer program. This results in fail-safe AAWIS that detect errors automatically.

The monitoring algorithms help to increase quality performance by minimizing the number of Not-OK parts due to immediate error detection (fail-safety). They also help to increase availability by shortening and reducing manual monitoring measures.

When the monitoring algorithms were tested in an AAWIS for camshaft adjustment systems, an availability gain of about seven percent with a very good quality performance was shown.

## **Inhaltliche Kurzfassung**

### **1 Einleitung und Motivation**

#### **I Stand der Technik**

### **2 Qualitätsmerkmale des Betriebsverhaltens automatisierter Montage- und Prüfsysteme**

#### **II Theoretische Untersuchungen**

### **3 Struktur und Fehlerpotenzial automatisierter Montage- und Prüfsysteme**

### **4 Methoden der Fehlererkennung zur Steigerung der Qualitätsleistung**

### **5 Absicherungs-Algorithmen zur Steigerung der Qualitätsleistung**

### **6 Steigerung der Verfügbarkeit durch die Anwendung der Absicherungs-Algorithmen**

#### **III Praktische Umsetzung**

### **7 Anwendung der Absicherungs-Algorithmen am Beispiel**

### **8 Zusammenfassung und Ausblick**

### **9 Literaturverzeichnis**

### **10 Abbildungs-, Tabellen- und Abkürzungsverzeichnis**

### **11 Anhang**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation	1
1.2	Anforderungen an automatisierte Montage- und Prüfsysteme	4
1.3	Handlungsbedarf zum Stand der Technik, das Dilemma der Messunsicherheit	4
1.4	Präzisierung der Aufgabenstellung und inhaltlicher Aufbau	7
<b>I Stand der Technik</b>		
<b>2</b>	<b>Qualitätsmerkmale des Betriebsverhaltens automatisierter Montage- und Prüfsysteme (AMPS)</b>	<b>8</b>
2.1	Qualitätsfähigkeit und Qualitätsleistung	9
2.1.1	Fähigkeit des Prüfprozesses und Prüfprozesseignung	11
2.1.2	Fähigkeit des Montageprozesses	15
2.1.3	Berücksichtigung der Messunsicherheit	20
2.2	Verfügbarkeitsverhalten und Nutzungsgrad	25
2.2.1	Technische Zuverlässigkeit	29
2.2.2	Instandhaltbarkeit	30
2.2.3	Organisatorische Ausfallzeiten	31
2.3	Leistungsmerkmale und Leistungsgrad	32
2.4	Total Productive Maintenance (TPM) und Gesamtanlageneffektivität	33
2.5	Zusammenfassung zur Systemfähigkeit	36
2.5.1	Ablauf der Ermittlung	36
2.5.2	Übersicht Systemfähigkeit (Tabelle 2-19)	37
<b>II Theoretische Untersuchungen</b>		
<b>3</b>	<b>Struktur und Fehlerpotenzial automatisierter Montage- und Prüfsysteme (AMPS)</b>	<b>39</b>
3.1	Komponenten von AMPS	39
3.2	Strukturierung von AMPS in Funktionsbereiche	41
3.2.1	Messebene (Messkette)	41
3.2.2	Stationsebene	42

---

3.2.3	Prozessebene	44
3.2.4	Manuelle Eingriffs-Ebene (Rüst- und Instandhaltungsebene)	45
3.2.5	Schnittstellenabgrenzung und Strukturmatrix	45
3.3	Analyse des Fehlerpotenzials von AMPS	46
3.4	Zusammenfassung der Fehlermöglichkeiten zu finalen Fehlern in den Funktionsbereichen	57
<b>4</b>	<b>Methoden der Fehlererkennung zur Steigerung der Qualitätsleistung von automatisierten Montage- und Prüfsystemen</b>	<b>51</b>
4.1	Überblick und Definition	51
4.2	Redundanzkonzepte	53
4.2.1	Hardwareredundanz	54
4.2.2	Analytische Redundanz	61
4.2.2.1	Wiederholmessungen in der Messstation	61
4.2.2.2	Parallele baugleiche Messstationen	64
4.2.2.3	Aktoren als Messsysteme	68
4.3	Selbsttests zur Fehlererkennung	71
4.3.1	Selbsttests zur Fehlererkennung in der Messkette	71
4.3.2	Selbsttests zur Fehlererkennung an Motor, Getriebe und Lager	75
4.4	Plausibilitätskriterien	77
4.4.1	Kalibrierwertregelkarte	77
4.4.2	Normale	78
4.4.3	Handhabung von Schlechtteilen	80
4.4.4	Teilerückverfolgbarkeit	84
4.4.5	Zwischenkastenprinzip	87
4.4.6	Bewegungs- und Zeitüberwachung	87
4.4.7	Messbereichsüberwachung beim Kalibrieren	88
4.4.8	Bewegungsüberwachung in der Messkette	88
4.4.9	Mehrmalige Schlechtbewertung in Folge	89
4.4.10	Rüstvorgänge	89
4.4.11	Poka Yoke Maßnahmen	90

<b>5</b>	<b>Absicherungs-Algorithmen zur Steigerung der Qualitätsleistung</b>	<b>92</b>
5.1	Standard-Absicherungs-Algorithmus (S-Ab-AI)	92
5.2	Erweiterter-Absicherungs-Algorithmus (E-Ab-AI)	93
<b>6</b>	<b>Steigerung der Verfügbarkeit von AMPS</b>	<b>98</b>
6.1	Verfügbarkeitsgewinn durch fehlersichere Montage- und Prüfkompnenten	98
6.2	Verfügbarkeitsverlust durch das Ausfallverhalten zusätzlicher Komponenten	101
<b>III Praktische Umsetzung</b>		
<b>7</b>	<b>Steigerung der Qualitätsleistung und Verfügbarkeit am Beispiel Nockenwellenversteller</b>	<b>104</b>
7.1	Systembeschreibung und Aufgabenstellung	104
7.2	Standard-Absicherungs-Algorithmus	106
7.3	Erweiterter-Absicherungs-Algorithmus	107
7.4	Vorläufige Systemfähigkeit	112
7.5	Erwarteter Verfügbarkeitsgewinn	113
7.6	Probelauf	113
7.7	Gesamtanlageneffektivität	116
7.8	Zusammenfassung zur Systemfähigkeit (Tabelle 7-18)	119
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>121</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>124</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungs-, Tabellen- und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>133</b>
<b>11</b>	<b>Anhang</b>	<b>142</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der Produktionsstandort Deutschland ist in den letzten zehn Jahren aufgrund seiner hohen Lohn- und Lohnnebenkosten Gegenstand permanenter Diskussionen [Milberg 1994; Ernst & Young 2004]. Während noch vor 10 Jahren die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch die Verlagerung von personalintensiven Montagearbeiten in benachbarte Niedriglohnländer unter Einbeziehung betriebswirtschaftlich-strategischer und sozialpolitischer Gesichtspunkte angezweifelt wurde [Lotter 1995], ist heute der Beweis der effizienten Produktion in diesen Ländern längst erbracht. Die damals angeführten Nachteile der geringen Qualität sowie der fehlende Informationsaustausch zwischen Produktion und Entwicklung sind heute weitgehend kompensiert. Die negativen Auswirkungen auf die Beschäftigungsstruktur und damit auf die sozialpolitische Entwicklung im Inland sind jedoch geblieben. Die Tendenz zur Verlagerung der Produktion in Niedriglohnländer wird auch in Zukunft anhalten<sup>1</sup>, obwohl es durchaus Perspektiven für den Standort Deutschland gibt [McKinsey 2005]. Diese Perspektiven ergeben sich aus folgender Argumentationskette:

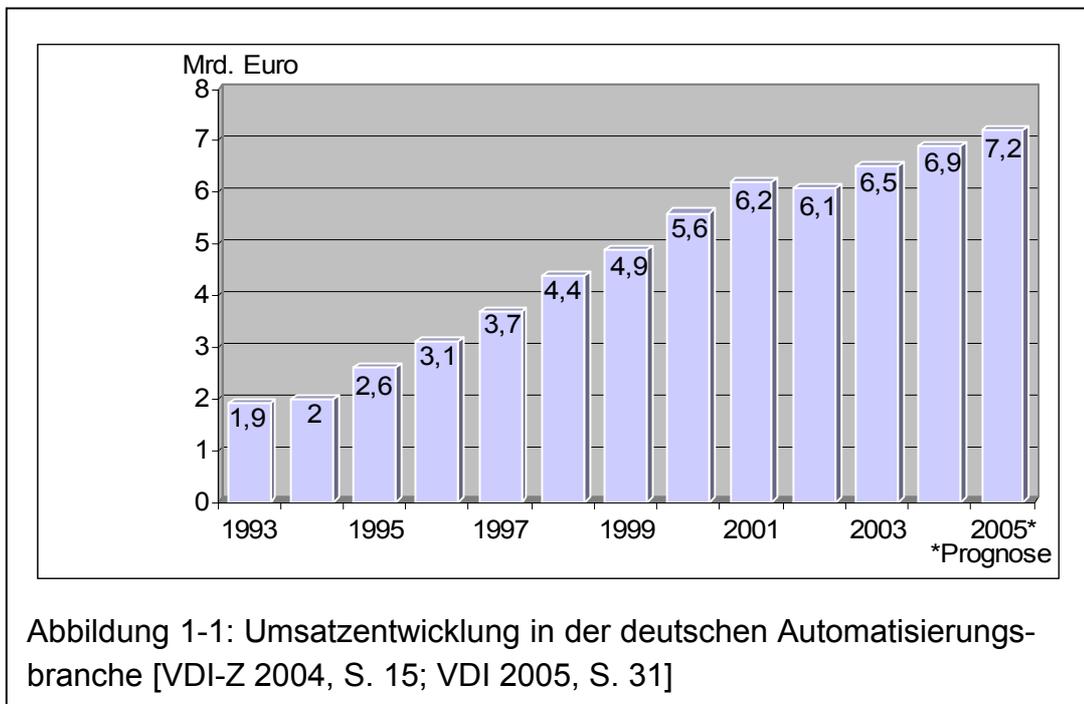
Das Qualitätsniveau von Lieferungen in der Automobilindustrie strebt eine Fehlerquote von 0 parts per million (ppm) an. Während im Jahr 1997 eine Fehlerquote von durchschnittlich 30 ppm Stand der Technik war, wird heute eine Fehlerquote<sup>2</sup> von weniger als 10 ppm im gesamten Produktportfolio eines Serienherstellers realisiert. Einen wesentlichen Beitrag zu dieser Verbesserung liefert die stetige Automatisierung von Montage- und Prüfprozessen. Die hohen Investitionen in die Produktionstechnologie des letzten Wertschöpfungsschrittes führt zu Ausbringungsmengen auf höchstem Qualitätsniveau bei gleichzeitig minimalem Personaleinsatz. Mit diesen automatisierten Montage- und Prüfsystemen (AMPS) können die Standortnachteile kompensiert und gleichzeitig die Standortvorteile der hochqualifizierten Arbeitskräfte besser genutzt werden.

---

<sup>1</sup> Durch die Integration weiterer osteuropäischer Länder in die Europäische Gemeinschaft zum 01. Mai 2004 wurden die politischen und wirtschaftlichen Bedingungen des Warenaustausches weiter stabilisiert [Ernst & Young 2004].

<sup>2</sup> Hersteller, die höhere (durchschnittliche) Fehlerquoten im Produktportfolio aufweisen, haben hohe Haftungsrisiken. Neben dem obligatorischen Ersatz des mangelhaften Produktes wird häufig die gesamte Lieferung zurückgewiesen. Führt das nicht spezifikationskonforme Produkt zu Schäden, ist außerdem der sogenannte Mangelfolgeschaden zu ersetzen. Die verschuldensunabhängige Haftung aus dem Produkthaftungsgesetz hat diese Haftungsrisiken für den Hersteller zusätzlich verschärft.

Diese Entwicklung führte in den letzten Jahren bei den deutschen Herstellern von Automatisierungssystemen zu einem Expansionsschub (Abbildung 1-1). Der Umsatz in dieser Branche wird für 2005 auf 7,2 Mrd. Euro geschätzt. Davon entfallen ca. 1 Mrd. Euro auf die industrielle Bildverarbeitung, 4,3 Mrd. Euro auf Montage- und Handhabungstechnik sowie 1,9 Mrd. Euro auf die Hersteller von Robotik.



Bei den Montage- und Prüfsystemen handelt es sich um typengebundene Spezialsysteme mit hohem Automatisierungsgrad, die für einen speziellen Zweck konstruiert und gebaut wurden. Der Automatisierungsgrad gibt an, „...wie hoch der Anteil der automatisierten Operationen an der Gesamtzahl innerhalb eines abgegrenzten Montagesystems ist“ [Spur 1986, S. 594]. In Tabelle 1-1 werden verschiedene Grade der Automatisierung dargestellt. Es handelt sich um einen manuellen Prozess, wenn sämtliche Tätigkeiten durch den Menschen ausgeführt werden. Im Gegensatz dazu handelt es sich um einen vollautomatischen Prozess, wenn sich die Tätigkeit des Menschen auf die Störungsbehebung beschränkt.

Ein Beispiel für ein automatisiertes Montage- und Prüfsystem (AMPS) ist in Abbildung 1-2 dargestellt. AMPS arbeiten in der Regel 18 Schichten pro Woche mit hohen Ausbringungsmengen bei minimalem Personaleinsatz. Beim Personal handelt es sich um hochqualifizierte Mitarbeiter, die sowohl über das mechanische und elektrische Know-how als auch über Basiswissen zur Fehlerdiagnose bei der Software zur Maschinensteuerung verfügen. Ihre Hauptaufgaben liegen in der Sicherstellung einer reibungslosen Produktion, der frühzeitigen Fehlererkennung sowie der Fehlerdiagnose. Diese Maschinen-Manager müssen sich auf die fehlerfreie Produktion der Werkstücke bzw. auf die zuverlässige Erkennung und Ausschleusung fehlerhafter Teile verlassen können.

Eine manuelle Plausibilitätsprüfung der Produktionsergebnisse ist nur sehr eingeschränkt möglich.

Tabelle 1-1: Grad der Automatisierung [Spur 1986, S. 594 f]

Aufgabenbereiche	Grad der Automatisierung bei Montage- und Prüfprozessen			
	manuell	mechanisiert	halbauto- matisch	vollauto- matisch
Zuführung der Energie	Mensch	Antrieb	Antrieb	Antrieb
Zuführung der Werkstücke	Mensch	Mensch	Mensch	Maschine
Zuführung der Werkzeuge	Mensch	Mensch	Mensch	Maschine
Steuern des Prozesses	Mensch	Mensch	Steuerung	Steuerung
Überwachen	Mensch	Mensch	Mess- systeme	Mess- systeme
Störungsbehebung	Mensch	Mensch	Mensch	Mensch

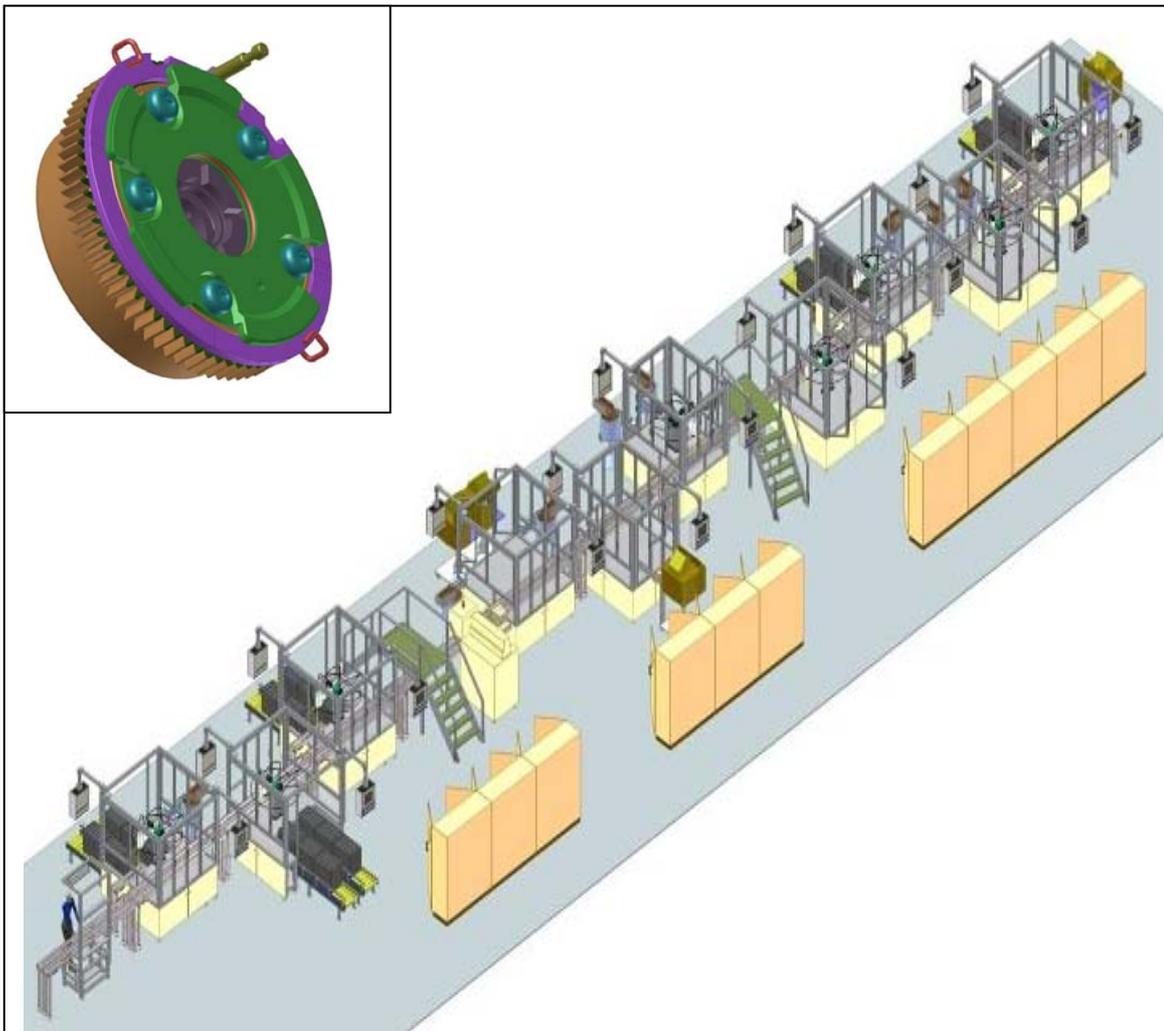


Abbildung 1-2: Automatisiertes Montage- und Prüfsystem (AMPS) für Nockenwellenverstellungssysteme (oben links)

## 1.2 Anforderungen an automatisierte Montage- und Prüfsysteme

Um die Erfolgskombination Hochautomation mit hochqualifizierten Arbeitskräften am Standort Deutschland betriebswirtschaftlich effizient umzusetzen, müssen die AMPS immer höhere Anforderungen erfüllen. So erfordert die (Montage-) Produktdifferenzierung eine hohe Variantenflexibilität der AMPS [Reinhard, 1997, S. 185]. Gleichzeitig muss der hohe Investitionsaufwand durch eine hohe Verfügbarkeit sowie durch einen hohen qualitativen und quantitativen Output (Qualitätsleistung, Leistungsgrad) bei niedrigem Betreuungsaufwand (Wartbarkeit) möglichst schnell kompensiert werden (Amortisationszeit).

Neben diesen Anforderungen hat sich in jüngster Zeit ein weiteres Qualitätsmerkmal, die Fehlersicherheit von AMPS, herausgebildet. Während die Überwachung von Montagevorgängen Stand der Technik ist [Spur 1986], stellt sich bei automatisierten Prozessen die Frage: Wer überwacht die Wächter? Um diesen neuen Anforderungen gerecht zu werden, bedarf es der Einführung zusätzlicher Überwachungsalgorithmen. Die systematische Strukturierung, Planung und Umsetzung dieser Überwachungsalgorithmen liefert einen entscheidenden Beitrag zur Steigerung der Qualitätsleistung und Verfügbarkeit automatisierter Montage- und Prüfsysteme. Gegenstand der zusätzlichen Überwachung sind die Prüfprozesse in AMPS. Diese automatisierte Fertigungsmesstechnik unterscheidet sich von der Labormesstechnik in ihrer Überwachbarkeit. Während der Bediener in der Labormesstechnik das Messergebnis einer Plausibilitätsprüfung unterziehen kann und die abschließende Bewertung durchführt, kann die automatisierte Produktion diesen „gesunden Menschenverstand“ nicht abbilden. Deshalb müssen zusätzliche Verfahren und Methoden eingesetzt werden, um alle möglichen Fehlerquellen auszuschließen.

## 1.3 Handlungsbedarf zum Stand der Technik, das Dilemma der Messunsicherheit

Das Dilemma der Messunsicherheit besteht darin, dass sie nur nachträglich (ex post) durch zusätzlichen analytischen Aufwand ermittelt werden kann. Die Messunsicherheit eines aktuell ermittelten Messwertes bleibt zunächst unbekannt. Gängige Praxis in der Fertigungsmesstechnik ist deshalb die (einmalige) Ermittlung der Messunsicherheit eines Messsystems zu einem bestimmten Zeitpunkt unter bekannten und stabilen Bedingungen. Während des Einsatzes eines auf diese Weise qualifizierten Messsystems, sorgt der Bediener für die Erfüllung der stabilen Bedingungen, wie z. B. Temperatur und Sauberkeit, und beobachtet mit Sachverstand den Ablauf der Messung. Den ermittelten Messwert prüft der Bediener auf Plausibilität. Den Messablauf bewertet er hinsichtlich seiner Störungsfreiheit und zieht zusätzliche Hilfsgrößen, wie z. B. die Tempe-

ratur, zur qualitativen Bewertung hinzu. Diese Erkenntnisse, gepaart mit der in der Vergangenheit ermittelten Messunsicherheit, erlauben es, ein vollständiges Messergebnis anzugeben. Dieses entspricht dem aus der Messung ermittelten Messwert und der dieser Messung nachträglich zugeordneten Messunsicherheit.

Messergebnis = Messwert +/- Messunsicherheit

Bestehen Zweifel an dem Messergebnis, so wird der Bediener Maßnahmen zur Überprüfung einleiten. Dies sind zunächst die Kalibrierung des Messgerätes und eine Wiederholmessung oder Vergleichsmessungen mit anderen Messgeräten oder Messungen durch andere Messlaboratorien (Ringversuche). Auf diese Weise ist die Ermittlung eines richtigen und sicheren Messergebnisses gewährleistet.

In der automatisierten Montage- und Prüftechnik sind die erwähnten Maßnahmen aus Zeitgründen nicht bei jedem Messergebnis durchführbar. Die einmal ermittelte Messunsicherheit wird zwar durch periodische Überwachung überprüft, zwischen den Überwachungen wird jedoch von der Zuverlässigkeit des AMPS und damit von der Gültigkeit der in der Vergangenheit ermittelten Messunsicherheit ausgegangen. Wie fehlerhaft diese Annahme sein kann, zeigt ein Vergleich der Einflussfaktoren der automatisierten Fertigungsmesstechnik (FMT) mit den Einflussgrößen der bedienergeführten Koordinatenmesstechnik (LMT) in diesem Beispiel stellvertretend für die Labormesstechnik (LMT) stehen soll (Abbildung 1-3).

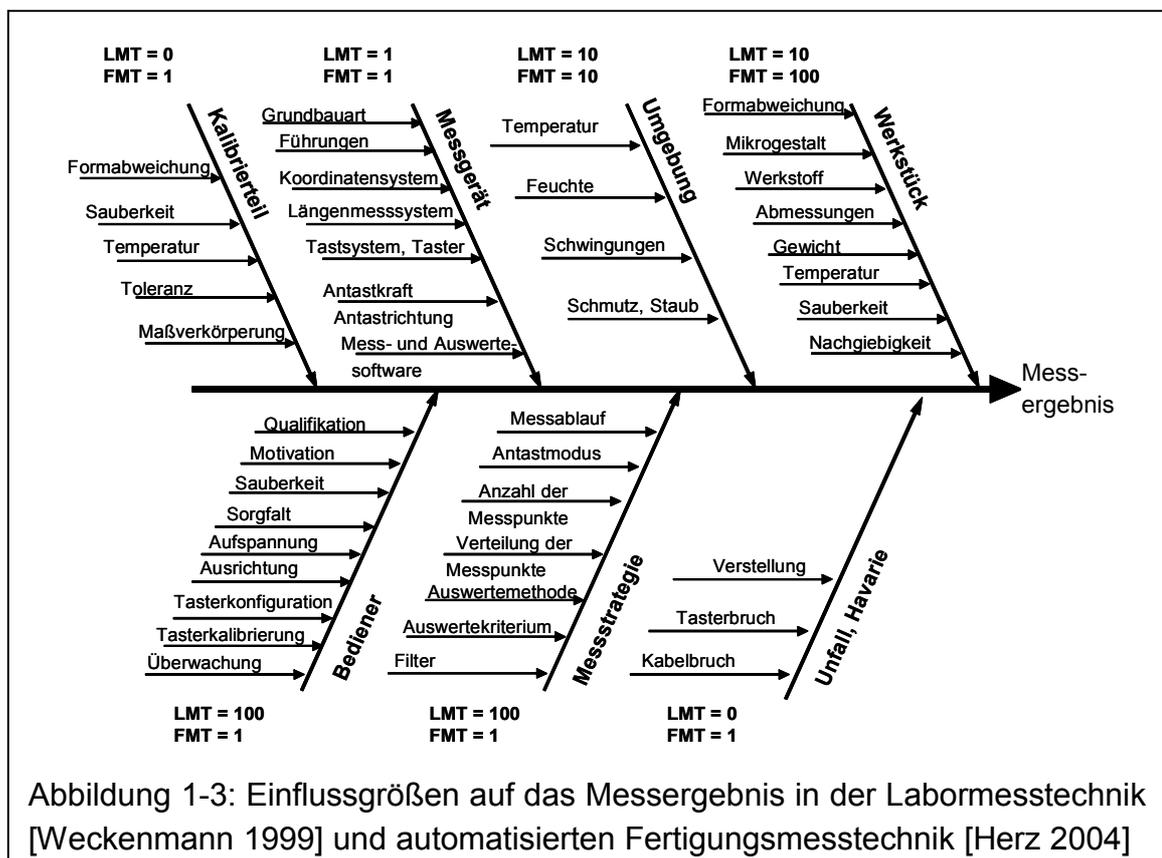


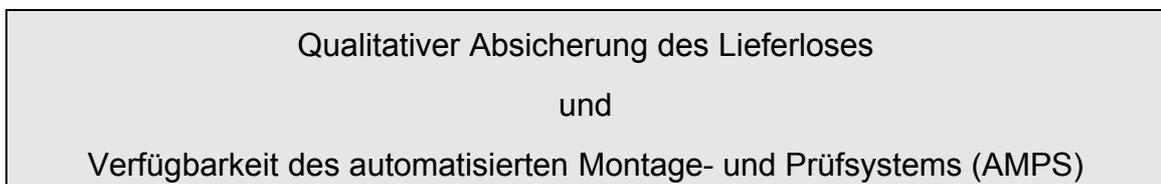
Abbildung 1-3: Einflussgrößen auf das Messergebnis in der Labormesstechnik [Weckenmann 1999] und automatisierten Fertigungsmesstechnik [Herz 2004]

Während in der Labormesstechnik der Bediener und die gewählte Messstrategie das Messergebnis dominieren [Weckenmann 1999, S. 195], spielen diese Faktoren bei AMPS eine untergeordnete Rolle, da sie den Abnahmeprozess bereits erfolgreich durchlaufen haben. Bei AMPS wird das Messergebnis durch die objektbedingte (Werkstück) Unsicherheiten, die Zuverlässigkeit des Messsystems sowie durch die Umgebungsbedingungen bestimmt [Herz 2004]. Bei automatisierten Prüfprozessen können sich die Werkstückeigenschaften, wie z. B. geometrische Eigenschaften, Grate oder Verschmutzung, der VDMA bezeichnet das als „Teilehygiene“ [VDMA 1996, S. 137], von Messung zu Messung verändern. Auch sind die Umgebungsbedingungen i. d. R. weit weniger stabil als im Messlabor.

Diese Einflüsse führen dazu, dass die Messunsicherheit eines AMPS größeren Schwankungen unterliegen kann. Diesen Herausforderungen begegnet man heute mit dem Einsatz robuster Messsysteme, mit der systematischen und periodischen Überwachung und Kalibrierung sowie mit dem Materialflussprinzip „Zwischenkasten“. Beim Zwischenkasten-Prinzip wird ein gefertigtes Los erst dann zur Lieferung freigegeben, wenn die nachträgliche Überwachung des AMPS die fehlerfreie Funktion seit der letzten Überwachung vermuten lässt.

Bei dieser Vorgehensweise ergibt sich jedoch ein Zielkonflikt zwischen der qualitativen Leistungsfähigkeit (Qualitätsleistung) und Verfügbarkeit eines AMPS. Aus qualitativer Sicht ist eine möglichst häufige Überprüfung des AMPS wünschenswert, um die Unsicherheit zwischen den Überprüfungen und die Größe des Zwischenkastens möglichst klein zu halten. Aus verfügbarkeitstechnischer Sicht ist dagegen eine möglichst seltene Überprüfung wünschenswert, da die Produktion zur Überprüfung gestoppt werden muss. Besonders dann, wenn in AMPS mehrere zu überprüfende Systeme integriert sind, vergrößert sich der Zeitverlust durch die notwendige Produktionsunterbrechung spürbar.

Zielkonflikt zwischen:



Eine Lösungsmöglichkeit dieses Zielkonfliktes besteht in der Verwendung „**fehlersicherer Montage- und Prüfsysteme**“. Diese Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie ihre Funktionsfähigkeit automatisch überwachen und dadurch die Häufigkeit der manuellen Überwachung reduziert werden kann. Die automatische Überwachung erfolgt idealer Weise vor jedem Montage- oder Messvorgang oder spätestens nach einer definierten kurzen Periode. Zusätzlich sind diese Systeme optimiert, fehlerhafte Teile sicher auszuschleusen. Das Ergebnis dieser Vorgehensweise sind AMPS, die sich durch eine hohe Qualitätsleistung (geringe Anzahl von Fehlerteilen) sowie durch eine verbesserte Ver-

fügbare und damit durch ein besseres Leistungsniveau als herkömmliche AMPS auszeichnen.

## 1.4 Präzisierung der Aufgabenstellung und inhaltlicher Aufbau

Aus dem Handlungsbedarf ergeben sich mehrere Arbeitsschwerpunkte, die die Gliederung dieser Arbeit bestimmen. Nachdem der Stand der Technik zur Bewertung von AMPS zusammengefasst wurde, erfolgt die Analyse des Fehlerpotenzials. Dazu werden die AMPS in 4 Komponenten gegliedert.

Tabelle 1-2: Komponenten von AMPS

Automatisierte Montage- und Prüfsysteme (AMPS)			
Messkette	Montage- oder Messstation	Prozesskomponente	Rüstkomponenten

Im Hauptteil der Arbeit werden Methoden der Fehlererkennung vorgestellt, die sich zur Steigerung der Qualitätsleistung eignen. Jeder Methode wird eine Fehler-Entdeckungswahrscheinlichkeit zugeordnet. Hieraus leitet sich die Art und Anzahl der grundsätzlichen Absicherungsmaßnahmen ab, die in allen AMPS vorhanden sein müssen. Aus Qualitätssicht wäre es wünschenswert, möglichst viele Methoden der Fehlererkennung zu installieren. Dies würde aber die Kosten für AMPS erhöhen und damit die Wettbewerbsfähigkeit des herzustellenden Produktes belasten. Deshalb stellt sich die Frage nach einer

- Standardausstattung (Standard-Absicherungs-Algorithmus, S-Ab-AI) und
- einer Einzelfall bezogenen produkt- und prozessoptimierten Ausstattung (Erweiterter-Absicherungs-Algorithmus, E-Ab-AI) von AMPS.

Zur Lösung dieser Fragestellung wird ein Planungswerkzeug vorgestellt, mit dem die Methoden der Fehlererkennung bedarfsgerecht zu Algorithmen kombiniert werden können.

Im zweiten Teil der Arbeit wird der Beitrag der beiden Absicherungs-Algorithmen auf die Steigerung der Verfügbarkeit beschrieben. Besonders die Reduktion der manuellen Überwachungstätigkeit liefert hier das Verbesserungspotenzial.

Die entwickelten Algorithmen werden im dritten Teil der Arbeit am Beispiel der Serienproduktion von Motorelementen für Verbrennungsmotore erprobt.

Ziel der Arbeit ist es, einen Beitrag zur Optimierung der automatisierten Serienproduktion im Bereich der Montage- und Prüftechnik zu liefern.

## 2 Qualitätsmerkmale des Betriebsverhaltens automatisierter Montage- und Prüfsysteme (AMPS)

Das Betriebsverhalten automatisierter Montage- und Prüfsysteme (AMPS) lässt sich durch Leistungsmerkmale, durch das Verfügbarkeitsverhalten (bzw. Nutzungsgrad) sowie durch die Qualitätsfähigkeit beschreiben [Spur 1986].

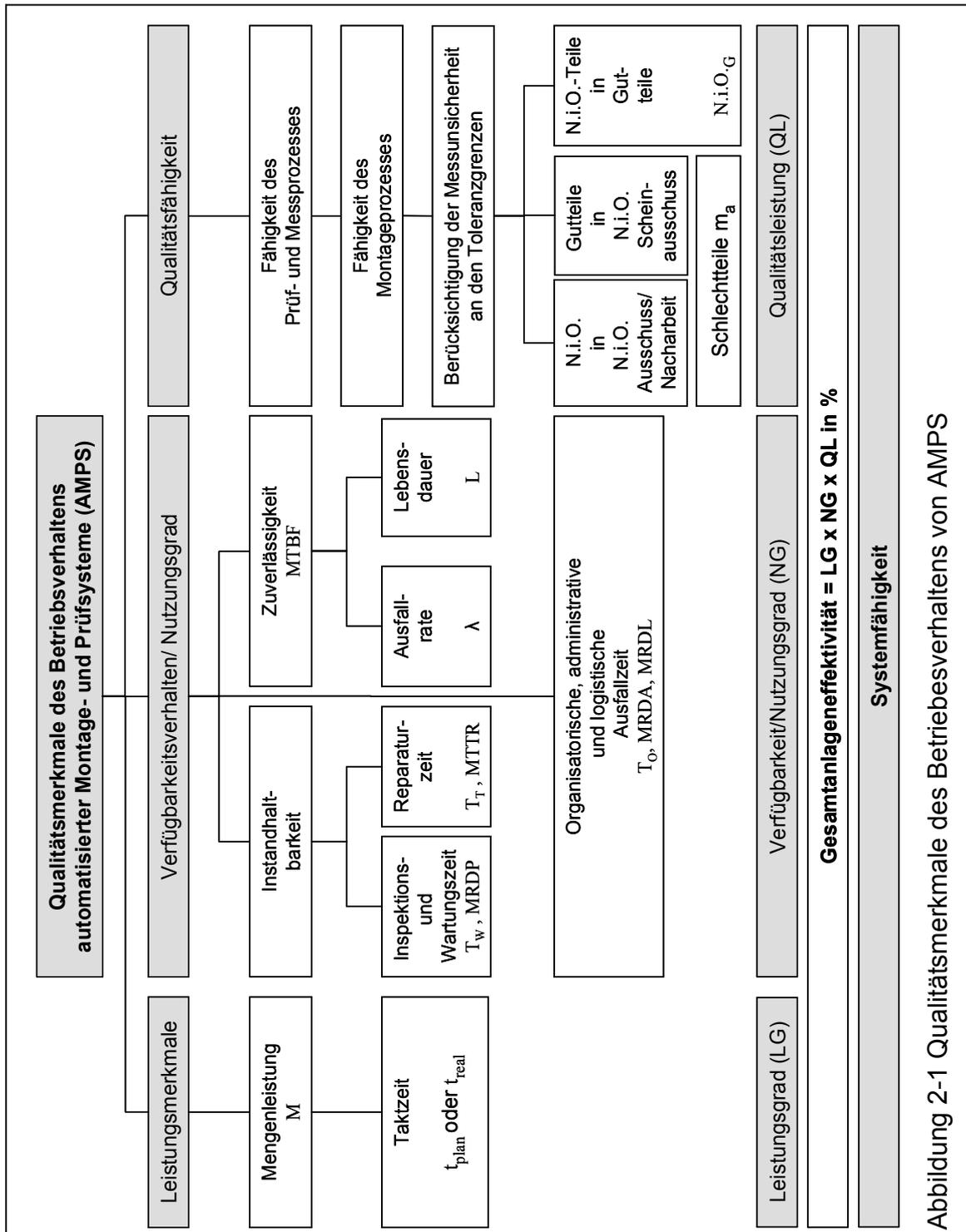


Abbildung 2-1 Qualitätsmerkmale des Betriebsverhaltens von AMPS

Die Kennzahlen werden in der Systemfähigkeit zusammengefasst [VDMA 1996]. Die Gesamtanlageneffektivität (G.A.E) wird aus den Größen Leistungsgrad (LG), Verfügbarkeit (V) bzw. Nutzungsgrad (NG) und Qualitätsleistung (QL) berechnet [Nakajima 1988 und 1995]. Die Hierarchie des Kennzahlensystems zeigt Abbildung 2-1.

## 2.1 Qualitätsfähigkeit und Qualitätsleistung

Definition:

Die Qualitätsleistung (QL) ist ein Maß für die Fähigkeit eines AMPS, Produkte innerhalb vorgeschriebener Spezifikationsgrenzen zu montieren und zu prüfen [VDMA 1996].

Nach dem Stand der Technik wird die Qualitätsleistung als der Anteil fehlerfreier Produkte (Gutteile,  $m - m_a$ ) an der Gesamtmenge produzierter Produkte ( $m$ ) berechnet [VDMA 1996]. Die produzierte Schlechtmengemenge ( $m_a$ ) setzt sich aus der Menge von Ausschuss und Nacharbeit, aus der zunächst unbekannt Menge der Gutteile, die fälschlicherweise als Schlechtmengemenge aussortiert wurden (Scheinausschuss) sowie aus der Menge der Schlechtmengemenge, die fälschlicherweise in die Menge der Gutteile sortiert wurden (N.i.O.G), zusammen.

$$QL = \frac{m - m_a}{m} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Bei dieser Vorgehensweise nach dem Stand der Technik ergibt sich folgendes Verbesserungspotenzial:

1. Die Berechnung der Qualitätsleistung schließt in der Gesamtmenge der Schlechtmengemenge auch jene Schlechtmengemenge ein, die in die Menge der Gutteile sortiert und folglich an den Kunden verkauft wurden. Dieses große Risiko der Reklamation und eventuell folgender Rückrufaktionen wird durch die Kennzahl (QL) nicht ausreichend abgebildet. Nach bisheriger Rechnung wäre es möglich, eine scheinbar zufriedenstellende Qualitätsleistung zu realisieren und trotzdem Schlechtmengemenge an den Kunden zu liefern.
2. Die Kennzahlen berücksichtigen eine Gesamtanlagensicht. Dies ist nur teilweise befriedigend, da nicht zwischen maschinenbedingten und nicht maschinenbedingten Ursachen unterschieden werden kann. Insbesondere in der Montagetechnik treten häufig unnötige Unterbrechungen wegen mangelnder Einzelteilequalität oder mangelnder Teilehygiene, z. B. Verschmutzung der Einzelteile, auf. Die bisherige Betrachtungsweise erschwert die Ursachenanalyse, da durch zusätzliche Untersuchungen die wahren Gründe für Störungen und Unterbrechungen ermittelt werden müssen.

Für die weitere Vorgehensweise wird deshalb die erweiterte Definition der Qualitätsleistung sowie die Unterscheidung zwischen maschinenbedingter Quali-

tätsleistung und Gesamtqualitätsleistung vorgeschlagen. Dadurch wird gewährleistet, dass bereits ein Schlechteil in der Menge der Gutteile die Qualitätsleistung auf Null sinken lässt und Störungsursachen besser zugeordnet werden können (Tabelle 2-1).

Die Unterscheidung zwischen maschinenbedingter Qualitätsleistung und Gesamtqualitätsleistung erfordert eine leicht veränderte Berechnung sowie eine neue Definition des produzierten Mengengerüstes.

Tabelle 2-1: Neue Berechnung der Qualitätsleistung (QL) und Mengengerüst

Maschinenbedingte Qualitätsleistung $QL_{mb}$	Gesamtqualitätsleistung QL
$QL_{mb} = \begin{cases} \frac{m - m_{amb}}{m} * 100\% & \text{für } N.i.O_{Gmb} = 0 \\ 0 & \text{für } N.i.O_{Gmb} > 0 \end{cases}$	$QL = \begin{cases} \frac{m - m_a}{m} * 100\% & \text{für } N.i.O_G = 0 \\ 0 & \text{für } N.i.O_G > 0 \end{cases}$

#### Mengengerüst der Qualitätsleistung

$m = m_{gut} + m_a$	$m$ Anzahl produzierter Teile $m_{gut}$ Anzahl Gutteile
$m_a = m_{amb} + m_{anmb}$	$m_a$ Anzahl Schlechteile
$m_{amb}$	Anzahl maschinenbedingter, d. h. durch das AMPS verursachte Schlechteile.
$m_{amb} = AA_{mb} + NA_{mb} + SA_{mb}$	$AA_{mb}$ Arbeitsausschuss maschinenbedingt $NA_{mb}$ Nacharbeit maschinenbedingt $SA_{mb}$ Scheinausschuss maschinenbedingt
$m_{anmb}$	Anzahl nicht maschinenbedingter, d. h. durch andere Störgrößen (z. B. Teileverschmutzung) verursachte Schlechteile.
$m_{anmb} = AA_{nmb} + NA_{nmb} + SA_{nmb}$	$AA_{nmb}$ Arbeitsausschuss nicht maschinenbedingt $NA_{nmb}$ Nacharbeit nicht maschinenbedingt $SA_{nmb}$ Scheinausschuss nicht maschinenbedingt
$N.i.O_G$	Anzahl Schlechteile in Gutteile
$N.i.O_G = N.i.O_{Gmb} + N.i.O_{Gnmb}$	$N.i.O_{Gmb}$ Anzahl Schlechteile in Gutteile maschinenbedingt $N.i.O_{Gnmb}$ Anzahl Schlechteile in Gutteile nicht maschinenbedingt

Die Qualitätsleistung wird durch die Fähigkeit des Prüf- und Montageprozesses sowie durch Berücksichtigung der Messunsicherheit an den Toleranzgrenzen beeinflusst (Abbildung 2-1).

### 2.1.1 Fähigkeit des Prüfprozesses und Prüfprozesseignung

Voraussetzung für die Bewertung von Qualitätsmerkmalen in Montageprozessen ist ein fehlerfreier Prüfprozess. Diese Forderung muss aber insoweit relativiert werden, als dass Prüfprozesse niemals völlig fehler- bzw. abweichungsfrei ablaufen können, da stets eine Vielzahl von Einflüssen wirken, die das Messergebnis zufällig oder systematisch verfälschen. Vor diesem Hintergrund sind in der Vergangenheit eine Vielzahl von Normen und Richtlinien entstanden, die die Vorgehensweise bei der Bestimmung der Messabweichung festlegen. Die Kenngrößen der Prüfprozesseignung sind in Abbildung 2-2 zusammengefasst.

	Definition	Beschreibung
Auflösung	Die <b>absolute Auflösung</b> , auch als Ansprechschwelle (Discriminator) bezeichnet, ist der kleinste Wert der Änderung des zu messenden Merkmals, die das Messsystem noch eindeutig erfassen kann. Die <b>relative Auflösung</b> stellt den Zusammenhang zwischen absoluter Auflösung und der Toleranz des zu messenden Merkmals her.	Relative Auflösung =  $= \frac{\text{absolute Auflösung}}{\text{Toleranz des zu messenden Merkmals}} * 100\%$
Genauigkeit	Unter <b>Genauigkeit</b> wird die Abweichung zwischen dem Mittelwert der Anzeige des Messsystems unter Wiederholbedingungen und dem wahren Wert des Merkmals verstanden. Die Genauigkeit entspricht weitgehend der systematischen Messabweichung.	
Wiederholpräzision	Die <b>Wiederholpräzision</b> (Repeatability), auch als Standardunsicherheit oder früher als Wiederholbarkeit bezeichnet, ist die empirische Standardabweichung (experimental standard deviation) s_g der Messwerte unter Wiederholbedingungen. Sie repräsentiert die zufälligen Messabweichungen und ist ein Maß für die Streuung des Messsystems.	$s_g = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_g)^2}$ 
Vergleichspräzision	Die <b>Vergleichspräzision</b> (Reproducibility) oder früher auch als Nachvollziehbarkeit oder Vergleichbarkeit bezeichnet, ist die Spannweite der Mittelwerte der Messreihen eines identischen Merkmals, jedoch von verschiedenen Prüfern, an verschiedenen Standorten oder mit verschiedenen Messsystemen ermittelt.	
Stabilität	Die <b>Stabilität</b> (Stability), auch als Drift bezeichnet, ist die Spannweite der Mittelwerte der Messreihen eines identischen Merkmals derselben Einheit mit demselben Messsystem und durch denselben Prüfer, jedoch über einen ausgedehnten Zeitraum ermittelt. Die Stabilität ist die Wiederholpräzision über die Zeit.	
Linearität	Die <b>Linearität</b> (Linearity) ist ein Maß der Konstanz der systematischen Messabweichungen über den Messbereich. Die Linearität ist die Genauigkeit über den Messbereich.	

Abbildung 2-2: Kenngrößen der Prüfprozesseignung [MSA 2002; DIN 1319-1 bis 4 1995; Dietrich 1998a; Linß 2005]

Zu unterscheiden ist die Vorgehensweise im gesetzlichen Messwesen und in der industriellen Praxis. Obwohl die Intention beider Entwicklungsrichtungen die Vergleichbarkeit der Messergebnisse bei der Beurteilung der Übereinstimmung mit Sollvorgaben ist, haben sich unterschiedliche mathematische Modelle zur Berechnung entwickelt. Repräsentativ für industriellen Verfahren sind die QS 9000/MSA [MSA 2002] und der VDA Band 5 [VDA 5 2003] sowie im gesetzlichen Messwesen der „Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)“ [DIN V ENV 13005 1999]. In Tabelle 2-2 sind die genannten Verfahren gegenübergestellt.

Tabelle 2-2: Stand der Technik bei der Prüfprozesseignung [Linß 2005b]

	bestehende Verfahren ! sowie QS 9000/MSA!	VDA 5!!	GUM!
Auflösung	Auflösung (%) ≤ 5% !! der Toleranz !!	1. Auflösung (%) ≤ 5% und ! 2. $u_{Aufl} = 0,5$ (0,6*Auflösung) ! $u_{Aufl}$ - Unsicherheit der Auflösung !	$u_{Aufl} = \frac{\delta x}{\sqrt{12}}$ mit $\delta x$ -Auflösung !
Kalibrierunsicherheit	nicht berücksichtigt !	$u_{kal} = \frac{U_{kal}}{k_{kal}}$ ! $U_{kal}$ - erweiterte Kalibrierunsicherheit !!	$u_{kal} = \frac{U_{kal}}{k_{kal}}$ ! $k_{kal}$ -Kalibriererweiterungsfaktor !!
Wiederholpräzision (ohne Bedienerinfluss)	$C_g = \frac{0,2 \cdot T}{6s_g}$ oder ! $C_g = \frac{0,15 \cdot s_p}{6s_g}$ ! (99,73 % Vertrauensniveau) ! $s_p$ !! Prozessstandardabweichung !! $s_g$ !! empirische Standardabweichung der Einzelwerte ! $T$ ! Toleranz !	<u>Methode A:</u> ! $n^* = 1$ : $u(x_A) = s_n = u_w$ ! ! $n^* > 1$ : $u(x_A) = s_{\bar{x}} = s_n / \sqrt{n^*}$ ! <u>Methode B:</u> ! $u(x_B) = U / k$ mit $k=2$ (95% VN) ! ! $u(x_B) = a \cdot b$ ! $u(x_i)$ - Standardunsicherheit nach Methode !! ! $i = A$ oder $B$ ! $a$ !! Fehlergrenzwert ! $b$ !! Verteilungsfaktor ! $n$ !! Anzahl der Messungen am Referenzteil !! $n^*$ !! Anzahl Messungen zur Ermittlung eines ! ! Messergebnisses im Fertigungsprozess !	<u>Methode A:</u> ! $n^* = 1$ : $u(x_j) = s_n$ !  $n^* > 1$ : $u(\bar{x}_i) = \frac{u(x_i)}{\sqrt{n^*}}$ ! <u>Methode B:</u> $u(x_B) = a \cdot b$ ! $u(x_i)$ - Messunsicherheit der Einflussfaktoren $x_i$ ! $u(\bar{x}_i)$ - Unsicherheit des Mittelwertes aller Stichproben !
	Bedingung: ! 1 Bediener führt 25 Messungen an einem Referenzteil durch (kein Referenzwert notwendig) !	Bedingung: ! 1 Bediener führt an einem Referenzteil in einer definierten Messebene 25 Messungen durch !	Bedingung: ! Forderung nach ausreichender Anzahl von Messungen !
	Berechnungsbasis: ! $s_g$ !! empirische Standardabweichung der Einzelwerte ! $T$ ! Toleranz !	Berechnungsbasis: ! $s_n$ !! Standardabweichung der Einzelwerte ! ! ermittelt in einer definierten Messebene ! $s_{\bar{x}_i}$ !! Standardabweichung der Mittelwerte ! ! aus Mehrfachmessungen !	Berechnungsbasis: ! $s_n$ !! Standardabweichung der Einzelwerte !! $s_{\bar{x}_i}$ !! Standardabweichung der Mittelwerte aus Mehrfachmessungen im Fertigungsprozess !
Genauigkeit	$C_{gk} = \frac{0,1 \cdot T - (\bar{x}_g - x_M)}{3s_g}$ ! $\bar{x}_g$ !! Mittelwert der Einzelwerte ! $x_M$ !! Referenzwert !	$u_{sys} = 0,60 [Max\{e_{s_i}\}]$ mit $e_{s_i} = \{ \bar{x}_i - x_{mi} \}$ ! ! $\bar{x}_i$ !! - Mittelwert der Einzelwerte ! $x_{mi}$ !! - Referenzwert ! $u_{sys}$ !! - systematischer Anteil der Unsicherheit ! !	Die unbekannt systematischen Abweichungen besitzen zufälligen Charakter und werden geometrisch addiert (Fehlerfortpflanzungsgesetz). Ermittelt werden diese durch Ringversuche. !!
	Bedingung: ! 1 Bediener führt 25 Messungen an einem Referenzteil durch !!	Bedingung: ! 1 Bediener misst drei Referenzteile je 10 mal oben, in der Mitte und unten im Toleranzbereich (Referenzwert notwendig) !	Bedingung: ! keine Angabe !

<p>Wiederholpräzision mit Bedienerinfluss...</p>	<p><math>EV = K_1 \bar{R} !!</math> ! <math>EV \neq !!</math> Wiederholpräzision! <math>\bar{R} \neq !!</math> Mittelwert der mittleren Spannweiten! <math>K_1 \neq !! 0,8862!</math></p>	<p><math>u_{MM} = \frac{1}{K_1} \cdot \bar{R} !</math>  <math>u_{MM} \neq !!</math> Unsicherheit des Messmittels! <math>K_1 \neq !!</math> Faktor ist abhängig von Anzahl der! ! Prüfer, Teile- g und Wiederholungen-! ! <math>m ( K_1 = 1,128 \text{ für } g=10, m=2 \text{ mit } 3!</math> ! Prüfern für <math>g \cdot \text{Prüfer} = 30 &gt; 15!</math> <math>\bar{R} \neq !!</math> Mittelwert der mittleren Spannweiten!</p>	<p>Die Wiederholbarkeit kann durch! Streuungswerte der Ergebnisse! aufgezeigt werden. Die Vorgehensweise wird nicht beschrieben. !</p>
<p>Vergleichspräzision (Bedienerinfluss)...</p>	<p><math>AV = \sqrt{(\bar{x}_{Diff} K_2)^2 - (EV)^2 / (nr)} !!</math> <math>AV \neq !!</math> Vergleichspräzision! <math>\bar{x}_{Diff}</math> Spannweite der !! ! Mittelwerte! <math>n \neq !!</math> Anzahl der Mess-! ! werte pro Reihe! <math>r \neq !!</math> Anzahl der Messrei- ! hen pro Bediener! <math>EV \neq !!</math> Wiederholpräzision! <math>K_2 \neq !! 0,5231!</math></p>	<p>1. Mögl.: <math>u_{Bed} = R_{max} / (2 \cdot b)!</math> 2. Mögl.: <math>u_{AV} = K_2 \bar{x}_{Diff} !!</math> 3. Mögl.: <math>u_{Bed} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\bar{x}_j - \bar{x})^2}</math> ! <math>u_{Bed} = s_{Bed} = s_{\bar{x}_j} !!</math>  <math>u_{Bed} \neq !!</math> Unsicherheit durch Bedienerinfluss! <math>R_{max} \neq !!</math> größte Spannweite zwischen den Mittel- ! werten der 3 Messreihen der Bediener! <math>\bar{x}_{Diff}</math> - Spannweite der Mittelwerte !</p>	<p>Mit der Methode der Varianzanalyse werden die Messreihen mit! einander verglichen. Diese Mess- werte werden durch Ringversuche! ermittelt!  <math>H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n !</math>  <math>H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_n !</math></p>
<p>Bedingung:!</p>	<p>3 Bediener messen 10! Serierteile oben, in der! Mitte und unten im Tole- ranzbereich je 2-mal !</p>	<p>Bedingung:! 1. Mögl.:! 10 Werte von 3 Bedienern! 2./3. Mögl.:! Bediener messen ein Referenz ! teil jeweils 20 mal; Ermittlung der! ! Standardabweichung aus den !! ! Messwerten!</p>	<p>Bedingung:! ausreichend große Anzahl von! Messwerten, keine weiteren An- gaben!</p>
<p>Berechnungsbasis:!</p>	<p><math>\bar{x}_{Diff}</math> durchschnittliche! ! Differenz zwischen! ! den Mittelwerten der! ! Bediener!</p>	<p>Berechnungsbasis:! <math>s_{Bed} = u_{Bed} !!</math> <math>s_{Bed} \neq !!</math> Standardabweichung der Mittelwerte! ! der Bediener!</p>	<p>Berechnungsbasis:! <math>s_{Bed} = u_{Bed} !!</math> <math>s_{Bed} \neq !!</math> Standardabweichung der! Mittelwerte der Bediener!</p>
<p>Objektinfluss...</p>	<p>indirekt im <math>GRR</math>-Wert!! mit! 10 Serienteilen berücksich- tigt! !</p>	<p><math>u_{objekt} = \frac{s_{obj}}{\sqrt{n}} !!</math>  mit: <math>s_{obj} = \sqrt{s^2 - s_n^2} !</math></p>	<p>Mit der Varianzanalyse werden die Messreihen verglichen. Diese Messwerte werden durch Ringver- suche ermittelt.  <math>H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n</math>  <math>H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_n</math></p>
<p>Bedingung:!</p>	<p>3 Bediener messen 10! Serierteile oben, in der! Mitte und unten im Tole- ranzbereich je 2-mal !</p>	<p>Bedingung:! 3 Bediener messen 10 Serienteile (oben, in! der Mitte und unten im Toleranzbereich) je 2- mal !</p>	<p>Bedingung:! keine Angaben!</p>
<p>Berechnungsbasis:!</p>	<p><math>\bar{R} = !</math> Mittelwert der mittlere- ren Spannweiten!</p>	<p>Berechnungsbasis:! <math>s_{obj} = \sqrt{s^2 - s_n^2} !</math>  <math>s_n \neq !!</math> Standardabweichung der Einzelwerte in! einer definierten Messeben oder an einem! idealen Körper (Maßverkörperung)!! <math>s \neq !!</math> Standardabweichung der Einzelwerte! inklusive Formabweichungen der Messobjekte!</p>	<p>Berechnungsbasis:! <math>s_n \neq !!</math> Standardabweichung der! Einzelwerte!! <math>s_{\bar{x}_j} \neq !!</math> Standardabweichung der! Mittelwerte aus Mehrfachmessun- gen im Fertigungsprozess !</p>
<p>Umgebungs- einflüsse...</p>	<p>Kurzfristige Umweltein- flüsse werden indirekt im! <math>C_g, C_{gk}</math>!! sowie dem <math>GRR</math>- Wert berücksichtigt!</p>	<p><math>u_{Temp} = \text{Tabellenwert}[u_1] \cdot \frac{\text{Pr üfmaß}}{100}</math> und <math>u_{Temp} = 0,6 \cdot a</math>  <math>a =  \Delta L  + 2u_{rest} !</math> <math>\Delta L</math>!! Längenänderung zur effektiven Länge! <math>u_{rest}</math>!! die Unsicherheiten der Ausdehnungs- ! koeffizienten und Temperaturen!!</p>	<p>!  <math>u(\mu_t) = a \cdot b !</math></p>

<p>Kriterium Prüfmittel</p>	<p><math>c_g \geq 1,33</math>!  <math>c_{gk} \geq 1,33</math>!                  → Prüfmittel fähig!</p>	<p><math>u_{PM} = \sqrt{u(x_{A/B})^2 + u_{sys}^2 + u_{kal}^2 + u_{Auf}^2}</math> !  <math>G_{pp} \geq \frac{6u_{PM}}{T}</math> → Prüfmittel geeignet!  <math>G_{pp}</math> !! Grenzwert des Eignungskennwertes!                  ! des Prüfprozess (je nach Toleranz-                  ! klasse DIN 287 von 0,2-0,4)!  <math>u_{PM}</math> !! Standardunsicherheit des Prüfmittels!</p>	<p>Es erfolgt keine getrennte Bewertung des Prüfmittels, es wird eine Gesamtbewertung vorgenommen.!</p>
<p>Kriterium Prozess</p>	<p><math>GRR = \sqrt{AV^2 + EV^2}</math> !</p>	<p><math>u_{pp} = \sqrt{u_{temp}^2 + u_{Bed}^2 + u_{objekt}^2 + u_{MM}^2}</math> !!</p>	<p>Es erfolgt keine getrennte Bewertung des Prozesses, es wird eine Gesamtbewertung vorgenommen.!</p>
<p>Zusammenfassung der Kriterien (Prüfprozess und Prüfmittel)</p>	<p><math>c_g \geq 1,33</math>!  <math>c_{gk} \geq 1,33</math>!                  und!                  %GRR &lt;10 % für neue Messsysteme!                  %GRR ≤ 30 % für im Einsatz befindliche Messgeräte!                  → Prüfmittel und!                  ! Prüfprozess fähig!</p>	<p><math>u(y) = \sqrt{u_{PM}^2 + u_{PP}^2}</math> !  <math>U = k \cdot (u(y))</math>!  <math>g_{pp} = \frac{2U}{T} \leq 0,2 \dots 0,4</math> → Prüfprozess geeignet!  <math>u_{pp}</math> !! Unsicherheit des Prüfprozesses!  <math>g_{pp}</math> !! Eignungskennwert Prüfprozess !!  <math>u(y)</math> !- kombinierte Standardunsicherheit!  <math>U</math> !! erweiterte Unsicherheit!!  <math>k</math> !- !! Erweiterungsfaktor (z. B. <math>k=2</math> für ein!                  ! 95% Vertrauensniveau)!</p>	<p><math>u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^N c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i; x_j)</math>                  mit <math>r(x_i; x_j) = \frac{u(x_i; x_j)}{u(x_i)u(x_j)}</math> !!  <math>c_j = \frac{\delta f}{\delta x_j}</math> !  <math>u(x_i, x_j)</math> !- Kovarianz!  <math>r(x_i, x_j)</math> !- Korrelationskoeffizient!  <math>c_i</math> - !! Sensitivitätskoeffizienten!                  Für <math>r=0</math> und <math>\rho \neq 1</math> ergibt sich wie!                  nach VDA 5: <math>u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u(x_i)^2}</math> und !!  <math>U = k \cdot (u_c(y))</math>!</p>

Während die Berechnung der Prüfprozesseignung nach GUM einem wissenschaftlich-technischen Anspruch genügt, jedoch dem Anwender in mancher Hinsicht Interpretationsmöglichkeiten offen lässt, gehen die QS 9000/MSA und der VDA Band 5 einen praktisch-empirischen Weg, der durch eine detaillierte Vorgehensweise festgelegt ist. Alle drei Verfahren ermitteln einen Schätzwert für Messabweichungen zu deren Berechnung die Streuungsgröße (Standardabweichung oder Spannweite) einer Messreihe verwendet wird. Nach GUM und VDA ist zusätzlich die Möglichkeit der Abschätzung (Methode B) gegeben. Dies wäre auch für die in der industriellen Praxis nach wie vor dominierte Vorgehensweise nach QS 9000/MSA wünschenswert, da dabei Erfahrungswissen eingebracht und der Aufwand bei der empirischen Untersuchung reduziert werden könnte.

## 2.1.2 Fähigkeit des Montageprozesses

Zur Analyse und Bewertung des Qualitätsverhaltens von Montageprozessen werden Methoden der statistischen Qualitätsbewertung herangezogen. Durch Stichprobeninformationen versucht man Aussagen über das Verteilungsverhalten des Montageprozesses zu gewinnen. Abbildung 2-3 zeigt den allgemeinen Ablauf der statistischen Analyse und Bewertung von (Montage-) Prozessen.

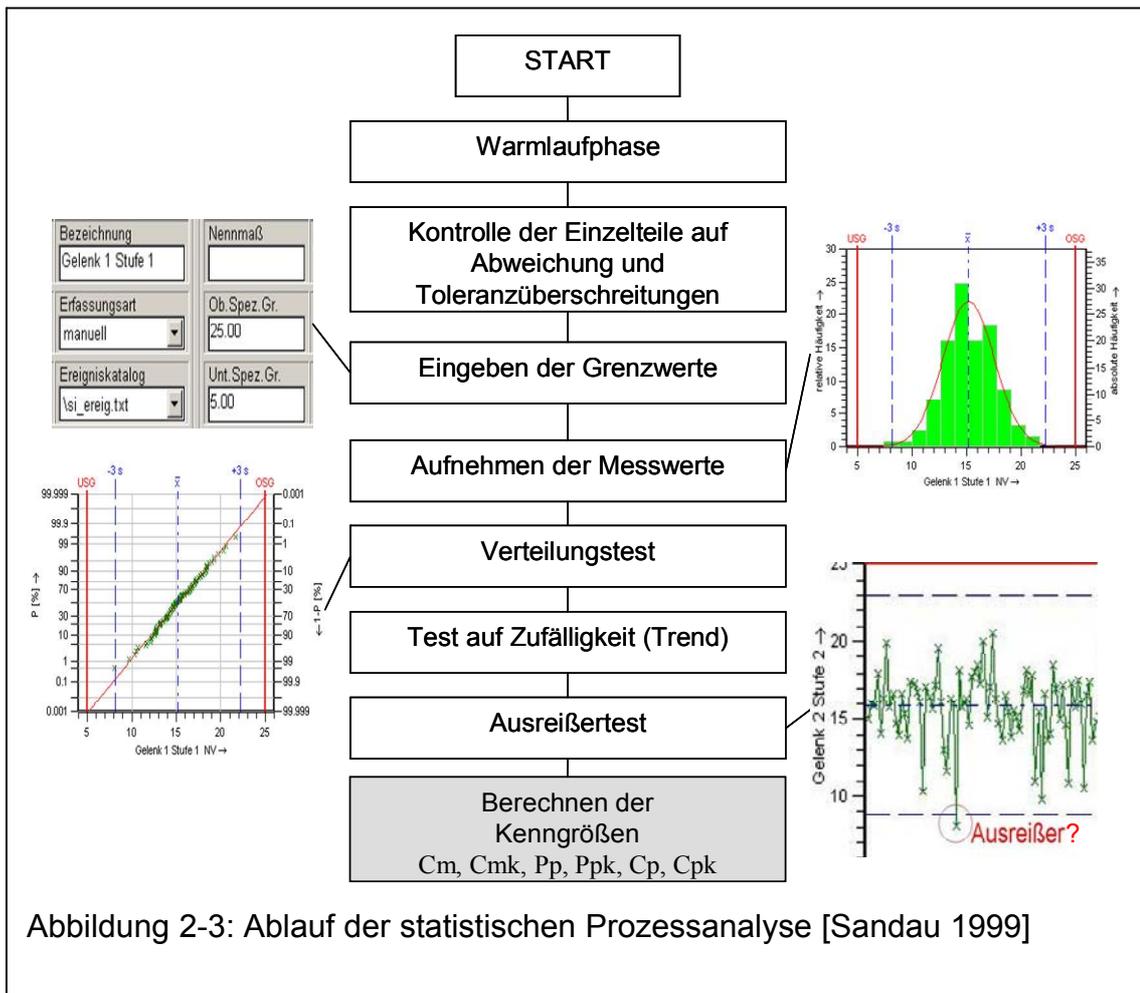


Abbildung 2-3: Ablauf der statistischen Prozessanalyse [Sandau 1999]

Ergebnisse der Untersuchung sind die kurzfristige Maschinenfähigkeit ( $C_m$ ,  $C_{mk}$ ), die vorläufige ( $P_p$ ,  $P_{pk}$ ) und die langfristige ( $C_p$ ,  $C_{pk}$ ) Prozessfähigkeit. Die Maschinenfähigkeit ist ein Maß für die kurzzeitige Merkmalsstreuung, die von der Maschine ausgeht. Die Prozessfähigkeit gibt Aufschluss über das Langzeitverhalten des Gesamtsystems unter den herrschenden Rahmenbedingungen (Mensch, Maschine, Methode, Arbeitsumgebung) [Linß 2002]. Die Maschinenfähigkeit und die vorläufige Prozessfähigkeit dienen der Beurteilung vor Serienanlauf. Für die Maschinenfähigkeit wird ein Stichprobenumfang von 50 Werkstücken, für die vorläufige Prozessfähigkeit von 125 Werkstücken vorgeschlagen. Die Langzeit-Prozessfähigkeit dient der Prozessanalyse über einen

großen Betrachtungszeitraum. Linß schlägt hierzu 20 Tage vor [Linß 2002, S. 340]. Abbildung 2-4 verdeutlicht den Zusammenhang [Dietrich 1998a].

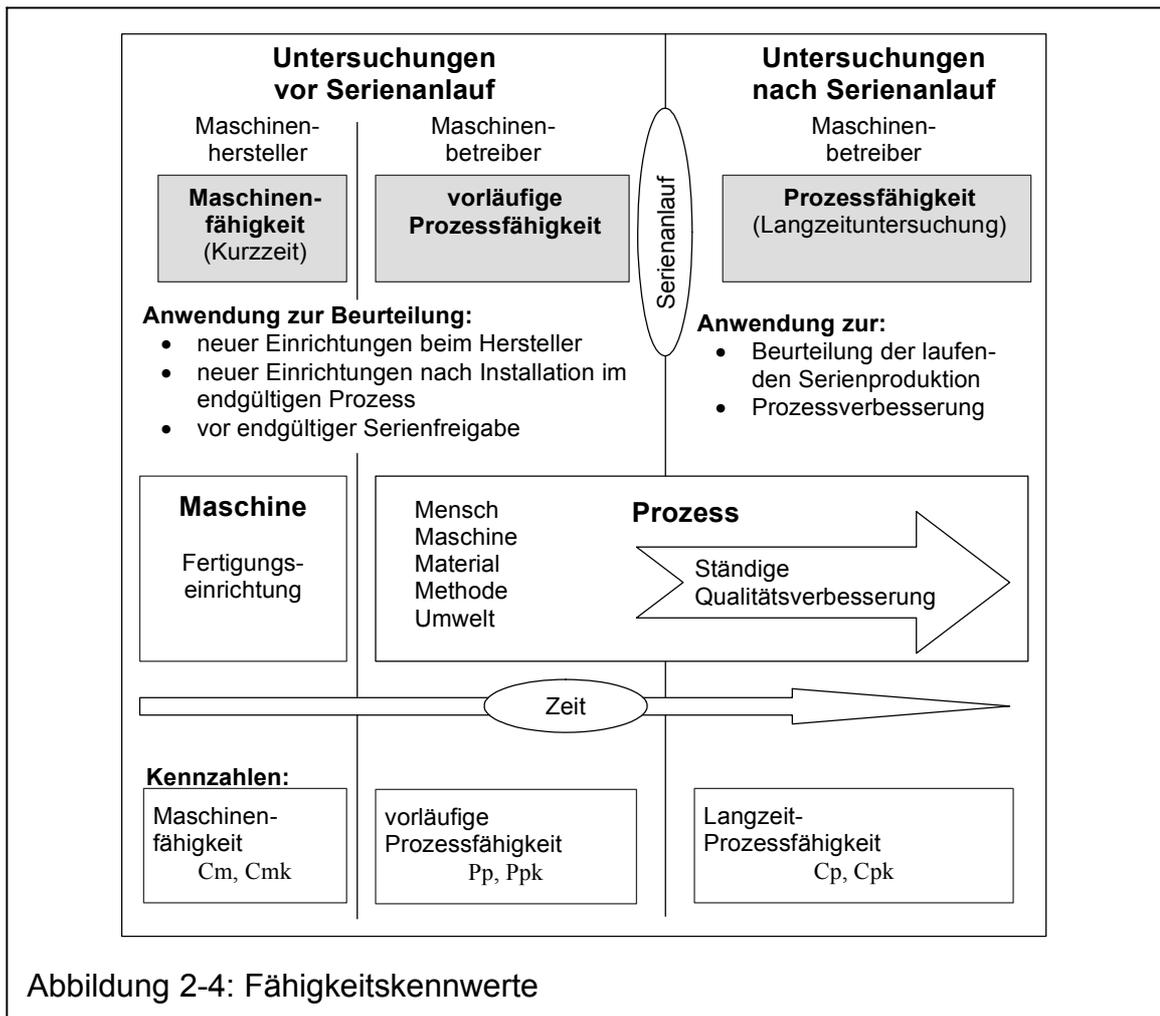


Abbildung 2-4: Fähigkeitskennwerte

Bei der Fähigkeitsbeurteilung wird zunächst die potenzielle Fähigkeit definiert. Diese kennzeichnet die Fähigkeit einer Maschine oder eines Prozesses, Merkmale zu realisieren, deren Häufigkeitsverteilung innerhalb der geforderten Toleranz liegt. Das Potenzial wird durch das Verhältnis von Toleranz (T) und Streubreite (z. B. Standardabweichung) gebildet. Kennzahlen für das Potenzial sind:

- $C_m$  – Maschinenpotenzial,
- $P_p$  – vorläufiges Prozesspotenzial und
- $C_p$  – Langzeit-Prozesspotenzial.

Zur Beurteilung der Fähigkeit muss zusätzlich die Lage des Mittelwertes der produzierten Merkmalsverteilung berücksichtigt werden. Dazu werden Kennwerte der kritischen Fähigkeit definiert:

- $C_{mk}$  – Kritische Maschinenfähigkeit,
- $P_{pk}$  – kritische vorläufige Prozessfähigkeit und
- $C_{pk}$  – kritische Langzeit-Prozessfähigkeit. [Linß 2002, S. 343]

Bei der Berechnung der Fähigkeitskennwerte müssen normalverteilte von nicht normalverteilten Merkmalswerten unterschieden werden.

Nach dem zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung nähert sich die Verteilung einer Zufallsgröße einer Normalverteilung an, wenn mehrere Einflussgrößen ohne dominierenden Faktor wirken. Dies ist für ungestörte Montageprozesse mit symmetrischer Merkmalsausprägung der Fall. Für die Anwendung ist deshalb die Normalverteilung die dominierende Verteilungsform.

Tabelle 2-3: Berechnung für normalverteilte Merkmalswerte [Linß 2002]

Potenzial	Fähigkeit
<p>Prozessmittelwert <math>\hat{\mu}</math></p> <p>99,73%</p> <p><math>\hat{\sigma}</math></p> <p><math>6\hat{\sigma}</math>-Streubereich</p> <p>Toleranzbreite T</p>	<p>Sollwert</p> <p><math>Z_{krit}</math></p> <p><math>\hat{\mu}</math></p> <p><math>6\hat{\sigma}</math>-Streubereich</p> <p>Toleranzbreite T</p> <p>UGW</p> <p>OGW</p>
$C_m, P_p, C_p = \frac{OGW - UGW}{6 \cdot \hat{\sigma}}$	$C_{mk}, P_{pk}, C_{pk} = \min \left\{ \frac{OGW - \hat{\mu}}{3 \cdot \hat{\sigma}}, \frac{\hat{\mu} - UGW}{3 \cdot \hat{\sigma}} \right\}$

mit:

$\hat{\mu} = \bar{\bar{x}} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \bar{x}_j$	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
$\hat{\sigma} = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k s_j^2}$	$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$
<p><math>\hat{\mu}</math> Schätzwert für den Prozessmittelwert</p> <p><math>\hat{\sigma}</math> Schätzwert für die Prozess-Standardabweichung</p> <p><math>\bar{x}</math> Mittelwert der Stichprobe</p> <p>S Standardabweichung der Stichprobe</p> <p>k Anzahl der Stichproben</p> <p><math>\bar{\bar{x}}</math> Mittelwert der Stichprobenmittelwerte</p>	

Merkmale mit asymmetrischer Merkmalsausprägung sind nicht normalverteilt. Dazu zählen null-begrenzte Merkmale, wie z. B. Form- und Lageabweichungen. Das Entstehungsgesetz dieser Merkmale führt zu logarithmischen Verteilungen oder zur der Betragsverteilung erster und zweiter Art (Abbildung 2-5).

Merkmal		Verteilungsfunktion
Symbol	Eigenschaft	
Formabweichungen		
—	Geradheit	Betragsverteilung 1. Art
	Ebenheit	Betragsverteilung 1. Art
	Rundheit	Betragsverteilung 1. Art
	Zylinderform	Betragsverteilung 1. Art
	Linienform	Betragsverteilung 1. Art
	Flächenform	Betragsverteilung 1. Art
Lageabweichungen		
//	Parallelität	Betragsverteilung 1. Art
	Rechtwinkligkeit	Betragsverteilung 1. Art
	Neigung (Winkeligkeit)	Betragsverteilung 1. Art
	Position	Betragsverteilung 2. Art
	Konzentrizität	Betragsverteilung 2. Art
	Symmetrie	Betragsverteilung 1. Art
	Rundlauf	Betragsverteilung 1./2. Art
	Gesamtlauf, Planlauf	Betragsverteilung 1. Art
Rauheit		Betragsverteilung 1. Art
Unwucht		Betragsverteilung 2. Art
Drehmoment		Normalverteilung
Längenabweichungen		Normalverteilung

Abbildung 2-5: Verteilungsfunktionen für nicht normalverteilte Merkmale [Dietrich 2003, S. 129]

Für nicht normalverteilte Merkmalswerte erfolgt die Berechnung des Potentials und der Fähigkeit nach der Prozentanteilmethode (Tabelle 2-4). Diese Form der Berechnung ist für beliebige Verteilungsmodelle anwendbar [Linß 2002, S. 346].

Tabelle 2-4: Berechnung für nicht normalverteilte Merkmalswerte nach der Prozentanteilmethode [Dietrich 1998a; Linß 2002]

Potenzial	Fähigkeit
$C_m, P_p, C_p = \frac{OGW - UGW}{o_p - u_p}$	$C_{mk}, P_{pk}, C_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{OGW - \hat{\mu}}{o_p - \hat{\mu}}, \frac{\hat{\mu} - UGW}{\hat{\mu} - u_p} \right\}$
oder	
$C_m, P_p, C_p = \frac{OGW - UGW}{x_{\max} - x_{\min}}$	$C_{mk}, P_{pk}, C_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{OGW - \hat{\mu}}{x_{\max} - \hat{\mu}}, \frac{\hat{\mu} - UGW}{\hat{\mu} - x_{\min}} \right\}$

Die beschriebenen Verteilungsformen gelten für stabile Montageprozesse. In der Praxis wirken allerdings eine Vielzahl von Einflussfaktoren, die das Verteilungsverhalten der Prozesse beeinflussen. In der DIN 55319 wird das Verteilungsverhalten realer Prozesse systematisiert [DIN 55319 2000]. Auf Basis dieser Gliederung schlägt Dietrich neben der Normalverteilung und logarithmischen Normalverteilung die Anwendung der Mischverteilung vor. Allerdings erfolgt die Auswertung auch hier nach der Prozentpunktmethode [Dietrich 2003]. Bei der Analyse des Fehlerpotenzials von automatisierten Montage- und Prüfsystemen in Kapitel 3 dieser Arbeit wird der gestörte Montage- und Prüfprozess noch einmal aufgegriffen und diskutiert.

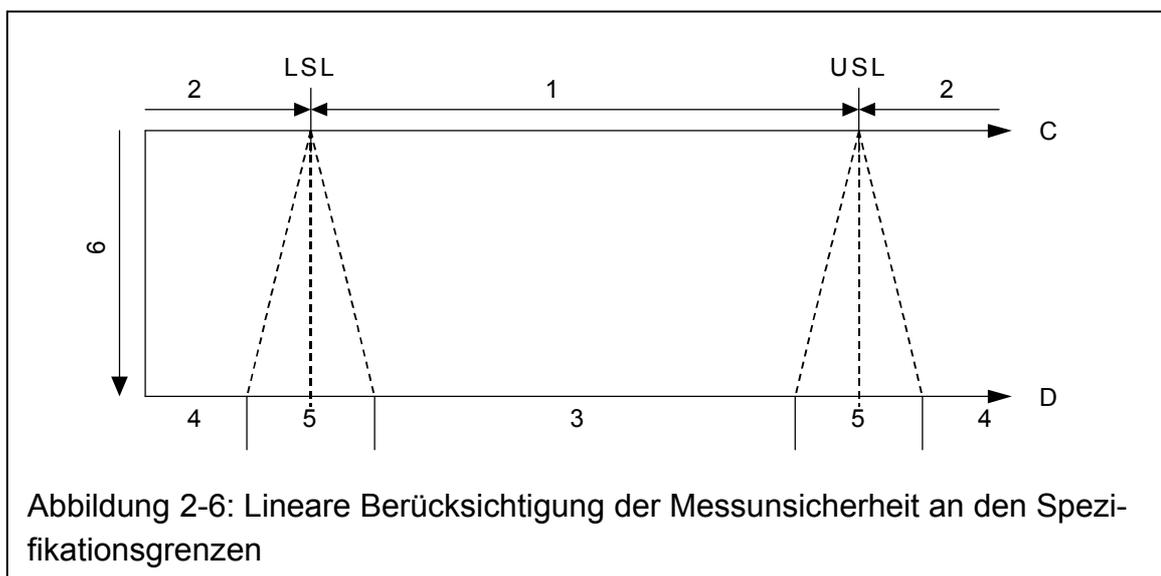
Unabhängig von der Verteilungsform und der gewählten Auswertemethode gelten für die Bewertung der untersuchten Prozesse folgende Mindestanforderungen.

Tabelle 2-5: Mindestanforderungen für die Bewertung [Linß 2002, S. 348f]

Potenzial	Fähigkeit	empfohlener Analyseumfang
$C_m \geq 2,0$	$C_{mk} \geq 1,67$	50 Teile
$P_p \geq 1,67$	$P_{pk} \geq 1,33$	125 Teile
$C_p \geq 1,33$	$C_{pk} \geq 1,0$	20 Tage

### 2.1.3 Berücksichtigung der Messunsicherheit

In der DIN EN ISO 14253-1 wird die Einschränkung einer sicheren Qualitätseinstufung von Werkstücken durch die Wirkung der Messunsicherheit bewertet. Die Norm legt Entscheidungsregeln für die Feststellung der Übereinstimmung und Nichtübereinstimmung von Produktmerkmalen mit der Spezifikation fest [DIN EN ISO 14253-1 1999]. Nach Berndt kann die Berücksichtigung an den Spezifikationsgrenzen linear oder quadratisch erfolgen [Berndt 1968]. Bei der linearen Berücksichtigung wird zur Bestimmung des Übereinstimmungsbereiches die doppelte erweiterte Messunsicherheit ( $U$ ) vom Spezifikationsbereich abgezogen (Abbildung 2-6). Hieraus resultiert eine starke Toleranzverkleinerung, die bei kleinen Werkstücktoleranzen ( $< 0,005$  mm [Linß 2005, S. 170]) zu nahezu unlösbaren technischen und wirtschaftlichen Problemen führen kann.

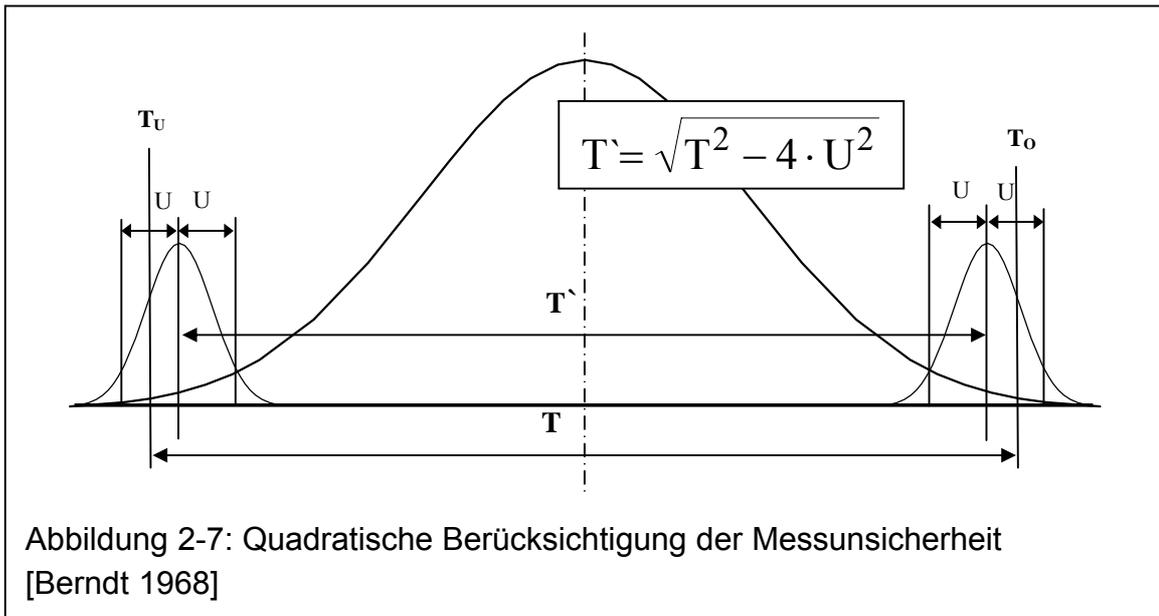


Legende:

C	Konstruktions- /Spezifikationsphase	D	Verifikationsphase
1	Spezifikationsbereich	2	außerhalb der Spezifikation
3	Übereinstimmungsbereich	4	Nichtübereinstimmungsbereich
5	Unsicherheitsbereich	6	wachsende Messunsicherheit $U$
LSL	untere Spezifikationsgrenze	USL	obere Spezifikationsgrenze

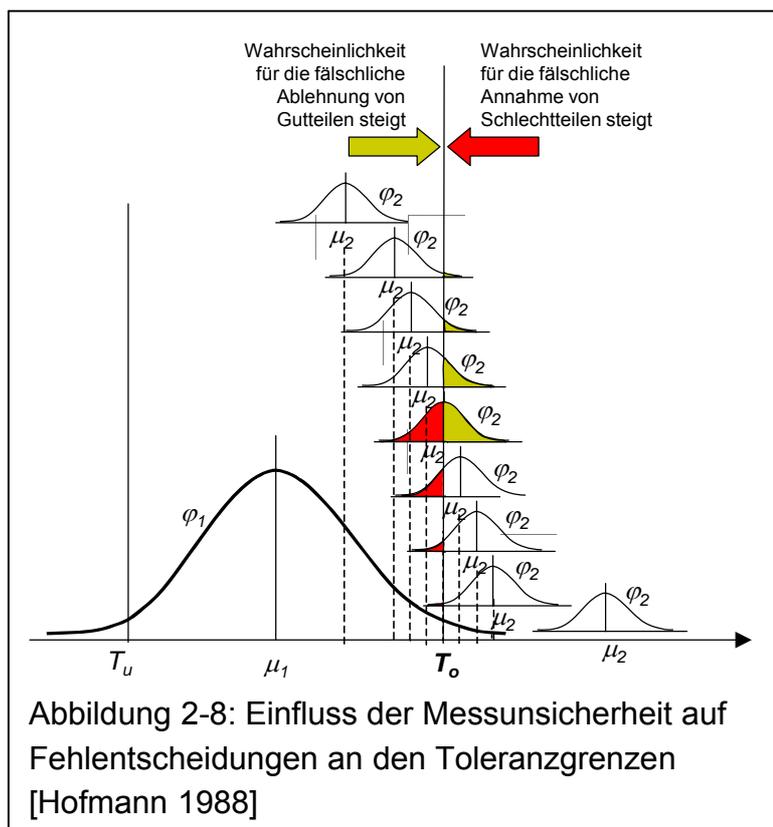
Bei der quadratischen Berücksichtigung der Messunsicherheit wird zur Bestimmung des Übereinstimmungsbereiches ( $T'$ ) die doppelte erweiterte Messunsicherheit ( $U$ ) quadratisch von der Spezifikationstoleranz ( $T$ ) subtrahiert (Abbildung 2-7). Dadurch bleibt eine etwas größere Toleranz zum Produzieren (Produktionstoleranz) als bei der linearen Berücksichtigung.

Dem Vorteil der größeren Produktionstoleranz steht der Nachteil eines höheren Überschreitungsanteils und damit das höhere Risiko der Fehlentscheidung an den Spezifikationsgrenzen gegenüber.



In Abbildung 2-8 ist dieser Zusammenhang graphisch dargestellt [Hofmann 1988]. Die Prozessverteilung wird mit den Parametern  $\mu_1$  und  $\phi_1$  angegeben, die Messabweichung mit den Parametern  $\mu_2$  und  $\phi_2$ . Wird nun ein Merkmal des Prozesses mit einem Messgerät das diese Messabweichung aufweist beurteilt, so ist die Wahrscheinlichkeit einer Fehlentscheidung um so größer, je näher das Merkmal an der Toleranzgrenze ist.

Liegt das Merkmal exakt auf der Toleranzgrenze, so ist die Wahrscheinlichkeit einer Bewertung innerhalb der Toleranz (Gutteil) genau so groß wie die Wahrscheinlichkeit der Bewertung außerhalb der Toleranz (Schlechtteil).



Dies wird in Abbildung 2-8 durch die fünfte Wahrscheinlichkeitsdichte von oben dargestellt. Links von der Toleranzgrenze besteht die Möglichkeit ein Gutteil als schlecht zu bewerten, während rechts davon ein Schlechtteil fälschlicherweise angenommen werden kann.

Zur exakten Berechnung der Anteile fälschlicherweise abgelehnter Gutteile und fälschlicherweise angenommener Schlechttteile sind Faltungsintegrale über eine zweidimensionale Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zu lösen. Dabei wird beispielsweise von einer normalverteilten Wahrscheinlichkeitsdichte sowohl für die Prozessabweichung  $x_1$  als auch für die Messabweichung  $x_2$  ausgegangen [Linß 2005, S. 172]. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung 2.2 und wird in Abbildung 2-9 für die Parameter  $\mu_1 = 0$ ,  $\sigma_1 = 1$  und  $\mu_2 = 0$  und  $\sigma_2 = 0,2$  graphisch dargestellt.

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2} \exp\left(-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(x_2 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (2.2)$$

Es werden folgende Fälle hinsichtlich der Annahme bzw. Ablehnung der geprüften Teile unterschieden:

1. Fall: Schlechttteil fälschlich angenommen
2. Fall: Gutteil fälschlich abgelehnt
3. Fall: Gutteil richtig angenommen
4. Fall: Schlechttteil richtig abgelehnt

Für die beiden ersten Fälle, bei denen es sich um Fehlentscheidungen handelt, müssen Fehleranteile bestimmt werden, die zur Ermittlung der Fehlerkosten notwendig sind. Die Fehleranteile berechnen sich durch die zweidimensionale Faltungsintegration der Produktionsabweichungen  $\varphi_1$  und der Messabweichungen  $\varphi_2$ :

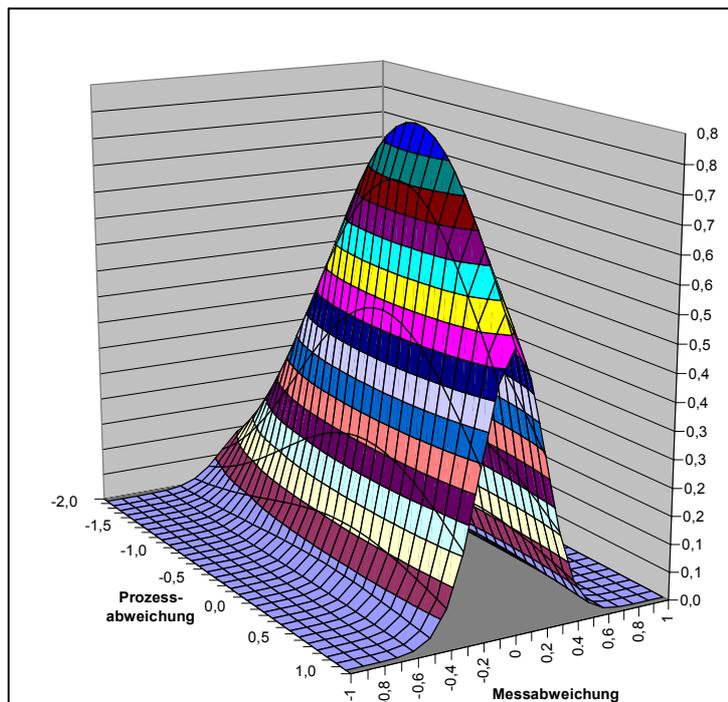


Abbildung 2-9: Zweidimensionale Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Prozess- und Messabweichung [Linß 2005]

Die Fehleranteile berechnen sich durch die zweidimensionale Faltungsintegration der Produktionsabweichungen  $\varphi_1$  und der Messabweichungen  $\varphi_2$ :

### 1. Fall: Schlechttteil fälschlich angenommen

$$P_{an,j} = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2} \left[ \int_{T_o}^{\infty} \int_{T_u}^{T_o} \exp\left(-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(x_2 - x_1 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) dx_2 dx_1 + \int_{T_u}^{T_u} \int_{-\infty}^{T_o} \exp\left(-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(x_2 - x_1 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) dx_2 dx_1 \right] \quad (2.3)$$

## 2. Fall: Gutteil fälschlich abgelehnt

$$P_{ab,j} = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2} \left[ \int_{T_u}^{T_o} \int_{T_o}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(x_2 - x_1 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) dx_2 dx_1 + \int_{T_u}^{T_o} \int_{-\infty}^{T_u} \exp\left(-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(x_2 - x_1 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) dx_2 dx_1 \right] \quad (2.4)$$

## 3. Fall: Gutteil richtig angenommen

Der Anteil der richtig angenommenen Gutteile  $P_{an}$  berechnet sich zu:

$$P_{an} = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2} \int_{T_u}^{T_o} \int_{T_u}^{T_o} \exp\left(-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(x_2 - x_1 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) dx_2 dx_1 \quad (2.5)$$

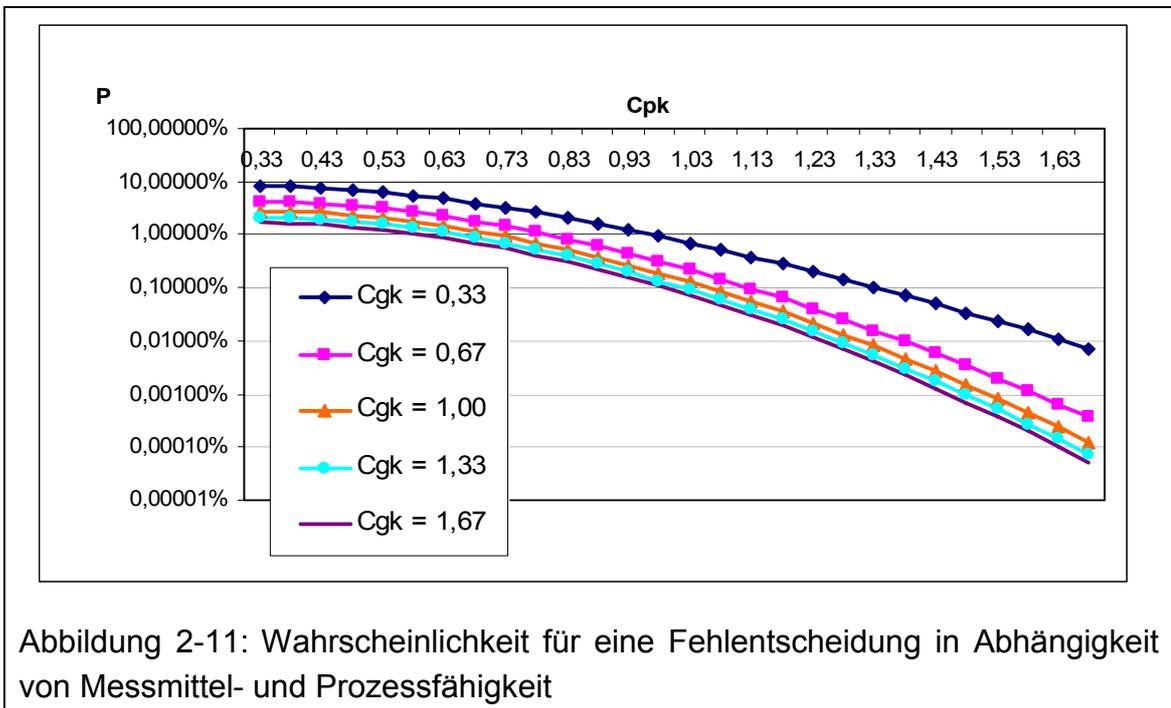
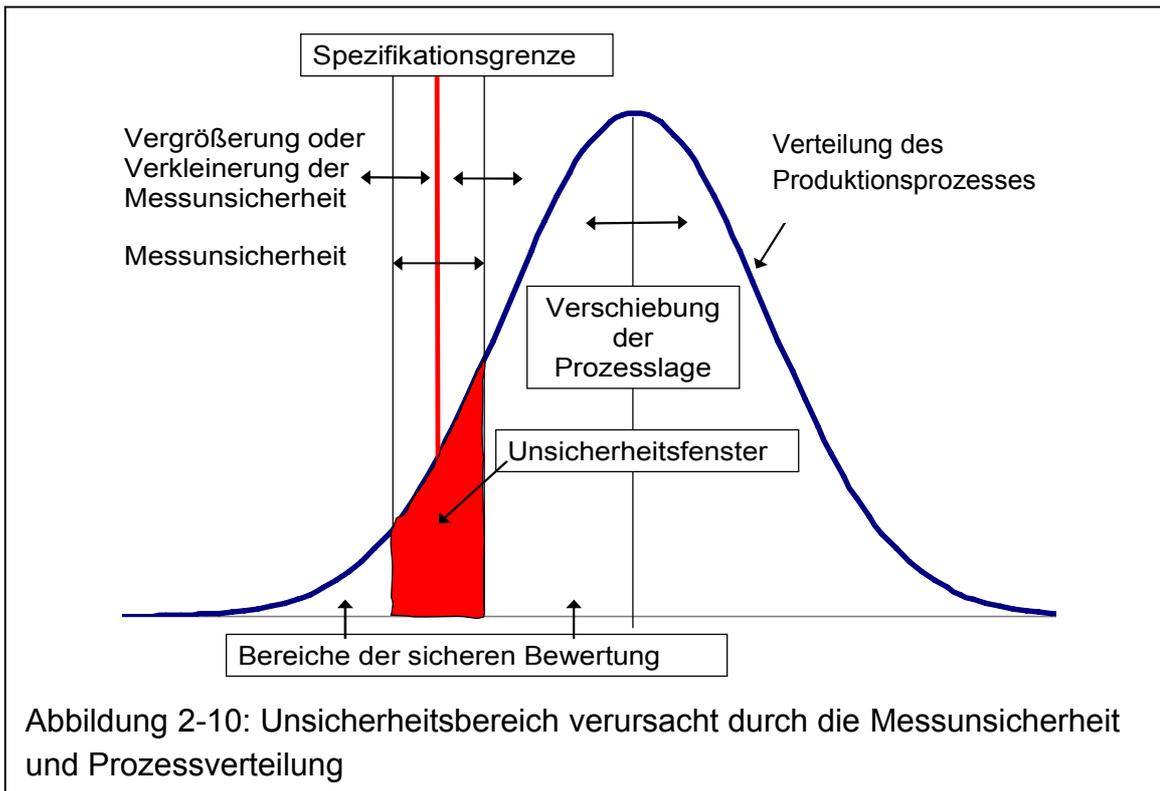
## 4. Fall: Schlechtteil richtig abgelehnt

Den Anteil der richtig zurückgewiesenen Schlechtteile  $P_{ab}$  erhält man aus:

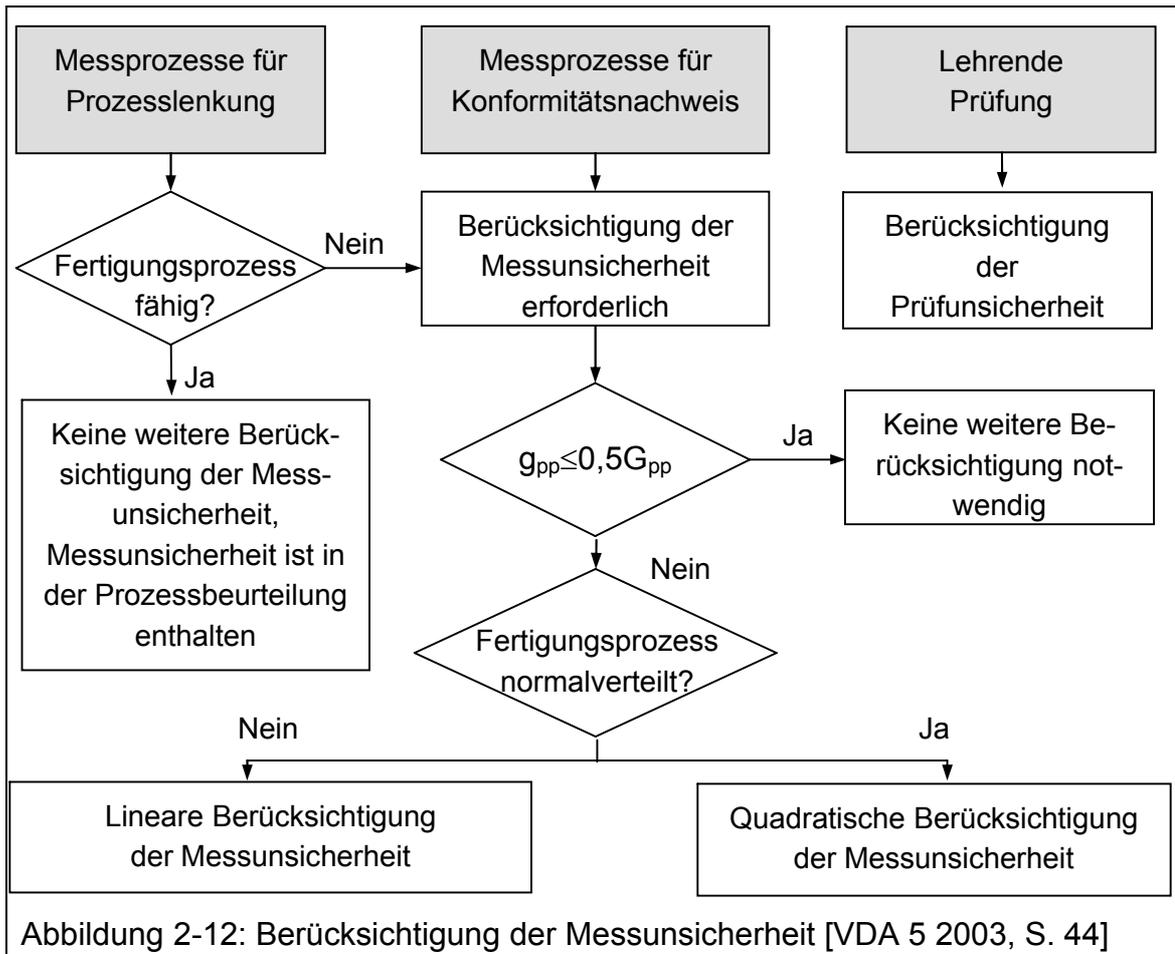
$$P_{ab} = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2} \left[ \int_{T_o}^{\infty} \int_{T_o}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(x_2 - x_1 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) dx_2 dx_1 + \int_{T_u}^{T_u} \int_{-\infty}^{T_u} \exp\left(-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(x_2 - x_1 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) dx_2 dx_1 + \int_{T_o}^{\infty} \int_{-\infty}^{T_u} \exp\left(-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(x_2 - x_1 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) dx_2 dx_1 + \int_{-\infty}^{T_u} \int_{T_o}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(x_2 - x_1 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) dx_2 dx_1 \right] \quad (2.6)$$

In der industriellen Praxis der Automobil- und Automobilzulieferindustrie werden zur Bewertung der Prozessfähigkeit die Kennzahl  $C_{pk}$  und zur Bewertung der Messmittelfähigkeit die Kennzahl  $C_{gk}$  herangezogen [Dietrich 2003, 2003a]. Um den beschriebenen Zusammenhang an diese Kennzahlen anzupassen, wurde eine Faltung der Messabweichung mit der Prozessabweichung durchgeführt. Der Überschreitungsanteil ist einerseits abhängig von der Messunsicherheit und andererseits von der Prozessfähigkeit. Die Messunsicherheit bildet dabei einen Unsicherheitsbereich links und rechts von der Spezifikationsgrenze (Abbildung 2-10). In Abbildung 2-11 ist der quantitative Zusammenhang zwischen Messmittel- und Prozessfähigkeit durch Faltung der beiden Normalverteilungen dargestellt<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Dieser Zusammenhang wird in ähnlicher Form auch von Weckenmann dargestellt. Weckenmann verwendet allerdings das Verhältnis  $U/T$  als Kennwert für die Messmittelfähigkeit [Weckenmann 1999].



Eine übersichtliche Entscheidungshilfe für die Berücksichtigung der Messunsicherheit im Produktionsprozess gibt der VDA Band 5. Diese Vorgehensweise kann als praktische Ergänzung der DIN EN ISO 14253-1 gesehen werden (Abbildung 2-12).



$g_{pp}$ ...Eignungskennwert Prüfprozess ( $g_{pp} = 2 \cdot (U/T)$ ),  $G_{pp}$ ...Empfohlener Grenzwert je nach Toleranzklasse zwischen 0,20 bis 0,40 [VDA 5 2003, S. 57]

## 2.2 Verfügbarkeitsverhalten und Nutzungsgrad

Definition:

Die Verfügbarkeit ist die Fähigkeit einer Einheit, zu einem gegebenen Zeitpunkt oder während eines gegebenen Zeitraums in einem Zustand zu sein, der eine geforderte Funktion bei gegebenen Bedingungen unter der Annahme erfüllt, dass die erforderlichen äußeren Hilfsmittel bereitgestellt sind. [DIN EN 13306 2001, S. 12]. Nutzungsgrad wird als synonyme Begriff verwendet.

Die Berechnung der Verfügbarkeit gliedert sich in eine vergangenheitsorientierte Zeitrumberechnung und in eine zukunftsorientierte Zeitpunktprognose.

Die **Zeitrumberechnung** setzt die Summe der Betriebszeiten ins Verhältnis zur Summe der Ausfallzeiten und Summe der Betriebszeiten.

$$\text{Verfügbarkeit} = \text{Nutzungsgrad} = \frac{\sum \text{Betriebszeiten}}{\sum \text{Betriebszeiten} + \sum \text{Ausfallzeiten}} \quad (2.7)$$

Ergebnis ist ein Maß für die Effizienz der Nutzung eines AMPS während eines abgelaufenen Zeitraums [VDI 3423 2002, S.7].

Die **Zeitpunktprognose** stützt sich auf mittlere Betriebszeiten (**Mean Time Between Failures, MTBF**) und mittlere Ausfallzeiten (**Mean Down Time, MDT**) der Vergangenheit zur Prognose der Wahrscheinlichkeit, zu einem bestimmten Zeitpunkt die Einheit (hier AMPS) in einem funktionsfähigen Zustand anzutreffen [DIN 40041 1990, S.8].

$$\text{Verfügbarkeit} = \text{Nutzungsgrad} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MDT}} \quad (2.8)$$

Ergebnis ist ein Erwartungswert für die Funktionsfähigkeit einer Einheit in der Zukunft.

Tabelle 2-6: Verfügbarkeit in Normen und Richtlinien

Verfügbarkeit	
Zeitraumbetrachtung für das Betriebsverhalten der Vergangenheit.	Zeitpunkt Betrachtung als Prognosemodell für das Betriebsverhalten der Zukunft.
Definitionen: DIN EN 13306 2001 Berechnung: VDI 3423 2002	Definitionen: DIN 40041 1990 Berechnung: VDI 4004 Blatt 3, 4 1986
Relevant für den Nachweis der Erfüllung der vereinbarten Anforderungen zwischen Anlagenhersteller und Anlagenbetreiber.	Relevant für die Prognosebetrachtung als Basis für die Anlagenplanung, z. B. hinsichtlich Kapazität und Instandhaltungsintervalle.

Zur Bestimmung der Verfügbarkeit ist eine differenzierte Zeiterfassung der Betriebs- und Ausfallzeiten erforderlich.

Tabelle 2-7: Zeiterfassung nach [VDI 3423 2002]

Betrachtungszeitraum (z. B. Jahr, Schicht, Garantiezeit)			
Belegungszeit $T_B$		nicht belegte Zeit	nicht geplante Zeit
Theoretische Bereitschaftszeit $T_{\text{Bereit theo}}$		Wartungszeit $T_W$  geplant	Wartungszeit kann in die nicht belegte Zeit ausgedehnt werden
Bereitschaftszeit $T_{\text{Bereit}}$			
Laufzeit $T_{\text{Lauf}}$	Organisatorische Ausfallzeit $T_O$		
		Technische Ausfallzeit $T_T$	

Im Betrachtungszeitraum ist die gesamte Beobachtungsdauer erfasst. Dies kann z. B. das Produktionsjahr, die Produktionsschicht oder die Garantiezeit des AMPS sein. Nach Abzug der nicht belegten Zeiten, z. B. wegen Pausen,

nicht geplanten oder fehlenden Aufträgen, erhält man die Belegungszeit ( $T_B$ ). Durch Abzug der Wartungszeit ( $T_W$ ) ergibt sich die theoretische Bereitschaftszeit ( $T_{\text{Bereit theo}}$ ) des AMPS. Die (tatsächliche) Bereitschaftszeit ( $T_{\text{Bereit}}$ ) ist die theoretische Bereitschaftszeit abzüglich der technischen Ausfallzeit ( $T_T$ ). Die Laufzeit ( $T_{\text{Lauf}}$ ) ist die Zeit, in der das AMPS tatsächlich betrieben wird. Sie ergibt sich aus der Bereitschaftszeit abzüglich der organisatorischen Ausfallzeit ( $T_O$ ). Die technischen Ausfallzeiten werden durch Mängel und Störungen des AMPS verursacht. Zusammen mit den Zeiten für die Wartungen, die während der Belegungszeit durchgeführt werden müssen, liegen sie in der Verantwortung des Anlagenherstellers. Die organisatorischen Ausfallzeiten werden durch Mängel in der Organisation, Administration und Logistik während des Betriebs des AMPS verursacht. Sie liegen im Verantwortungsbereich des Anlagenbetreibers. Die exakte Erfassung der Ausfallursache ist Voraussetzung zur Unterscheidung zwischen technischer (maschinenbedingter) und praktischer Verfügbarkeit (Tabelle 2-8).

Tabelle 2-8: Ausfallzeiten, Ausfallursachen, Abhängigkeiten und Verantwortung [DIN EN 13306 2001; VDI 3423 2002]

Technische Ausfallzeit $T_T$	Wartungszeit $T_W$	Organisatorische Ausfallzeit $T_O$
Materialfehler im AMPS Mängel in Konzept und Ausführung des AMPS Instandsetzung, Reparatur infolge der Mängel Zusätzliche Wartungszeiten infolge der Mängel Zusätzliche Instandhaltung infolge der Mängel Lieferverzug des Anlagenherstellers bei Ersatzteilen Probelauf zur Fehlerfindung Wartezeiten auf den Kundendienst des Anlagenherstellers, die über die vereinbarte Reaktionszeit hinausgehen. Wechseln der Betriebsmittel (Rüsten) die über die zugesagte Rüstzeit hinausgehen.	Geplante Instandhaltung in Form von Inspektion, Kalibrierung, Reinigung, Schmierung und Justage, die während der Belegungszeit durchgeführt werden müssen.	Fehlen von Energie Fehlen von Werkstücken Fehlen von Werkzeugen Fehlen von personeller Kapazität Mangelnde Schulung Mangelhafte Handhabung Mangelhafte Wartung und Instandhaltung Mangelhafte Werkstückqualität (Teilehygiene) Ungeplante Instandhaltung infolge der Fehler und Mängel Warten auf Ersatzteile Warten auf Kundendienst innerhalb der Reaktionszeit Wechsel von Betriebsmittel
Abhängig von der technischen Zuverlässigkeit und Instandhaltbarkeit des AMPS		Abhängig von den Rahmenbedingungen
Verantwortung des Anlagenherstellers		Verantwortung des Anlagenbetreibers

Mit den definierten Kenngrößen kann die Berechnung der Verfügbarkeit nach Tabelle 2-9 erfolgen

Tabelle 2-9: Verfügbarkeitsberechnung

Zeitraumbetrachtung [VDI 3423 2002]	Zeitpunktprognose [VDI 4004 1986]
<p>Technische Verfügbarkeit oder technischer Nutzungsgrad:</p> $V_t = NG_t = \frac{T_B - (T_T + T_W + T_O)}{T_B - T_O} * 100\%$ <p>oder</p> $V_t = NG_{mb} = \frac{T_{\text{Lauf}}}{T_B - T_O} * 100\%$	<p>Theoretische Verfügbarkeit:</p> $V_{\text{theo}} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} * 100\%$
	<p>Technische Verfügbarkeit:</p> $V_t = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MRDP} * 100\%$
<p>Praktische Verfügbarkeit oder Gesamtnutzungsgrad:</p> $V_p = NG = \frac{T_B - (T_T + T_W + T_O)}{T_B} * 100\%$ <p>oder</p> $V_p = NG = \frac{T_{\text{Lauf}}}{T_B} * 100\%$	<p>Operationelle Verfügbarkeit:</p> $V_o = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MRDP + MRDA} * 100\%$
	<p>Praktische Verfügbarkeit:</p> $V_p = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MRDP + MRDA + MRDL} * 100\%$

Erläuterung MTTR, MRDP, MRDA, MRDL siehe Punkt 2.2.2

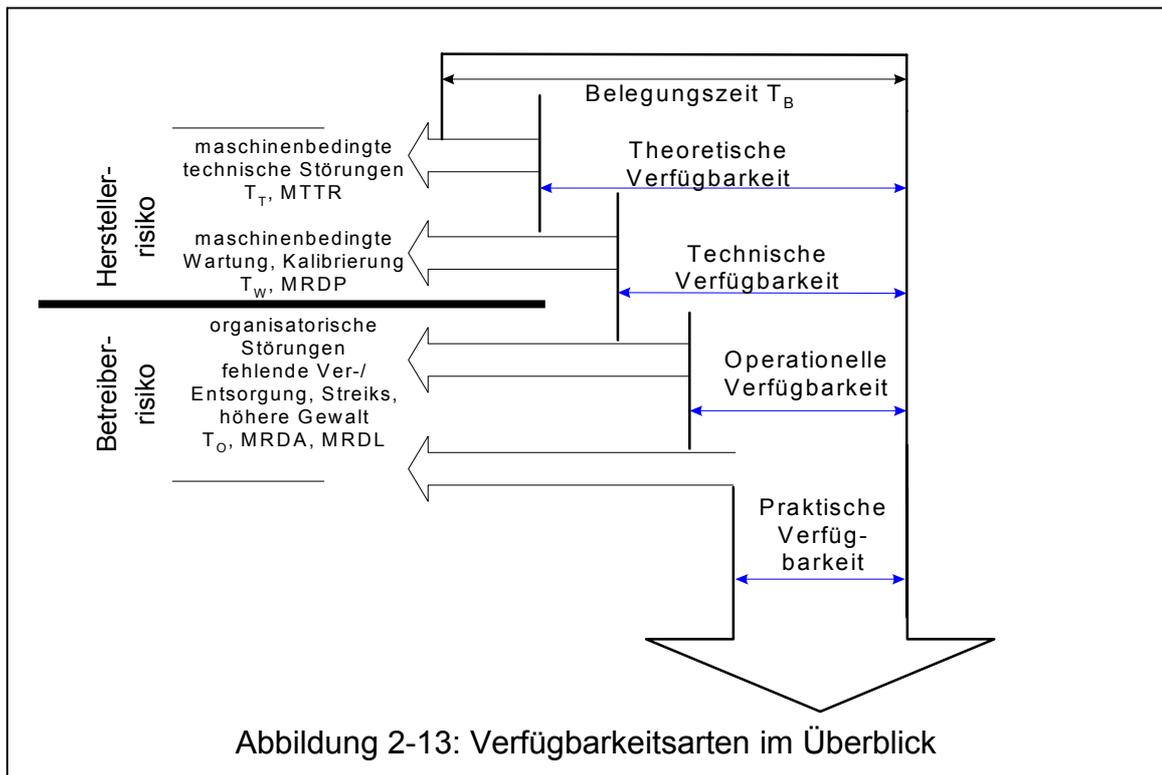


Abbildung 2-13: Verfügbarkeitsarten im Überblick

### 2.2.1 Technische Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass während einer Zeitspanne kein Ausfall auftreten wird, welcher die Funktionsfähigkeit einer Einheit beeinträchtigt [DIN 40041 1990]. Die Zuverlässigkeit wird durch die Ausfallrate der technischen Elemente bestimmt. Sie wird quantifiziert durch die mittlere stillstandsfreie Laufdauer (Klarzeit), **Mean Time Between Failures (MTBF)**. MTBF wird definiert als:

"Erwartungswert für die Klarzeit bis zur nächsten Reparatur."  
[VDI 4004 1986, S. 5]

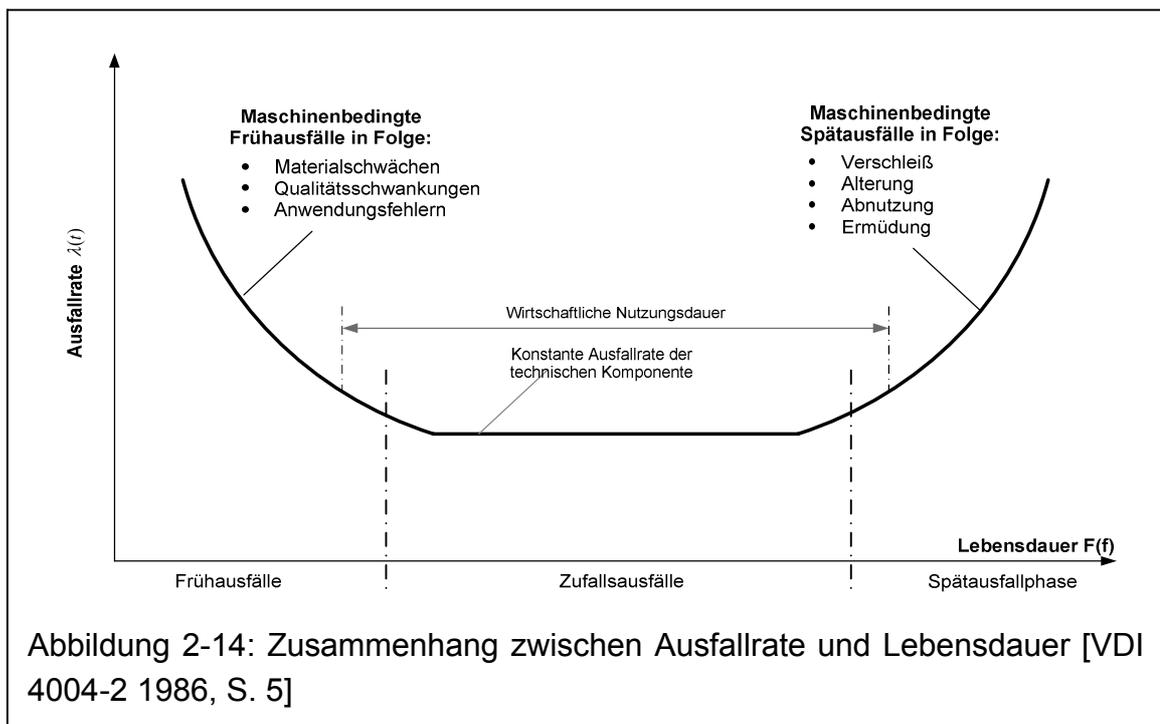
Die Berechnung erfolgt als:

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} \text{ mit } \lambda \dots \text{Ausfallrate} \quad (2.9)$$

Der Zeitanteil MTBF wird durch die Ausfallrate bestimmt. Die Ausfallrate ist die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte  $f(t)$  dividiert durch die Überlebenswahrscheinlichkeit  $R(t)$ .

$$\lambda(t) = \frac{dF(t)}{dt} \frac{1}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \text{ mit } R(t) = 1 - F(t) \quad (2.10)$$

Für eine einzelne Betrachtungseinheit ist  $\lambda(t)$  für  $\Delta t \rightarrow 0$  die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalles im Zeitraum  $(t; t + \Delta t]$ , wenn die Einheit zum Zeitpunkt  $t$  noch intakt war.



Ausfälle werden nach Abbildung 2-14 in drei zeitliche Phasen gegliedert:

- Frühausfallphase (exponentiell absteigend),
- Zufallsausfälle mit nahezu konstanten Ausfallraten und die
- Spätausfallphase.

Die Zuverlässigkeit einer nicht reparierbaren Einheit wird durch ihre Lebensdauer charakterisiert. Sie ist festgelegt durch  $F(t)$

$$F(t) = P(T \leq t) \text{ für } t \geq 0 \quad \text{und} \quad F(t) = 0 \text{ für } t \leq 0 \quad (2.11)$$

Die Lebensdauer  $F(t)$  beschreibt, wie viele Teile bis zum Zeitpunkt  $t$  ausgefallen sind.

## 2.2.2 Instandhaltbarkeit

Definition:

Instandhaltbarkeit ist die „Fähigkeit einer Einheit, dass sie unter gegebenen Einsatzbedingungen in einem Zustand erhalten oder in ihn zurückversetzt werden kann, in dem sie eine geforderte Funktion erfüllen kann.“ [DIN EN 13306 2001, S. 13]

Bei der Instandhaltbarkeit sind die Begriffe Inspektion, Wartung und Instandsetzung zu unterscheiden. Bei der Inspektion finden eine Begutachtung und ein Soll-Ist Vergleich (z. B. Kalibrieren) statt. Bei der Wartung wird das System gereinigt, geschmiert und justiert. Diese Tätigkeiten sind geplant und finden vorbeugend statt. Die Kenngröße, die diese Tätigkeiten zusammenfasst, ist die **Wartungszeit** ( $T_W$ ) für die Zeitraumbetrachtung oder die **mittlere Ausfallzeit zur geplanten, präventiven Instandhaltung** (**Mean Related Downtime for Preventive Maintenance, MRDP**) für die Zeitpunktprognose. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit stellt die Verkürzung dieser Zeiten durch den Einsatz von Absicherungs-Algorithmen das Potenzial zur Verbesserung der Verfügbarkeit dar.

Bei der Instandsetzung erfolgt eine ungeplante Reparatur des AMPS. Ursache war eine technische Störung, die zum Stillstand oder zu einer Beschädigung des AMPS geführt hat. Kenngröße ist die **technische Ausfallzeit** ( $T_T$ ) für die Zeitraumbetrachtung oder die **mittlere Zeit zur Störungsbehebung** (**Mean Time To Repair, MTTR**) für die Zeitpunktprognose (Tabelle 2-10).

Tabelle 2-10: Begriffe, Tätigkeiten und Kenngrößen der Instandhaltbarkeit

	Instandhaltbarkeit		
	geplant		ungeplant
Begriff	Inspektion	Wartung	Instandsetzung
Beispiele für Tätigkeit	Überwachen, Kalibrieren	Reinigen, Schmierren, Justieren	Reparieren
Kenngröße	$T_W$ oder MRDP		$T_T$ oder MTTR

Tabelle 2-11: Berechnung der Kenngrößen der Instandhaltbarkeit

Kenngrößen für die geplante Inspektion und Wartung ( $T_W$ und MRDP)	
Zeitraumbetrachtung [VDI 3423 2002]	Zeitpunktprognose [VDI 4004 1986]
$T_W = \sum_{i=1}^n T_{Wi}$	$MRDP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{Wi}$
Summe aller Inspektions- und Wartungszeiten während der Belegungszeit.	Mittlere Inspektions- und Wartungszeit während der Belegungszeit.
Kenngrößen für die ungeplante Instandsetzung ( $T_T$ und MTTR)	
$T_T = \sum_{i=1}^n T_{Ti}$	$MTTR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{Ti}$
Summe aller technischen Ausfallzeiten während der Belegungszeit.	Mittlere technische Ausfallzeit während der Belegungszeit.

### 2.2.3 Organisatorische Ausfallzeiten

Organisatorische Ausfallzeiten haben ihre Ursache in organisatorischen, administrativen oder logistischen Störungen (vgl. Tabelle 2-8). In der Richtlinie VDI 3423 werden diese Ausfallzeiten mit der Kennzahl  $T_O$  zusammengefasst [VDI 3423 2002]. Die Richtlinie VDI 4004 unterscheidet zwischen eigenbedingten administrativen Ausfallzeiten, z. B. fehlende Werkstücke, und fremdbedingten logistischen Ausfallzeiten, z. B. Streiks. Bei dieser Differenzierung müssen die administrativen Anteile ( $T_{O\ ad}$ ) und logistischen Anteile ( $T_{O\ log}$ ) getrennt erfasst werden.

Tabelle 2-12: Berechnung der organisatorischen Ausfallzeiten

Zeitraumbetrachtung [VDI 3423 2002]	Zeitpunktprognose [VDI 4004 1986]
$T_O = \sum_{i=1}^n T_{Oi}$	$MRDA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{O\ ad\ i}$
	Mittlere eigenbedingte administrative Ausfallzeit während der Belegungszeit.
	$MRDL = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{O\ log\ i}$
Summe aller organisatorischer Ausfallzeiten während der Belegungszeit.	Mittlere fremdbedingte logistische Ausfallzeit während der Belegungszeit.
<b>Mean Related Downtime for Administration bzw. Logistic (MRDA, MRDL)</b>	

## 2.3 Leistungsmerkmale und Leistungsgrad

### Taktzeit

Die Taktzeit ist die Zykluszeit eines AMPS für das Ausstoßintervall von Gutteilen [VDMA 1996].

Das Ausstoßintervall ist die Zeit zwischen der Fertigstellung zweier unmittelbar aufeinander folgender Gutteile; das heißt, von der Fertigstellung des ersten bis zur Fertigstellung des nächsten Gutteils. Die Einschränkung auf Gutteile ist notwendig, weil Schlechteile in der Regel durch zusätzliche Handhabungsprozesse ausgeschleust werden müssen. Deshalb ist die Taktzeit für die Montage und Ausschleusung eines Schlechteils etwas höher als für die Montage und Verpackung eines Gutteils. Die Taktzeit wird durch eine Zeitmessung ermittelt und in der Einheit Zeit pro Stück, z. B. 0,2 Minuten pro Stück, angegeben.

Die Forderung nach der möglichst exakten Einhaltung einer geplanten Taktzeit ( $t_{\text{plan}}$ ) begründet sich in der Notwendigkeit der Synchronisation vor- und nachgeschalteter Bearbeitungsprozesse. In der Praxis kann die reale Taktzeit ( $t_{\text{real}}$ ) von der geplanten Taktzeit wegen notwendiger Zugeständnisse an maschinen- oder prozessbedingte Rahmenbedingungen abweichen. Die Taktzeit der taktgebenden Komponenten bestimmt die geplante Mengenleistung ( $M_{\text{plan}}$ ) eines AMPS.

### Geplante Mengenleistung

Die geplante Mengenleistung ( $M_{\text{plan}}$ ) ist die theoretisch produzierbare Stückzahl pro Zeiteinheit bei geplanter Taktzeit ohne Ausfallzeiten.

Für kurze Beobachtungszeiträume, in denen das AMPS mit geplanter Taktzeit und ohne Störungen läuft, kann die geplante Mengenleistung aus der geplanten Taktzeit wie folgt ermittelt werden.

$$M_{\text{plan}} = \frac{1}{t_{\text{plan}}} \text{ in } \frac{\text{Stück}}{\text{Minute}} \quad \text{mit} \quad t_{\text{plan}} \text{ in } \frac{\text{Minuten}}{\text{Stück}} \quad (2.12)$$

### Leistungsgrad

Der Leistungsgrad ist ein Maß für die Bearbeitungsgeschwindigkeit eines AMPS.

Er berechnet sich aus dem Verhältnis von geplanter zu realer Taktzeit oder aus dem Verhältnis von realer und geplanter Mengenleistung bei kurzzeitigem und ungestörtem Betrieb.

Tabelle 2-13: Berechnung des Leistungsgrades

Taktzeitrechnung	Mengenrechnung
$LG = \frac{t_{\text{plan}}}{t_{\text{real}}} * 100\%$	$LG = \frac{M_{\text{real}}}{M_{\text{plan}}} * 100\%$
$t_{\text{gepl}}$ geplante Taktzeit in min/Stück $t_{\text{real}}$ reale Taktzeit in min/Stück	$M_{\text{real}}$ reale Mengenleistung in Stück/min $M_{\text{gepl}}$ geplante Mengenleistung in Stück/min

## 2.4 Total Productive Maintenance (TPM) und Gesamtanlageneffektivität

Total Productive Maintenance ist ein in Japan von Seichi Nakajima entwickeltes und 1971 erstmals eingesetztes Managementsystem zur Optimierung der betrieblichen Abläufe durch die kreative Beteiligung aller Mitarbeiter [Nakajima 1988]. Bei TPM steht nicht die Technik, sondern der Mensch im Mittelpunkt, unter Einbeziehung aller Beschäftigten vom Topmanagement bis zum Werker [Schmidt 1995]. „TPM ist die produktivitätsorientierte Instandhaltung, die von allen Mitarbeitern in Kleingruppen durchgeführt wird.“ [Nakajima 1995, S. 23]

Das Ziel von TPM sind „Null-Störungen“ bzw. „Null-Stillstandszeiten“ sowie „Null-Fehler“ [Nakajima 1995, S. 25]. Die vollständige Zieldefinition von TPM bezieht folgende fünf Punkte ein:

1. Maximierung der Anlageneffektivität
2. System zur Instandhaltung während der gesamten Lebensdauer
3. Einbeziehung verschiedener betrieblicher Bereiche
4. Einbeziehung aller Beschäftigten
5. Motivationsmanagement durch autonome Kleingruppen.

Der Begriff „Total“ hat eine dreifache Bedeutung:

1. Total Effectiveness (vollständige Effektivität) der Produktionsanlage zeigt das Streben nach Gewinn
2. Total Maintenance System (vollständiges Instandhaltungssystem) für die Produktionsanlage
3. Total Participation (vollständige Teilnahme aller Beschäftigten) zur Verbesserung der Produktionsanlage

Aus diesem Verständnis leitet Nakajima die Berechnung der Gesamtanlageneffektivität, G.A.E., oder auf Englisch Overall Equipment Effectiveness, O.E.E., ab.

Dazu greift er auf die bekannten Definitionen für Verfügbarkeit bzw. Nutzungsgrad (NG), Leistungsgrad (LG) sowie Qualitätsleistung (QL) zurück und kombiniert diese durch Multiplikation zur Gesamtanlageneffektivität [Nakajima 1995, S. 43].

$$\text{G.A.E} = \text{NG} \times \text{LG} \times \text{QL}$$

Die Gesamtanlageneffektivität ist ein Gesamtwirkungsgrad, der sehr transparent die Leistung des AMPS darstellt.

Nakajima beschreibt z. B. eine Anlage, die mit 87% Verfügbarkeit und 98% Qualitätsleistung zunächst eine scheinbar gute Gesamtanlageneffektivität erwarten lässt. Der Leistungsgrad der Anlage beträgt aber nur 50%, d. h. sie wird nur mit halber Taktzeit betrieben. Die G.A.E sinkt damit auf 42,6%. Das bedeutet, dass die Anlage nicht einmal zur Hälfte ihres Potenzials genutzt wird. Nakajima bezeichnet diese Situation als „...typisch für ein durchschnittliches Unternehmen.“ [Nakajima 1995, S. 48].

Ideale Bedingungen herrschen, wenn die G.A.E größer als 85% ist. Diese Anforderungen erfüllten alle 116 PM-Preisträger (plant prize des Japan Institute of Plant Maintenance) in den Jahren von 1971 bis 1984 für die erfolgreiche Einführung von TPM.

Vor diesem Hintergrund fordert Nakajima unter optimalen Bedingungen die in Tabelle 2-14 in der Spalte „Ideale Kennzahlen“ angegebene Prozentsätze. Der Autor dieser Arbeit erweitert diese um die Spalte „Akzeptable Kennzahlen“, um der Tatsache besser gerecht zu werden, dass die „...Montage das Sammelbecken aller Fehler der Vorstufen...“ ist [Wendt 1992, S. 3].

Tabelle 2-14: Mindestanforderungen an die Gesamtanlageneffektivität

	Ideale Kennzahlen	Akzeptable Kennzahlen
Praktische Verfügbarkeit, Gesamtnutzungsgrad	> 90%,	> 85%
Leistungsgrad	> 95%,	> 90%
Qualitätsleistung	> 99%	> 98%
Gesamtanlageneffektivität	> 85%	> 75%

Tabelle 2-15: Mindestanforderungen an die maschinenbedingte Gesamtanlageneffektivität

	Ideale Kennzahlen	Akzeptable Kennzahlen
Technische Verfügbarkeit, Maschinenbedingter Nutzungsgrad	> 95%	> 90%
Leistungsgrad	> 95%	> 90%
Maschinenbedingte Qualitätsleistung	> 99%	> 99%
Maschinenbedingte Gesamtanlageneffektivität	> 90%	> 80%

Mit dieser Unterscheidung können die Kennzahlen wie folgt zusammengefasst werden (Tabelle 2-16 und 2-17).

Tabelle 2-16: Maschinenbedingte Gesamtanlageneffektivität

Direkte Berechnung	Differenzierung nach Einflüssen
$G.A.E_{mb} =$ $= \frac{m_{gut} + m_{anmb}}{(T_B - T_O) * M_{plan}} * 100\%$ <p style="text-align: center;">oder</p> $= \frac{t_{plan} * (m_{gut} + m_{anmb})}{T_B - T_O} * 100\%$ <p style="text-align: center;">mit <math>T_{Lauf} = m * t_{real} = \frac{m}{M_{real}}</math></p>	$QL_{mb} = \begin{cases} \frac{m - m_{amb}}{m} * 100\% & \text{für } N.i.O.G_{mb} = 0 \\ 0 & \text{für } N.i.O.G_{mb} > 0 \end{cases}$
	$LG = \frac{t_{plan}}{t_{real}} * 100\% = \frac{M_{real}}{M_{plan}} * 100\%$
	$V_t = NG_{mb} = \frac{T_{Lauf}}{T_B - T_O} * 100\%$

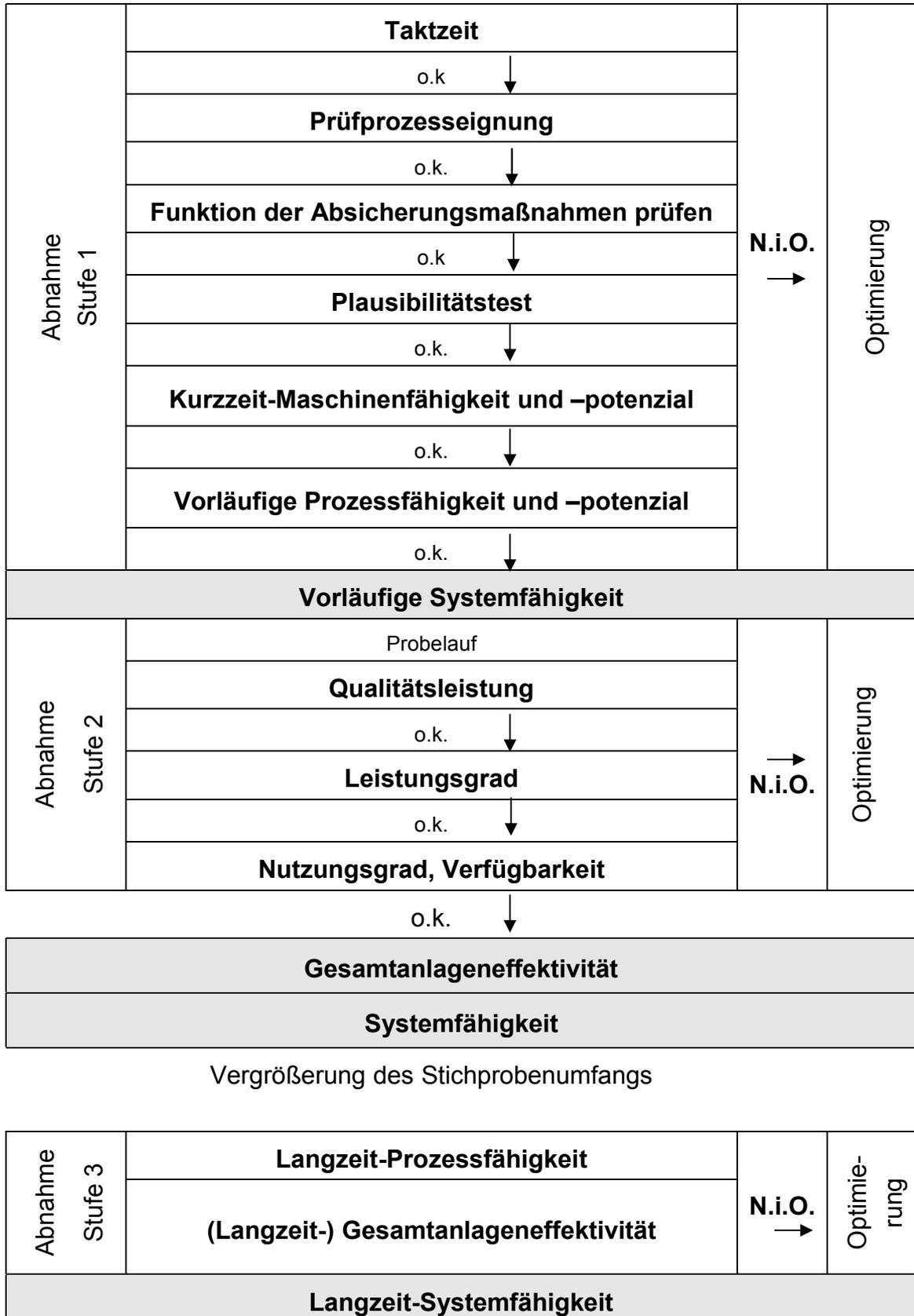
Tabelle 2-17: Gesamtanlageneffektivität

Direkte Berechnung	Differenzierung nach Einflüssen
$G.A.E =$ $= \frac{m_{gut}}{T_B * M_{plan}} * 100\%$ <p style="text-align: center;">oder</p> $= \frac{t_{plan} * m_{gut}}{T_B} * 100\%$ <p style="text-align: center;">mit <math>T_{Lauf} = m * t_{real} = \frac{m}{M_{real}}</math></p>	$QL = \begin{cases} \frac{m - m_a}{m} * 100\% & \text{für } N.i.O.G = 0 \\ 0 & \text{für } N.i.O.G > 0 \end{cases}$
	$LG = \frac{t_{plan}}{t_{real}} * 100\% = \frac{M_{real}}{M_{plan}} * 100\%$
	$V_p = NG = \frac{T_{Lauf}}{T_B} * 100\%$

## 2.5 Zusammenfassung zur Systemfähigkeit

### 2.5.1 Ablauf der Ermittlung

Tabelle 2-18: Ablauf der Ermittlung der Systemfähigkeit



2.5.2 Übersicht Systemfähigkeit (Tabelle 2-19)

	Kennzahlen [Einheit]	Definition	Analyseumfang	Formel	Kennwert	Kennwert
<b>Messprozess am Beispiel QS 9000/MSA</b>	C <sub>g</sub> [1] Gage capability	Wiederholbarkeit des Messmittels	1 Bediener	$C_g = \frac{0,2T}{6s_g}$	> 1,33	Yellow
	C <sub>gk</sub> [1] Critical gage capability	Genauigkeit	1 Referenzteil 30 Messungen	$C_{gk} = \frac{0,1T -  \bar{x}_g - x_m }{3s_g}$	> 1,33	Red
	R&R [mm, %] Wiederholbarkeit und Nachvollziehbarkeit	Bedienereinfluss und Wiederholbarkeit unter Prozessbedingungen	3 Bediener, 10 Serienteile, 2 Messreihen od. 2 Durchläufe, 10 Teile (Automatentest)	$R \& R = \sqrt{(EV^2 + AV^2)}$	≤ 10%	Green
	Attributive Fähigkeit	Wiederholbarkeit der Gut-, Schlechtentscheidung	10 Gutteile 10 Grenzteile 10 Schlechteile je 10 mal prüfen	Bei 100 Gut- und 100 Grenzteil-Prüfungen je 1 Fehlbewertung Bei 100 Schlechteil-Prüfungen 0 Fehlbewertungen zulässig	100-1/1/0	Green
<b>Montageprozess</b>	Absicherungsmaßnahmen	Absicherung gegen unvorhergesehene Störgrößen	Vorhandensein der technischen Einrichtungen	mit Checkliste prüfen		
	Plausibilitätsprüfung	korrekte Teilesortierung	2 Schlecht- und 2 Gutteile pro Merkmal der Anlage mind. zweimal zuführen	Gut- und Schlechteile müssen erkannt und richtig gehandhabt werden. Bei acht Prüfungen ist keine Abweichung zulässig.	8-0	
	C <sub>m</sub> [1] Machine capability	Kurzzeitige Merkmalsstreuung, verursacht durch die Maschine	50 Teile produzieren	<b>Für Normalverteilte Merkmale:</b> $C_m, P_p, C_p = \frac{OGW - UGW}{6 \cdot \hat{\sigma}}$	> 2,0	
	C <sub>mk</sub> [1] Critical machine capability	Fähigkeit der Maschine zur Produktion in der Toleranzmitte		$C_{mk}, P_{pk}, C_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{OGW - \hat{\mu}}{3 \cdot \hat{\sigma}}, \frac{\hat{\mu} - UGW}{3 \cdot \hat{\sigma}} \right\}$	> 1,67	
	P <sub>p</sub> vorläufig [1] Process potential	Kurzzeitige Merkmalsstreuung von Maschine und Umgebung	125 Teile produzieren	<b>Für alle Verteilungsdichten:</b> $C_m, P_p, C_p = \frac{OGW - UGW}{o_p - u_p}$	> 1,67	
	P <sub>pk</sub> vorläufig [1] Critical process potential	Kurzfristige Fähigkeit zur Produktion in der Toleranzmitte		$C_{mk}, P_{pk}, C_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{OGW - \hat{\mu}}{o_p - \hat{\mu}}, \frac{\hat{\mu} - UGW}{\hat{\mu} - u_p} \right\}$	> 1,33	
	C <sub>p</sub> Langzeit [1] Process capability	Langzeitmerkmalsstreuung von Prozess und Umgebung	Für Abschätzung mindestens achtstündiger Probelauf.	oder: $C_m, P_p, C_p = \frac{OGW - UGW}{x_{max} - x_{min}}$	> 1,33	
	C <sub>pk</sub> Langzeit [1] Critical process capability	Langzeitfähigkeit zur Produktion in der Toleranzmitte	Zur Beurteilung mindestens 20 Produktionstage	$C_{mk}, P_{pk}, C_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{OGW - \hat{\mu}}{x_{max} - \hat{\mu}}, \frac{\hat{\mu} - UGW}{\hat{\mu} - x_{min}} \right\}$	> 1,0	

<b>Leistung</b>	Reale Taktzeit [min/Stück]	Zeit zwischen zwei fertigen Teilen im ungestörten Betrieb	Durchschnitt der langsamsten Komponente	$t_{real}$ in min/Stück Ermittlung durch Stoppen	$> 0.90 \cdot t_{plan}$
	Ausbringungsmengen [Stück]	Gesamteil-Ausbringungsmenge (Gut- und Schlechteile)	mindestens vierstündiger Produktionslauf	Ermittlung durch Zählen	Soll
	Leistungsgrad [%]	Verhältnis von geplanter und realer Taktzeit	mindestens einminütiger ungestörter Betrieb bei maximal möglicher Geschwindigkeit.	$LG = \frac{t_{plan}}{t_{real}} * 100\%$	$> 90\%$
		Verhältnis von realer und geplanter Kurzzeitmengeleistung im ungestörten Betrieb		$LG = \frac{M_{real}}{M_{plan}} * 100\%$	$> 90\%$
	Maschinenbed. Nutzungsgrad, Technische Verfügbarkeit [%]	Anteil der Laufzeit an der Belegungszeit minus organisatorischer Ausfallzeiten	mindestens vierstündiger Produktionslauf	$V_t = NG_{mb} = \frac{T_{Lauf}}{T_B - T_O} * 100\%$	$> 90\%$
	Gesamtnutzungsgrad, Praktische Verfügbarkeit [%]	Anteil der Laufzeit an der Belegungszeit	mindestens achtstündiger Produktionslauf	$V_p = NG = \frac{T_{Lauf}}{T_B} * 100\%$	$> 85\%$
	Maschinenbedingte Qualitätsleistung [%]	Produktion und Sortierung von Schlechteilen	mindestens vierstündiger Produktionslauf	$QL_{mb} = \begin{cases} \frac{m - m_{amb}}{m} * 100\% & \text{für Ni.O}_{Gmb} = 0 \\ 0 & \text{für Ni.O}_{Gmb} > 0 \end{cases}$	$> 99\%$
	Gesamtqualitätsleistung [%]		mindestens achtstündiger Produktionslauf	$QL = \begin{cases} \frac{m - m_a}{m} * 100\% & \text{für Ni.O}_G = 0 \\ 0 & \text{für Ni.O}_G > 0 \end{cases}$	$> 98\%$
<b>G.A.E</b>	Maschinenbedingte Gesamtanlageneffektivität [%]	$G.A.E_{mb} = QL_{mb} * NG_{mb} * LG$	mindestens vierstündiger Produktionslauf	$G.A.E_{mb} = \frac{m_{gut} + m_{anmb}}{(T_B - T_O) * M_{plan}} * 100\%$	$> 80\%$
	Gesamtanlageneffektivität [%]	$G.A.E = QL * NG * LG$	mindestens achtstündiger Produktionslauf	$G.A.E = \frac{m_{gut}}{T_B * M_{plan}} * 100\%$	$> 75\%$

## 3 Struktur und Fehlerpotenzial automatisierter Montage- und Prüfsysteme (AMPS)

### 3.1 Komponenten von AMPS

Automatisierte Montage- und Prüfsysteme lassen sich in folgende Komponenten gliedern [VDMA 1996, S. 117 ff]:

#### Handlingkomponenten:

Hierbei handelt es sich um Stationen, die das Werkstück hinsichtlich Position und Lage beeinflussen. Dies kann das Zuführen, das Puffern, der Transport, die Entnahme oder die Vereinzelung von Werkstücken sein. Die Beschaffenheit des Werkstückes wird durch Handlingstationen nicht verändert.

#### Montagekomponenten:

Montagestationen sind wertschöpfende Komponenten. Sie beeinflussen die Beschaffenheit von Werkstücken. Dies kann z. B. durch Montage-, Verpackungs- oder Konservierungsvorgänge geschehen. Dabei werden die Werkstücke gezielt verändert und Qualitätsmerkmale erzeugt oder beeinflusst. "Die Hauptaufgabe der Montage ist es, Komponenten, formlose Werkstoffe und Montagebaugruppen zu einem komplexen Produkt zusammenzufügen" [Andreasen 1985, S.16]. Der Montagebegriff ist jedoch weiter zu fassen. Unter Montieren wird die Anwendung von Fügeverfahren verstanden, wobei alle Handhabungs- und Hilfsvorgänge einschließlich des Messens und Prüfens eingeschlossen werden [DIN 8593 2003, Teil 1]. Die Funktionen der Montage werden in Abbildung 3-1 dargestellt.

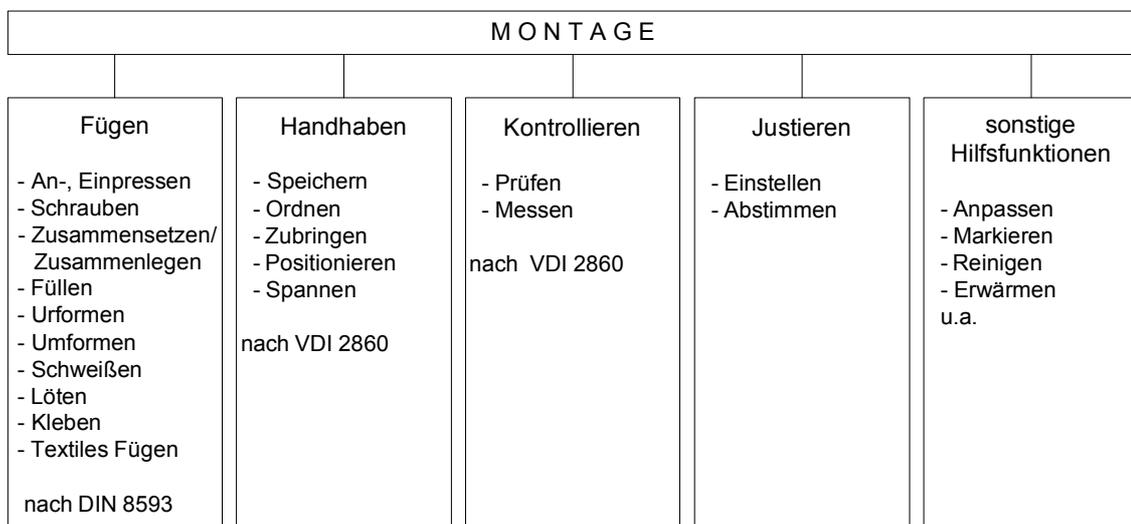


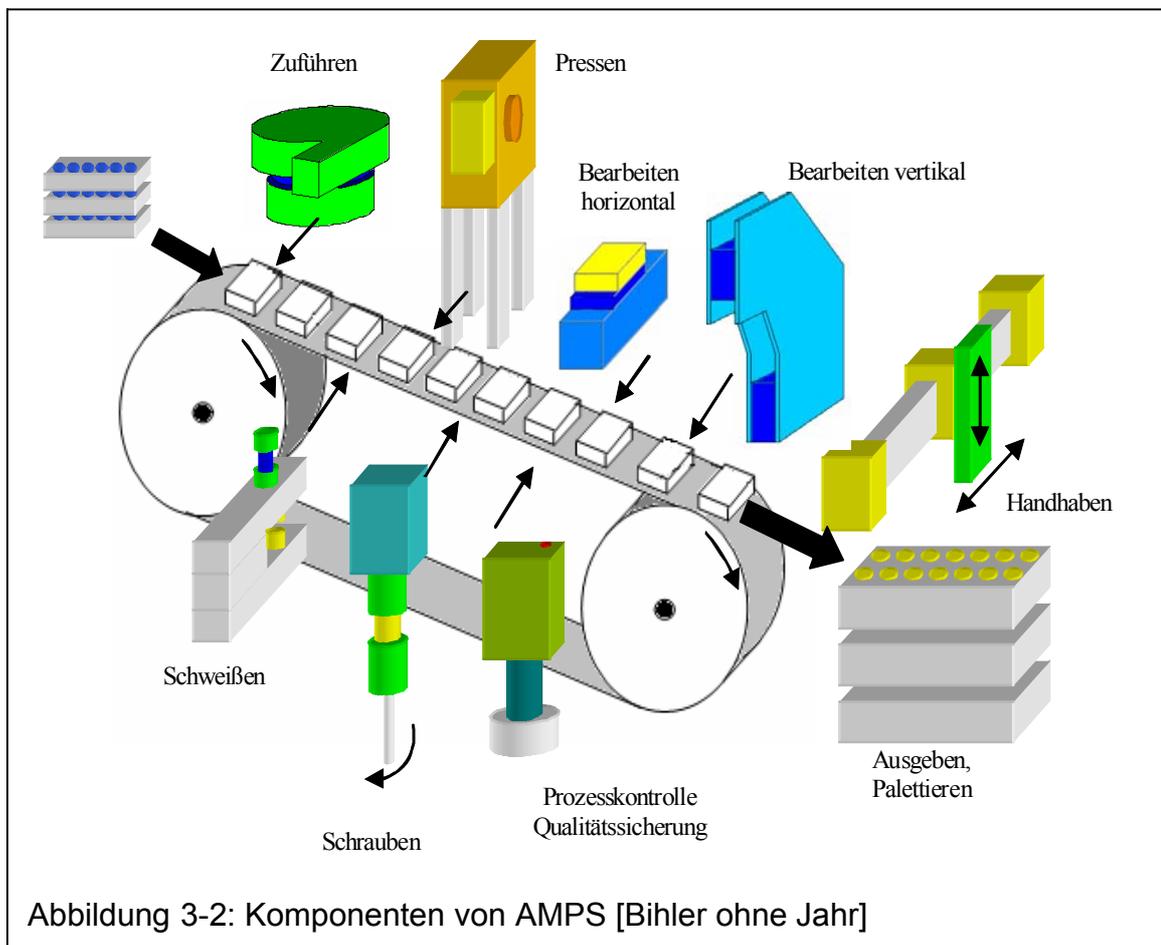
Abbildung 3-1: Funktionen der Montage [DIN 8593 2003, VDI 2860 1990 ]

**Prüfkomponenten:**

Prüfkomponenten dienen zur Informationsgewinnung über die Beschaffenheit des Werkstückes. Besonders Qualitätsmerkmale, die in den wertschöpfenden Stationen erzeugt werden (Montagestationen) oder für die Durchführung der Wertschöpfung relevant sind, werden geprüft. Prüfen ist das "Feststellen, inwieweit ein Prüfobjekt eine Forderung erfüllt. Mit dem Prüfen ist immer der Vergleich mit einer Forderung verbunden, die festgelegt oder vereinbart sein kann" [DIN 1319-1 1995, S. 6]. Die Prüfung kann dabei vor (Pre-Prozess-Prüfung), während (In-Prozess-Prüfung) oder nach der Wertschöpfung (Post-Prozess-Prüfung) stattfinden.

Entsprechend der Aufgabenstellung kommen kombinierte Stationen zum Einsatz. Zum Beispiel werden Wertschöpfung und Prüfung in Montagestationen, wie Press- oder Schraubstationen, integriert um den Montageablauf steuern zu können.

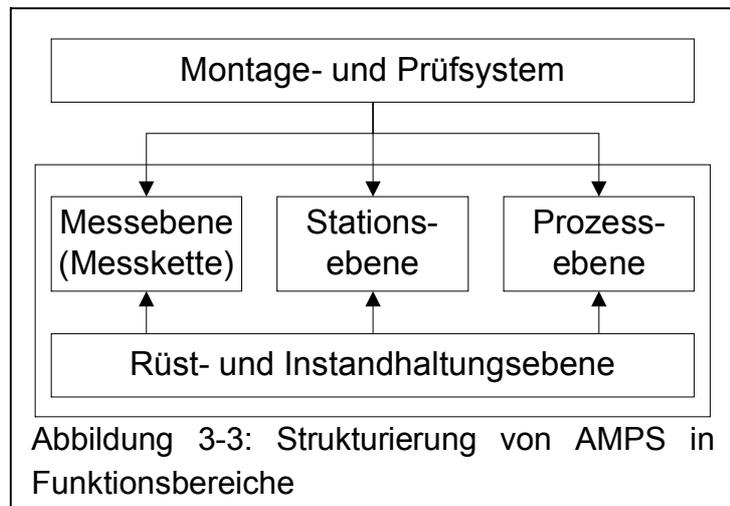
Die Standardbestandteile eines automatisierten Montage- und Prüfprozesses werden in Abbildung 3-2 dargestellt. Je nach Anwendungsfall variieren die Reihenfolge und Anzahl der einzelnen Stationen. Besonders Transport- und Handhabungsstationen können in größerer Anzahl eingesetzt werden.



## 3.2 Strukturierung von AMPS in Funktionsbereiche

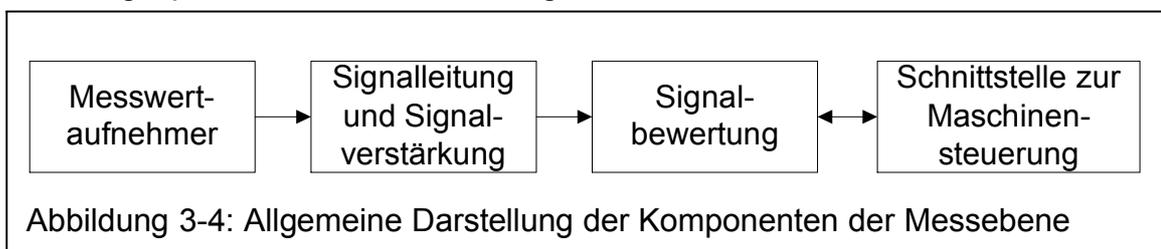
Zur Ermittlung des Fehlerpotenzials von AMPS ist als Ergänzung zum Stand der Technik eine Strukturierung in Funktionsbereiche notwendig. Die Strukturierung vereinfacht die Analyse von Fehlern, Fehlerursachen und Fehlerfolgen. Dazu werden AMPS in die Funktionen

- Messebene (Messkette),
  - Stationsebene,
  - Prozessebene sowie
  - Ebene des manuellen Eingriffs (Rüst- und Instandhaltungsebene)
- gegliedert (Abbildung 3-3).



### 3.2.1 Messebene (Messkette)

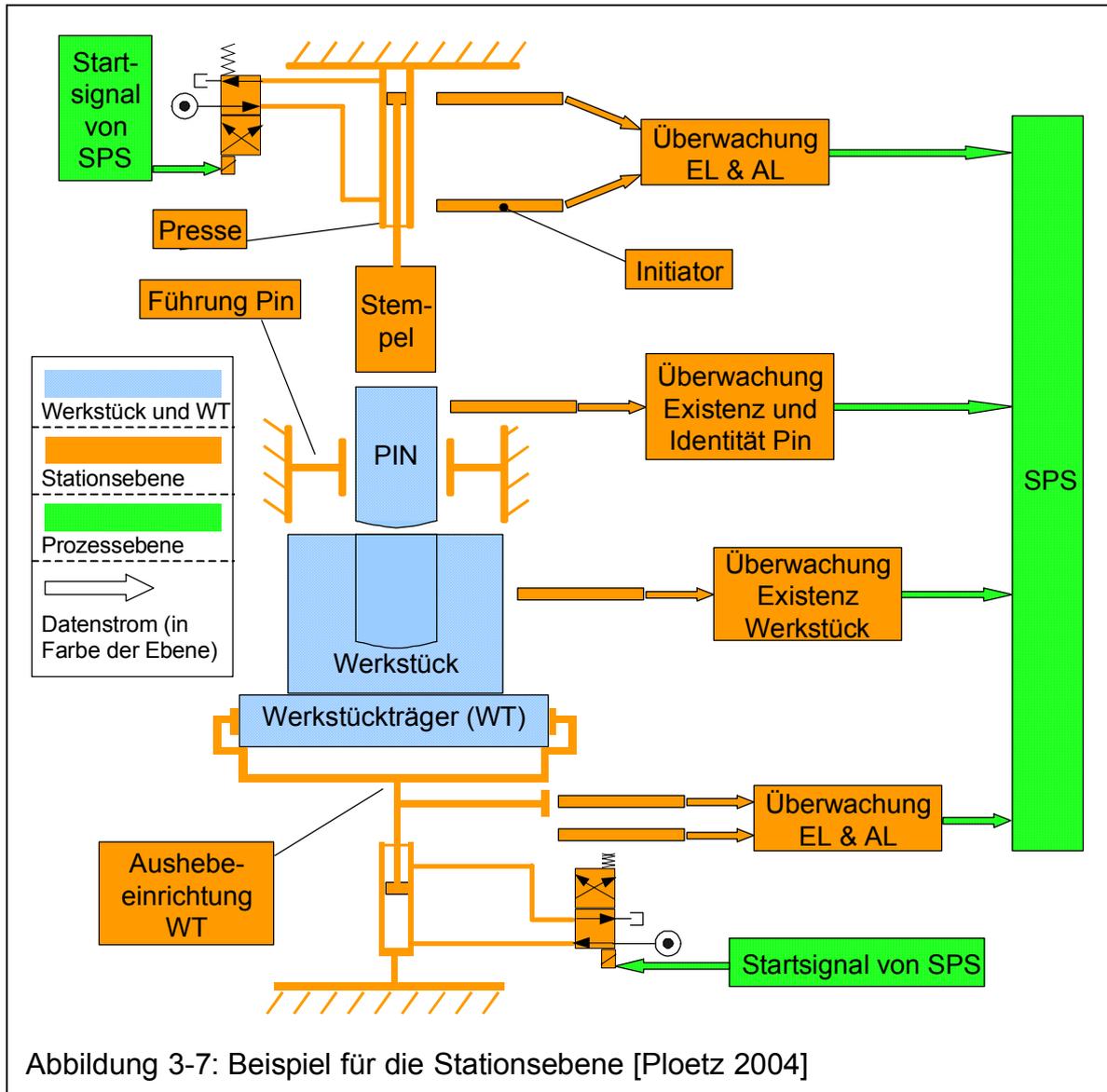
Die Messebene (Messkette) betrachtet die Messsignal-Erfassung, -Weiterleitung, -Verstärkung, -Bewertung und die Aufzeichnung von Messdaten zur Qualitätsregelung. Komponenten der Messebene sind der Messwertaufnehmer, das Kabel und der Messverstärker zur Signalübertragung und -verstärkung sowie der Messcomputer zur Signalbewertung (Abbildung 3-4). Am Messrechner befindet sich eine Schnittstelle zum Signalaustausch mit der Maschinensteuerung. Maschinensteuerung und Messrechner sind in der Regel als Master-Slave Verbindung aufgebaut. Durch einen Startbefehl der Maschinensteuerung wird der Messprozess ausgelöst und die Messkette liefert nach Beendigung der Messung ein Antwortsignal (Gut, Ausschuss, Nacharbeit) an die Maschinensteuerung zurück. Diese Information wird werkstückbezogen in der Prozessebene gespeichert und zur Sortierung der Werkstücke verwendet.



In Abbildung 3-5 ist der Aufbau einer Messebene am Beispiel des Einpressens eines Stiftes dargestellt. Das Messsystem setzt sich aus einem Kraftaufnehmer und einem Längenmesssystem zusammen. Beide geben die aufgenommenen Messwerte an den Messcomputer weiter, welcher die Signale bewertet und der Maschinensteuerung die Ergebnisse übermittelt.



Aushebeeinrichtung des Werkstückträgers, eine Presse zum Einpressen eines Stiftes und die Führung des Stiftes. Die Überwachung von Ausgangs- und Endlagen der Bewegungen und die Überwachung der Existenz des Werkstückes erfolgt mithilfe von Initiatoren.



Beispiele für Komponenten der Stationsebene, die in AMPS zur Anwendung kommen, sind:

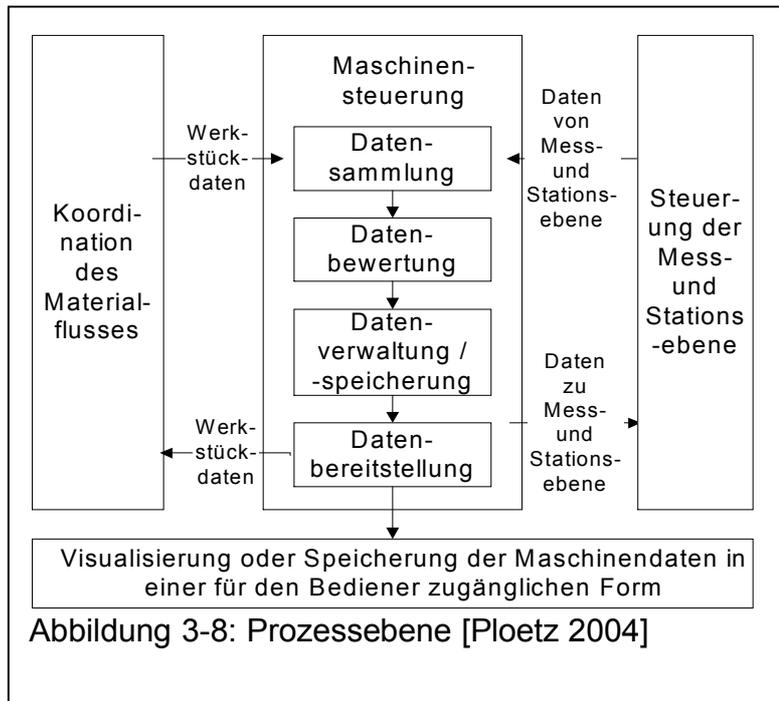
Aktoren: z. B. pneumatische, hydraulische Zylinder und Ventile, Servomotore, Pressen, Schrauber, Roboter, Drehzylinder, Greifer

Sensoren: z. B. Näherungsschalter (Initiatoren), Lichtschranken

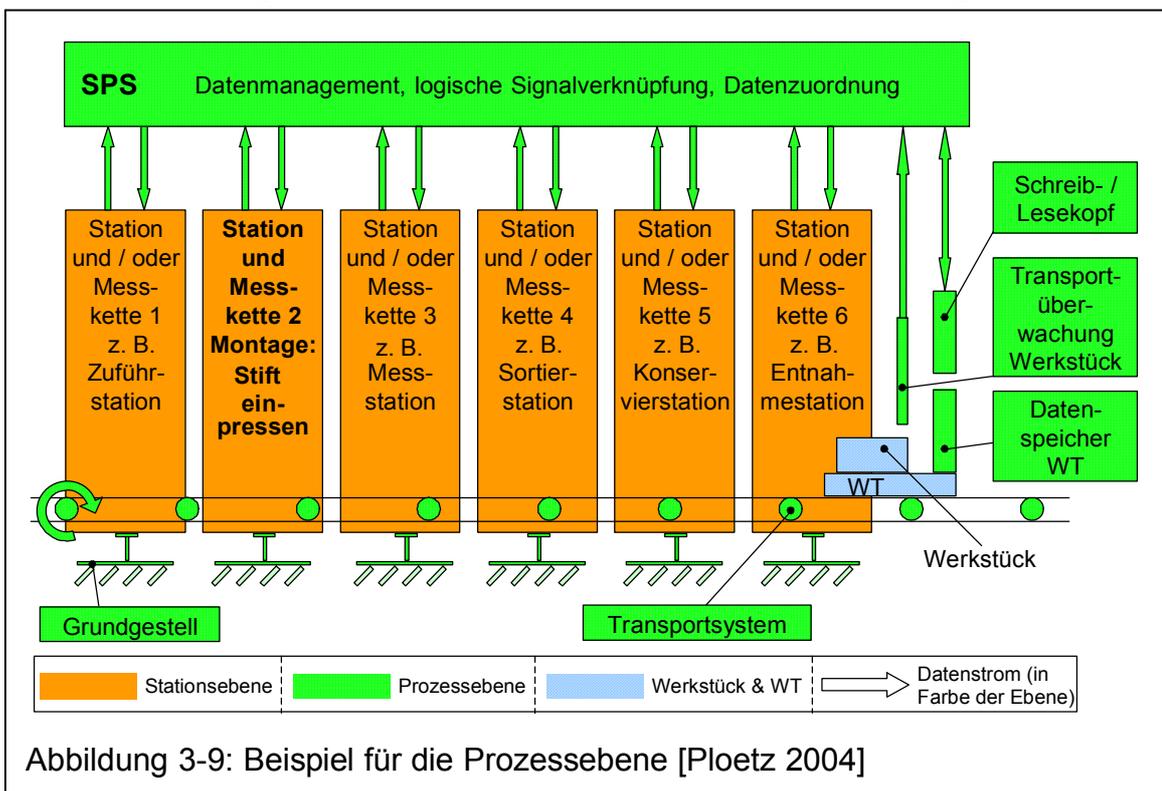
Mechanische Komponenten: z. B. Lineareinheiten, Axial- und Radiallager, Werkzeuge zur Bearbeitung, Getriebe (Über-, Untersetzung, Winkelgetriebe), Dämpfer, Kupplungen, Ketten, Riemen

### 3.2.3 Prozessebene

Die Prozessebene betrachtet alle auswertenden, bewertenden und steuernden Maßnahmen. Sie übernimmt die Verwaltung, Speicherung und Bereitstellung der Daten. Weiterhin wird der Prozessebene das Grundgestell und der Materialfluss zugerechnet (Abbildung 3-8). Zum einen werden die aufbereiteten Daten zur internen Steuerung der Mess- und Stationsebene genutzt, zum anderen werden die Maschinendaten dem Bediener mithilfe von Ausgabege-



räten zugänglich gemacht. Zur Steuerung des Materialflusses ist die Position und der Bearbeitungszustand des Werkstückes während des Prozesses bekannt. Dazu erfolgt entweder eine Datensammlung in der SPS oder auf dem Werkstückträger befindet sich ein Datenspeicher, der mithilfe eines Schreib- und Lesekopfes gelesen und beschrieben werden kann (Abbildung 3-9).



Beispiele für Komponenten der Prozessebene sind:

Hardware und Software der Maschinensteuerung, Bussystem (z. B. Profibus), Verkabelung, Leistungsteile, Schreib- und Lesesysteme

### 3.2.4 Manuelle Eingriffs-Ebene (Rüst- und Instandhaltungsebene)

Die Ebene des manuellen Eingriffs beinhaltet alle Maßnahmen, welche das Rüsten und Instandhalten ermöglichen oder unterstützen. Im Gegensatz zu den automatischen Abläufen in der Mess-, Stations-, und Prozessebene umfasst die Rüst- und Instandhaltungsebene ausschließlich manuelle Prozesse.

### 3.2.5 Schnittstellenabgrenzung und Strukturmatrix

#### Schnittstellenabgrenzung

In der Mess- und Prozessebene werden überwiegend komplexe elektrische und elektronische Komponenten sowie Software eingesetzt.

Die Stationsebene besteht überwiegend aus mechanischen sowie elektrischen Komponenten. Die Abgrenzung zur Messebene stellen die Werkzeuge, die Abgrenzung zur Prozessebene stellen Steuerelemente, wie z. B. pneumatische und hydraulische Ventile, dar.

In der folgenden Analyse des Fehlerpotenzials werden Werkzeuge und Ventile der Stationsebene zugeordnet (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Übersicht der Funktionsbereiche und Schnittstellendefinition

Messebene (Messkette)	Werk- zeuge	Stationsebene	Steuer- elemente	Prozess- ebene
Überwiegend komplexe elektrische und elektronische Komponenten sowie Software	für Mess- und Montageaufgaben	Überwiegend komplexe mechanische und einfache elektrische Komponenten	z. B. pneumatische und hydraulische Ventile	Überwiegend komplexe elektrische und elektronische Komponenten sowie Software

#### Strukturmatrix

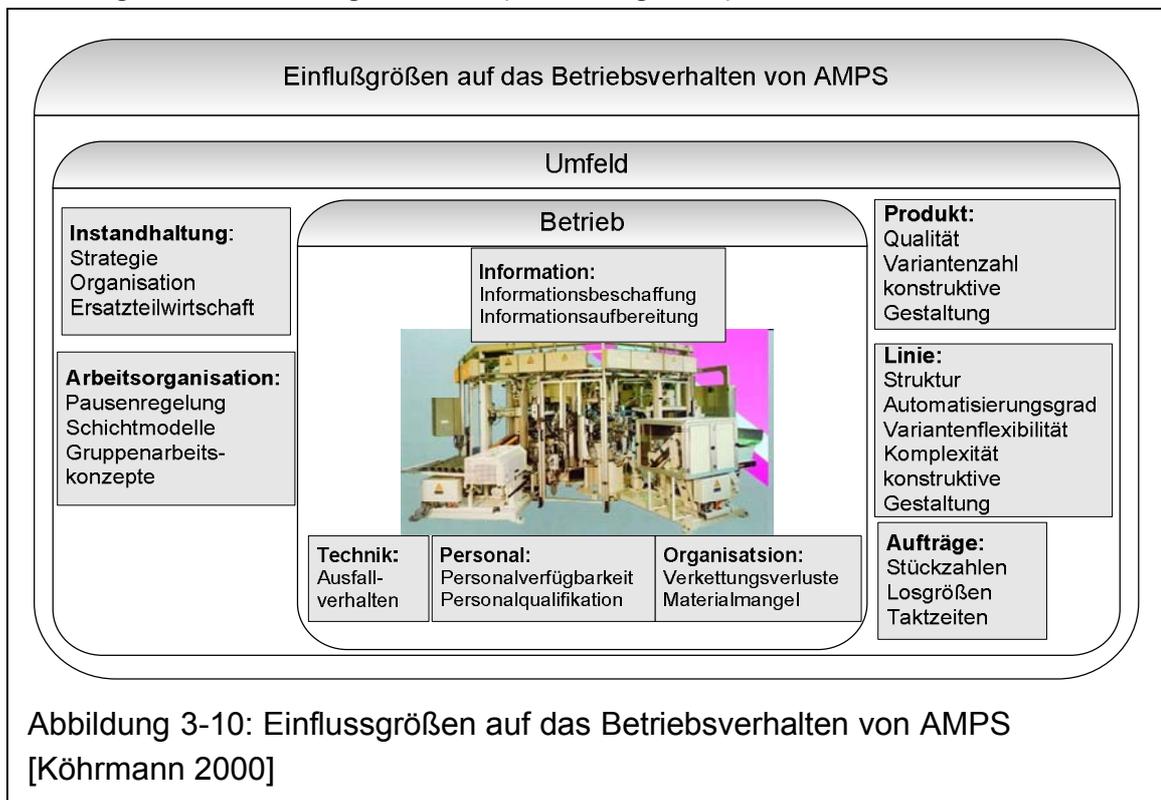
In der Strukturmatrix werden den Komponenten von AMPS (Handling-, Montage- und Prüfkomponten) Funktionsebenen zugeordnet. Alle Komponenten beinhalten die Funktionsebenen Station und Prozess sowie die Abläufe des manuellen Eingriffs. Ist in der Montagestation zusätzlich eine Messkette zur In-Prozess Überwachung integriert, trifft die Funktionsebene Messkette ebenfalls auf die Montagekomponenten zu. Diese Gliederung ist die Grundlage der folgenden Analyse des Fehlerpotenzials von AMPS.

Tabelle 3-2: Strukturmatrix

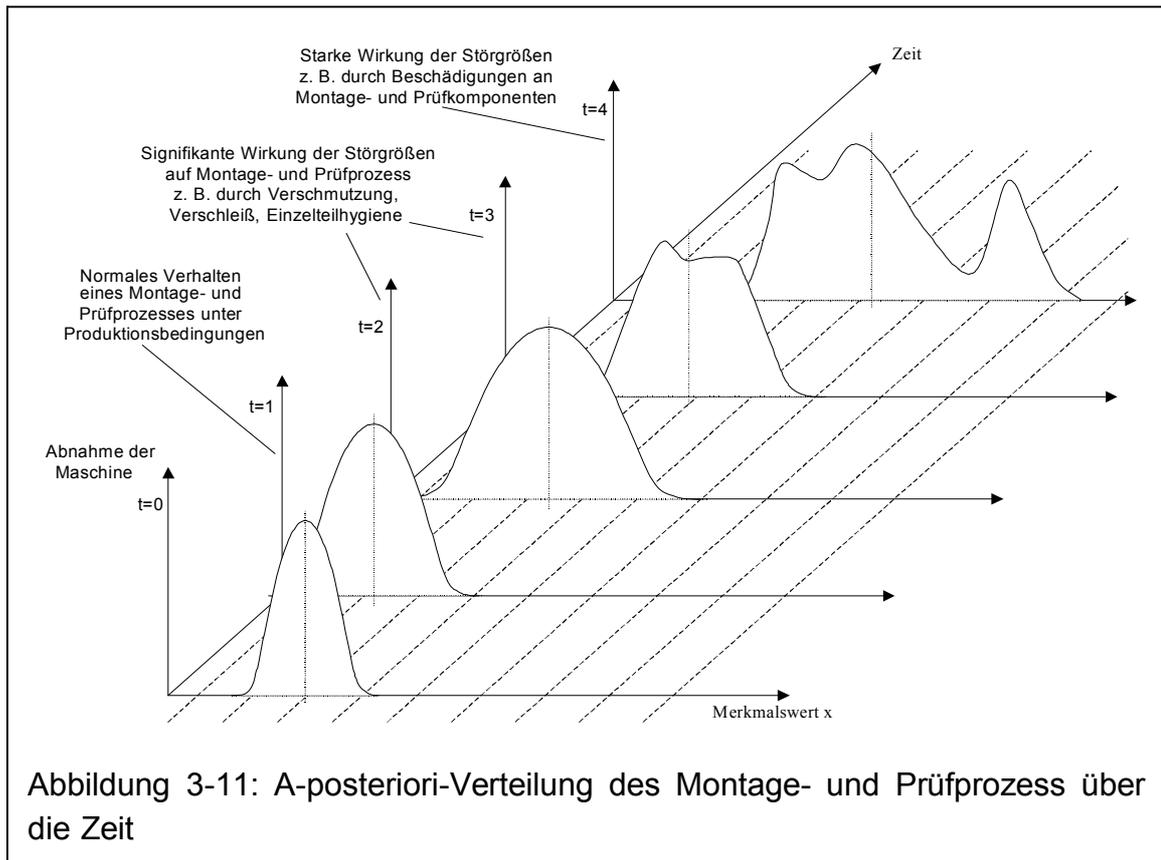
Funktionsebene		Mess- kette	Station	Prozess	Man. Eingriff
Komponente					
Prüfkomponente (Pre- und Post-Prozess)		x	x	x	x
Montage- komponente	mit In-Prozess Messung	x	x	x	x
	ohne In-Prozess Messung		x	x	x
Handhabungskomponente			x	x	x

### 3.3 Analyse des Fehlerpotenzials von AMPS

Eine Herausforderung in der Montagetechnik ist die hohe Anzahl der auf den Montageprozess einwirkenden Einflussfaktoren. Durch „...das Zusammenspiel der Toleranzen zwischen den einzelnen Bauteilen...“ [Reiter 1998, S. 4], Chargenunterschieden, Kräften und Momenten des Montagevorgangs, entsteht ein oft nur schwer zu durchschauendes Zusammenspiel der einzelnen Einflussgrößen. Laut Wendt kann die Montage daher „...als Sammelbecken aller Fehler der Vorstufen bezeichnet werden...“ [Wendt 1992, S. 3]. Daher müssen bei der Analyse der Fehlermöglichkeiten und Fehlerursachen alle denkbaren Problemstellungen berücksichtigt werden (Abbildung 3-10).



Die Einflussgrößen verursachen ein dynamisches Verhalten des Montage- und Prüfprozesses. Zum Zeitpunkt der Erstabnahme ( $t=0$ ) und kurz danach ( $t=1$ ) steht ein neues AMPS zur Verfügung und die Qualität der zugeführten Einzelteile wird überwacht. Im weiteren Verlauf ( $t=2$  bis  $t=4$ ) verändern sich die Einflussgrößen und bewirken eine Veränderung der Streuung des Montageprozesses sowie eine Veränderung der Messunsicherheit und damit eine Veränderung des Messprozesses. Montage- und Messprozessverteilung falten sich zur sogenannten a-posteriori-Verteilung (Abbildung 3-11) [Wisweh 1987, S. 23].



Die Analyse des Fehlerpotenzials wurde einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) angelehnt. In Anhang A werden Fehlerketten mit Fehlerursache, Fehler und Fehlerfolge sowie Maßnahmen zur Fehlererkennung dargestellt. Die Vielzahl der Fehlermöglichkeiten lassen sich jedoch zu finalen Fehlern zusammenfassen.

### 3.4 Zusammenfassung der Fehlermöglichkeiten zu finalen Fehlern in den Funktionsbereichen

Fehler in AMPS sind als Knoten in einem Ursache–Wirkungs–Netz zu verstehen, wobei eine Fehlerursache einen Fehler erzeugt, welcher wiederum Ursache für weitere Fehler sein kann. Wirkt sich ein Fehler im betrachteten Modell nicht mehr weiter aus, so kann dieser als finaler Fehler bezeichnet werden.

In AMPS kann auf fünf finale Fehler geschlossen werden [Hofmann 1990, S. 53f]:

- Ausschuss oder zur Nacharbeit bestimmte Baugruppen werden an den Kunden ausgeliefert,
- Erhöhung des internen Fehleranteils (Ausschuss oder Nacharbeit),
- Stillstand der Produktionsanlage,
- Schädigung der Produktionsanlage und
- verminderter Ausstoß der Produktionsanlage.

Alle weiteren denkbaren Fehler führen zu einem dieser finalen Fehlerfolgen. Aus der Vielzahl der möglichen Fehlerketten, die im Anhang A dargestellt sind, lassen sich folgende finale Fehler ableiten:

Tabelle 3-3: Finale Fehler im Funktionsbereich Messebene (Messkette)

<b>Finaler Fehler</b>	<b>Ursache</b>	<b>Folge</b>
Messwert liegt knapp außerhalb der Produktionstoleranz	Messunsicherheit an Toleranzgrenzen, Messsystem nicht korrekt justiert, Kalibrierfehler	Teil wird in AA, NA sortiert
		Teil wird in eine Nachbargutgruppe einsortiert
Messwert liegt außerhalb der Funktionstoleranz	grober Messfehler durch grobe Störfaktoren (z. B. Verschmutzung, Werkzeugbruch)	Teil wird in AA, NA sortiert
		Teil wird in eine entfernte Gutgruppe sortiert
Messsystem verschleißt oder ist beschädigt	Umwelteinfluss auf Messung, Gebrauchsspuren; Verschleiß, Überlast	Messunsicherheit steigt, z. B. Erhöhung der Streuung, Trend, AA-, NA-Anteil steigt
Messwertaufnehmer fällt aus, kein Messsignal	Taster fest, Kabel, Taster defekt	alles N.i.O.
		N.i.O. wird gut oder andere Gutgruppe
Sehr hohe Messunsicherheit	Grobe Umwelteinflüsse, elektromagnetische Einflüsse, falscher Taster	Scheinausschuss
		N.i.O. wird gut

Tabelle 3-4: Finale Fehler im Funktionsbereich Stationsebene

<b>Finaler Fehler</b>	<b>Ursache</b>	<b>Folge</b>
Antriebseinheit beschädigt	Stromversorgung unterbrochen, Druckluftabfall	Endlage wird nicht erreicht, unvollständige Montage
Werkzeugbruch, Werkzeugverschleiß	Werkzeugwechselperiode zu lang	Gut wird N.i.O.
		N.i.O. wird gut
Initiator sendet falsches Signal	Initiator ist verstellt oder beschädigt, elektromagnetische Störungen	Keine Erkennung von Zuständen oder Bauteilen mehr möglich
falsche Teile montiert, fehlerhafte Fixierung bzw. Positionierung	keine sichere Handhabung der Teile, unebene Auflageflächen z. B. durch Verschmutzung	nächster Montageschritt kann nicht oder nur fehlerhaft ausgeführt werden
AA-, NA-Teil wird als Gutteil in Folgeteil verbaut	Fehler wurde vor Weiterbearbeitung nicht erkannt	Folgeteil fehlerhaft

Tabelle 3-5: Finale Fehler im Funktionsbereich Prozessebene

<b>Finaler Fehler</b>	<b>Ursache</b>	<b>Folge</b>
Teil durch Prüfsystem richtig bewertet, aber SPS oder Mechanik sortiert falsch	Zuordnung Teile-Daten in SPS falsch oder Sortiermechanik beschädigt bzw. falsch justiert	N.i.O. wird gut
AA-, NA-Teil wird in die Menge der Gutteile sortiert	Fehler im Ablauf oder Sonstiges	Teil wird an internen Kunden geliefert
		Teil wird an externen Kunden geliefert - Reklamation
Zu viele N.i.O.-Teile	Fehlerhafte Einzelteile oder Montage	Häufung von N.i.O., N.i.O.-Speicher läuft über
Unbekannter N.i.O.-Grund	N.i.O.-Ursache nicht zuordenbar	Fehlerursachen schwierig zu finden

Tabelle 3-6: Finale Fehler im Funktionsbereich Manuelle Eingriffs-Ebene

<b>Finaler Fehler</b>	<b>Ursache</b>	<b>Folge</b>
Falsche Komponenten, Steuer- oder Mess-Programm gerüstet	Menschliches Versagen, ungenügende Arbeitsanweisung, komplexer Rüstvorgang	Produktion läuft mit falschem Prüfprogramm
Bauteile fallen herunter oder werden entnommen	manueller Eingriff, Fehler im automatischen Ablauf	ungeprüfte oder halbfertige Teile verseuchen Gutteile
Referenzteile verbleiben im Arbeitsbereich	Unachtsamkeit, Überlastung	Referenzteile werden verbaut

Damit aus einem Fehler nicht eine Vielzahl von Fehlerfolgen entsteht, ist es sinnvoll, das Fehler Ursache–Wirkung–Netz möglichst frühzeitig durch geeignete Maßnahmen der Fehlererkennung zu unterbrechen. Im nächsten Kapitel werden Methoden der Fehlererkennung vorgestellt.

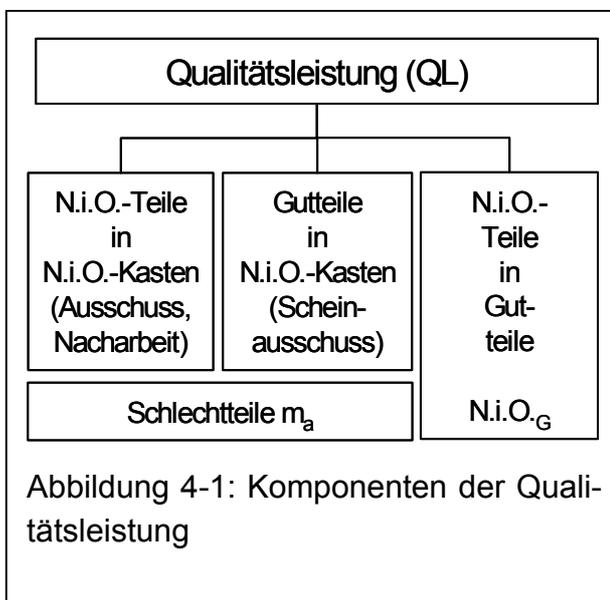
## 4 Methoden der Fehlererkennung zur Steigerung der Qualitätsleistung von automatisierten Montage- und Prüfsystemen

Das vorausgehende Kapitel hat Fehlerketten (Ursache, Fehler, Fehlerfolge) in AMPS beschrieben. Fehlerketten führen in AMPS häufig zu finalen Fehlern, die sich zwar nicht weiter ausbreiten, aber einen erheblichen Schaden zur Folge haben können. Durch die im Folgenden dargestellten Methoden der Fehlererkennung werden die Fehlerketten frühzeitig unterbrochen und die finalen Fehler vermieden. Ansatzpunkt ist:

Vermeidung der finalen Fehler durch frühzeitige Fehlererkennung.

In sicherheitsrelevanten Bereichen der Technik (z. B. Flugzeugbau, Kraftwerkstechnik) werden Methoden wie Redundanz und Selbsttest bereits eingesetzt. Die Systematisierung und Erweiterung dieser Methoden zur Verbesserung der Fehlersicherheit von AMPS ist eine Ergänzung des vorhandenen Wissens.

### 4.1 Überblick und Definition



Die Qualitätsleistung von automatisierten Montage- und Prüfsystemen (AMPS) setzt sich aus dem Anteil der Schlechteile (N.i.O.-Teile) in Form von Ausschuss und Nacharbeit, dem Anteil der Gutteile in der Menge der Schlechteile (Scheinausschuss) sowie dem Anteil der Schlechteile in der Menge der Gutteile zusammen (vgl. Kapitel 2). Durch eine verbesserte Fehlererkennung bei der Montage und Prüfung können Schlechteile erkannt und ausgeschleust werden.

#### Definition Fehlererkennung:

Analyse eines AMPS mit manuellen oder automatischen Methoden, um eine Abweichung des Istzustandes vom Sollzustand festzustellen.

Während die manuellen Methoden der Fehlererkennung (z. B. Kalibrierung, Justage, Vergleichsmessung mit Referenzteilen) eine zeitliche Verzögerung zwischen Fehlerauftreten und Fehlererkennung aufweisen und somit eine grö-

ßere Anzahl von Schlechtteilen unter dem Einfluss des Fehlers produziert wird, zeichnen sich automatische Methoden dadurch aus, dass entweder sofort nach Fehlereintritt oder in einem kurzen zeitlichen Abstand danach der Fehler erkannt wird. Systeme mit integrierten automatischen Methoden zur Fehlererkennung, werden in dieser Arbeit als „*eigensichere oder auch fehlersichere Systeme*“ bezeichnet, da sie in der Lage sind, Fehler selbstständig zu erkennen.

**Definition Fehlersicherheit bzw. Eigensicherheit:**

Fähigkeit eines Montage- oder Prüfsystems Fehler sofort nach ihrem Auftreten oder in einem kurzen zeitlich Abstand danach selbstständig zu erkennen.

Durch den Einsatz eigensicherer Montage- und Prüfsysteme lässt sich die Anzahl von Schlechtteilen reduzieren. Fehler werden frühzeitig erkannt und können abgestellt werden. Eine Fehlerfortpflanzung wird vermieden. Der Anteil von Ausschuss und Nacharbeit in der Montage wird minimiert und die Menge der Gutteile maximiert. Dies erhöht die Qualitätsleistung in der Montage.

Automatisierte Methoden der Fehlererkennung zur Gewährleistung von Eigensicherheit lassen sich wie folgt gliedern:

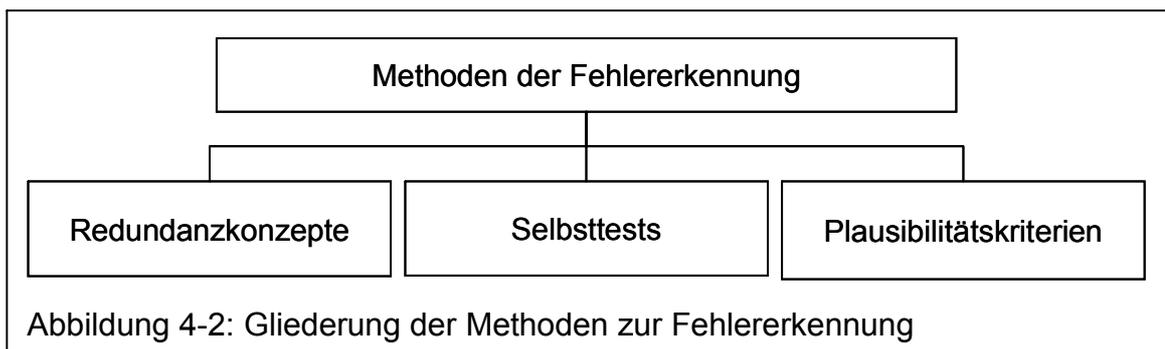


Abbildung 4-2: Gliederung der Methoden zur Fehlererkennung

**Notwendige Standards zur Fehlererkennung in AMPS**

Zum Betrieb moderner AMPS sind folgende Maßnahmen obligatorisch und werden im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter diskutiert.

Im Bezug auf das Werkstück bzw. Endprodukt:

- Überwachung der **Existenz** des Werkstückes,
- Überwachung der **Lage** (Position, Orientierung) des Werkstückes,
- Überwachung der **Identität** der im Prozess befindlichen Werkstücke,
- Überwachung der Werkstücke in Bezug auf **vorgegebene Merkmale** (z. B. Geometrie, Werkstoff, Härte) und
- Überwachung der **Funktionsfähigkeit** des Endproduktes.

Notwendige Überwachungen im Prozess sind:

- Überwachung der **Ausgangs- und Endlagen** von Bewegungen,
- Überwachung von **Prozesskenngrößen** (z. B. Einpresskräfte) und
- Überwachung der **Funktionsfähigkeit aller Betriebsmittel** des Prozesses (nächster Schritt darf nicht ausgeführt werden, wenn kein Signal des vorherigen Schrittes erfasst wurde).

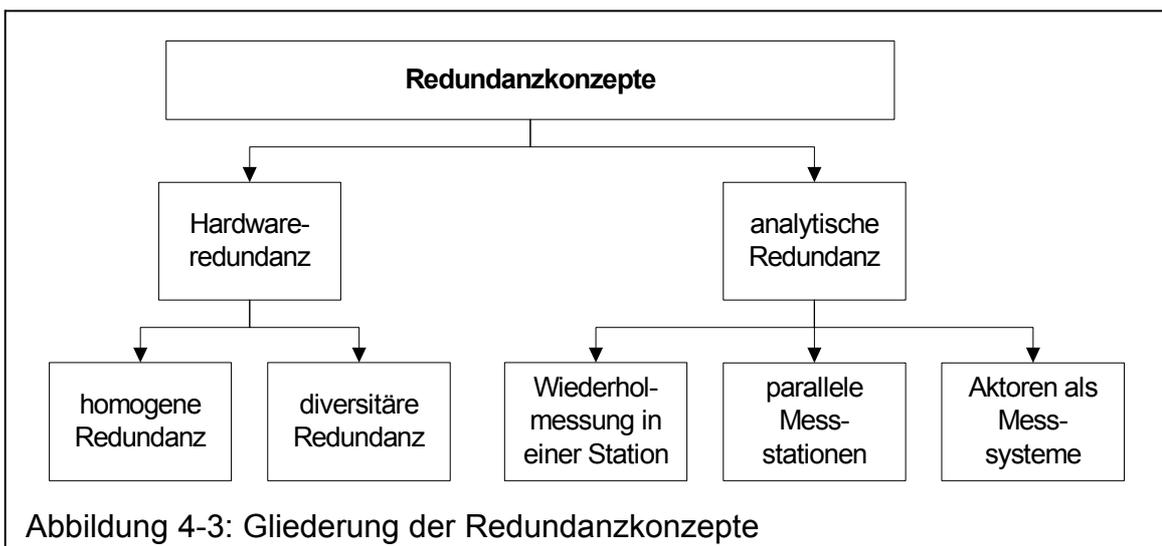
## 4.2 Redundanzkonzepte

Redundante Systeme werden in vielen Bereichen der Industrie eingesetzt. Sie dienen der Steigerung der Ausbringungsmenge, zur Schaffung eines Systems welches sicher bei Ausfall ist, zur Steigerung der Verfügbarkeit und zur Erhöhung der Fehlersicherheit [Biolini 2004]. Dabei sind für fehleranfällige oder unsichere Prüfkomponenten Prüfsysteme mehrfach, in der Regel zweifach<sup>1</sup>, vorhanden [Langmann 2003, S. 524].

### Definition Redundanz

„Vorhandensein von mehr funktionsfähigen Mitteln in einer Einheit, als für die Erfüllung der geforderten Funktion notwendig sind“ [DIN 40041 1990, S. 9].

Die Steigerung der Fehlersicherheit durch Redundanz bezieht sich auf die Vermeidung oder Erkennung von Fehlern von Überwachungseinrichtungen. Dabei kann die Redundanz in Hardware-Redundanz und analytische Redundanz unterschieden werden.



<sup>1</sup> Im Gegensatz zu sicherheitsrelevanten Systemen, z. B. im Flugzeugbau oder in der Kernkrafttechnik, bei denen eine dreifache Redundanz üblich ist, genügt in der Automatisierungstechnik die Absicherung durch ein zweites System.

### 4.2.1 Hardwareredundanz

Hardwareredundanz lässt sich in homogene Redundanz, „...bei der alle Mittel gleichartig sind...“ und diversitäre Redundanz, „...bei der die Mittel ungleichartig sind...“ unterscheiden [DIN 40041 1990, S. 10].

Dies bedeutet, dass bei der homogenen Redundanz die gleiche Funktion und das gleiche Wirkungsprinzip, bei der diversitären Redundanz die gleiche Funktion aber ein anderes Wirkungsprinzip vorliegen. Die homogene Redundanz birgt die Gefahr, dass sich durch die gleiche Bauform und das gleiche Wirkprinzip bestimmte Einflüsse auf alle redundanten Systeme gleichermaßen auswirken. Diese Art von Fehler wird als „common mode failure“ bezeichnet. Werden Systeme mit diversitärer Redundanz eingesetzt, ist wegen der verschiedenen Wirkungsweisen darauf zu achten, dass die Ergebnisse der einzelnen Systeme miteinander vergleichbar sind.

In Tabelle 4-1 wird die **homogene Hardwareredundanz** beispielhaft in einer Montagestation und in Tabelle 4-3 in einer Messstation dargestellt. Beide Anwendungen basieren auf der Berechnung und Bewertung der Differenz der Messergebnisse. Die maximal zulässige Differenz ist die Grundlage zur Festlegung der Eingriffsgrenzen für die Differenz-Regelkarte und ist abhängig von der Unsicherheit des Messsystems (Abbildung 4-4).

In der Montagestation läuft ein irreversibler Prozess (z. B. Stift einpressen) ab. Hier muss die Messunsicherheit für die Kraft- und Wegmessung (z. B. nach GUM Verfahren B) theoretisch abgeschätzt und danach die Eingriffsgrenzen für die Differenz der Kraft-Weg Aufzeichnung (+/- erweiterte Messunsicherheit U) festgelegt werden. In der Praxis empfiehlt sich eine empirische Vorgehensweise, bei der in einem Vorlauf das typische Verhalten des Montageprozesses anhand von ca. 100 Montagevorgängen (ähnlich Maschinenfähigkeit vgl. Kapitel 2) bestimmt wird. Mit diesem Ergebnis wird die maximal zulässige Kraft-Differenz festgelegt.

In der Messstation erfolgt die Bestimmung der Messunsicherheit auf Basis von Versuchen. Mithilfe der Messunsicherheitskomponenten wird die maximal zulässige Differenz der beiden Messstationen bestimmt (vgl. Anhang D). Die Vorgehensweise bei der Berechnung wird im Folgenden dargestellt.

Bei **diversitärer Redundanz** in der Montage- oder Messstation unterscheiden sich die Messwertaufnehmer und/oder die Messprinzipien.

Im Beispiel der Montagestation Spindelpresse wäre es denkbar, dass ein Kraftaufnehmer nach dem piezoelektrischen Wirkprinzip arbeitet, und der andere mit Dehnungsmessstreifen (DMS) bestückt ist.

Im Beispiel der Messstation könnte sich das Wirkprinzip der zweiten Messung von dem der ersten unterscheiden. Zum Beispiel könnte das Messobjekt anders geführt, oder der Taster nicht unten, sondern oben angeordnet sein.

Während in der Sicherheitstechnik diversitäre Redundanz zur Erkennung von common mode Fehlern angestrebt wird, ist sie in der Montagetechnik weniger zu empfehlen. Ein wesentlicher Grund liegt darin, dass durch die unterschiedlichen Mess- und Wirkprinzipien sich unterschiedliche Messunsicherheiten ergeben. Dies hat zur Folge, dass die maximal zulässige Differenz größer wird, was eine unnötige Verschlechterung der Fehlererkennung zur Folge hat.

Ein Nachteil dabei ist, dass dadurch „common mode failure“ (z. B. falsches Referenzteil für beide Stationen verwendet) nicht erkannt werden. Im weiteren Verlauf wird dargelegt, dass Maßnahmen zur Fehlererkennung zu Algorithmen gebündelt werden müssen, um die optimale Eigensicherheit zu gewährleisten. Dabei wird verdeutlicht, dass zur Erkennung der „common mode failure“ andere Maßnahmen (z. B. Kalibrierwertregelkarte siehe 4.4.1) besser geeignet sind.

Tabelle 4-1: Homogene Hardwareredundanz in einer Montagestation

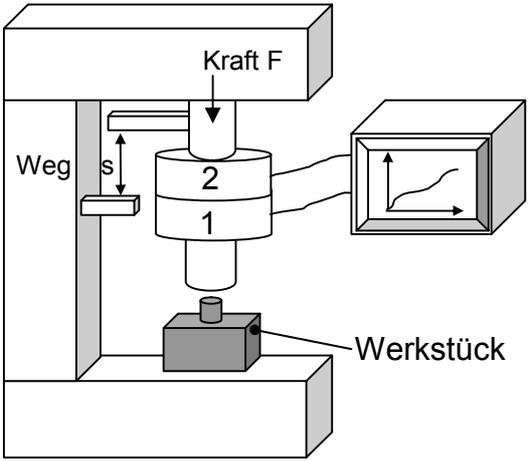
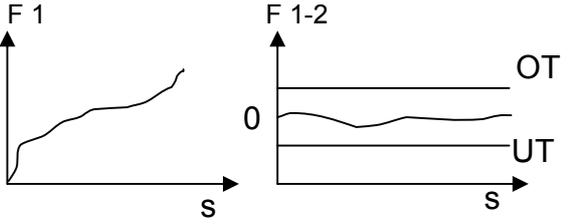
<p><b>Aufbau und Prinzip:</b> In einer Montagestation sind zwei Messwertaufnehmer (1 und 2) eingebaut, die dasselbe Merkmal mit demselben Messprinzip erfassen.</p>	 <p>The diagram shows a vertical assembly. At the top, a box labeled 'Kraft F' (Force F) has a downward arrow. Below it is a cylindrical sensor labeled '2'. A horizontal line with an upward arrow labeled 'Weg s' (Displacement s) indicates the movement of the sensor. Below sensor '2' is another cylindrical sensor labeled '1'. At the bottom is a rectangular 'Werkstück' (Workpiece). To the right, a small graph shows a curve rising and then leveling off, representing the measurement signal.</p>
<p><b>Auswertung:</b> Der erste Messwertaufnehmer (1) dient der Merkmalsbewertung (im Beispiel Kraft). Das Messergebnis des zweiten Messaufnehmers dient der Differenzbildung (z. B. 1-2) und wird zur Überwachung des Messsignals verwendet. Das Ergebnis muss innerhalb vorgegebener Grenzen (UT, OT) liegen.</p>	 <p>The left graph plots 'F 1' on the y-axis against 's' on the x-axis, showing a curve that rises and then levels off. The right graph plots 'F 1-2' on the y-axis against 's' on the x-axis. It shows a horizontal line at the top labeled 'OT' (Upper Tolerance Limit), a horizontal line at the bottom labeled 'UT' (Lower Tolerance Limit), and a central horizontal line at '0'. A wavy line fluctuates around the '0' line, representing the difference signal.</p>
<p><b>Vorteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Zuverlässigkeit des Messsignals</li> <li>- Abweichungen werden sofort erkannt</li> <li>- Optimierung der Kalibrierzyklen ist möglich</li> <li>- Flexible, bedarfsgerechte Instandhaltung</li> </ul>	<p><b>Nachteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zusätzlicher Messwertaufnehmer</li> <li>- Zusätzlicher Messwerteingang im Messrechner</li> <li>- Zusätzlicher Platzbedarf</li> <li>- Gleiches Verschleißverhalten</li> <li>- Common mode failure werden nur bedingt erkannt.</li> </ul>

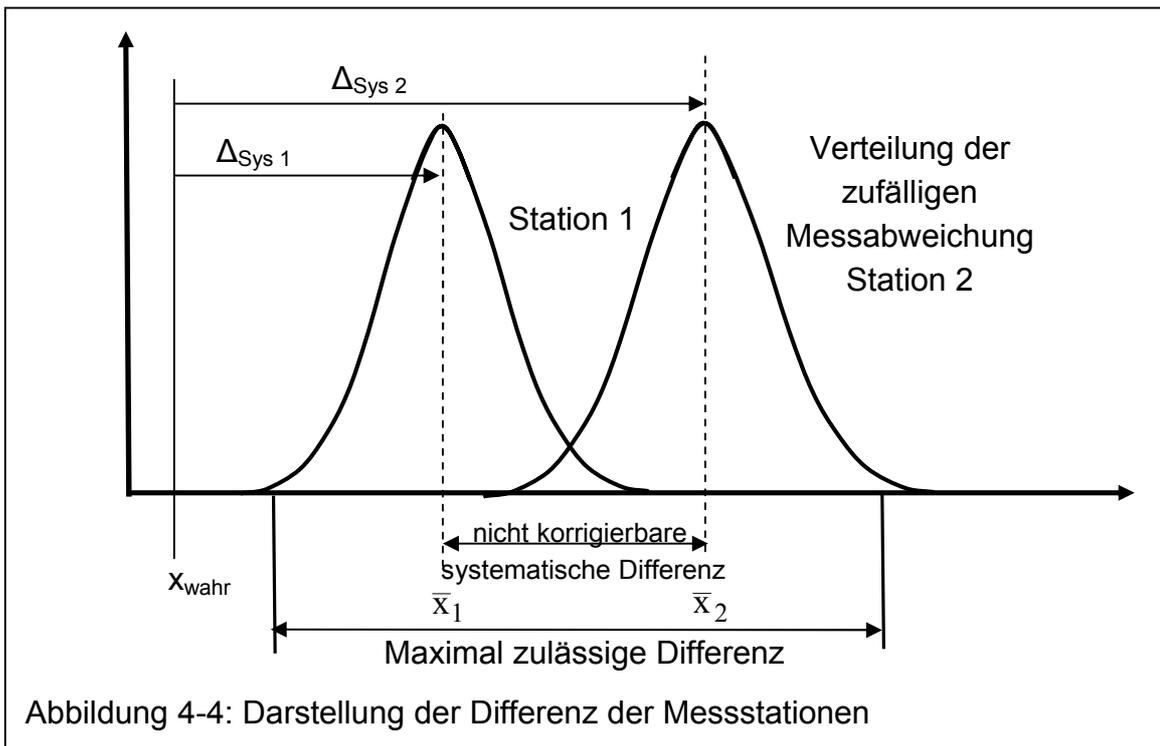
Tabelle 4-2: Diversitäre Hardwareredundanz in einer Montagestation (hier Spindelpresse)

<p><b>Aufbau und Prinzip:</b>                  In einer Montagestation sind zwei Messwertaufnehmer mit unterschiedlichem Wirkprinzip und /oder unterschiedlichem Einbauort integriert. Im Beispiel der Spindelpresse ist ein Absolutwegmesssystem im Antriebsmotor und ein inkrementales Wegmesssystem an der Spindel eingebaut; weiterhin ein Kraftaufnehmer (1) mit Dehnungsmessstreifen (DMS) sowie ein piezoelektrischer Kraftaufnehmer (2) direkt am (Einpress-) Werkzeug [Ploetz 2004, S. 57].</p>	
<p><b>Auswertung:</b>                  Die Differenz der Messaufnehmerpaare wird gebildet und mit einer zulässigen Differenz verglichen.</p>	
<p><b>Vorteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verschleiß in der Spindel- und Motormechanik wird erkannt.</li> <li>- Vorteile der DMS-Kraftmess-technik (geringe Messunsicherheit) werden mit den Vorteilen der piezoelektrischen Kraftmess-technik (hoher Überlastschutz) kombiniert.</li> <li>- Common mode failure (z. B. Überlast) werden erkannt.</li> </ul>	
<p><b>Nachteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zusätzlicher Messwertaufnehmer</li> <li>- Zusätzlicher Messwerteingang im Messrechner</li> <li>- Zusätzlicher Platzbedarf</li> </ul>	

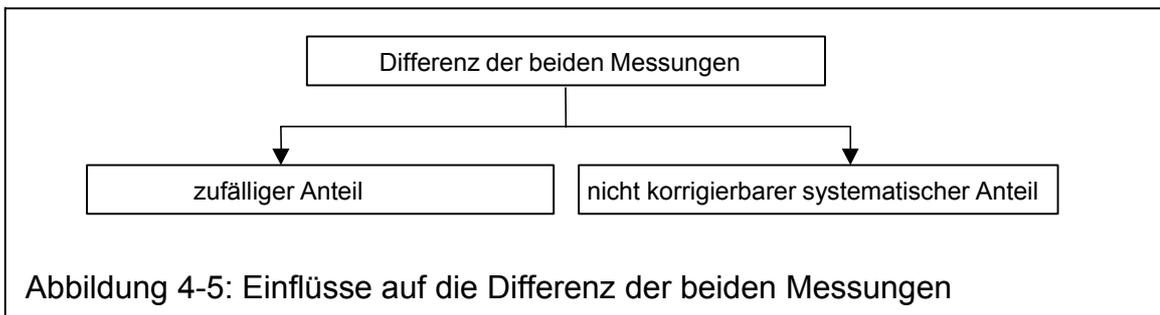
Tabelle 4-3: Homogene Hardwareredundanz in einer Längenmessstation

<p><b>Aufbau und Prinzip:</b> Das Merkmal wird zuerst in der ersten und dann in der zweiten Messstation gemessen. Das Wirkprinzip ist in beiden Messstationen gleich.</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><u>Messstation 1</u></p> </div> <div style="text-align: center;"> <p><u>Messstation 2</u></p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> </div>
<p><b>Auswertung:</b> Differenzbildung der beiden Messergebnisse (z. B. 1-2) und Bewertung als Maß für die Stabilität des Messergebnisses. Die Differenz muss innerhalb vorgegebener Grenzen liegen. Zur Bewertung des Merkmals kann das Messergebnis der Messstationen mit der kleineren Messunsicherheit verwendet werden. Sind die Messunsicherheiten gleich, was bei diesem Aufbau anzunehmen ist, so empfiehlt sich die Mittelwertbildung aus den beiden Messergebnissen. Dadurch kann die Unsicherheit des Messergebnisses zusätzlich reduziert werden (Wurzel <math>n^*</math> – Gesetz [Sandau 1999, S. 20]).</p>	<p><b>Nachteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zusätzliche Messstation</li> <li>- Zusätzlicher Messwerteingang im Messrechner</li> <li>- Zusätzlicher Platzbedarf in der Montageanlage</li> </ul>
<p><b>Vorteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Sicherheit des Messergebnisses</li> <li>- Abweichungen werden sofort erkannt</li> <li>- Optimierung der Kalibrierzyklen ist möglich</li> <li>- Flexible, bedarfsgerechte Instandhaltung</li> </ul>	<p><b>Zusätzliche Anforderungen:</b> Dieser Aufbau ist sehr empfindlich gegenüber Störgrößen (z. B. Verschmutzung). Deshalb muss der Ablauf zusätzlich abgesichert werden. Die Anzahl der aufeinander folgenden Schlechtbewertungen sollte überwacht werden. Es hat sich bewährt, nicht mehr als drei Ausschuss- oder Nacharbeitsbewertungen hinter einander zuzulassen (vgl. Kapitel 4.4.9 „Mehrmalige Schlechtbewertung in Folge“).</p>

**Berechnung der maximal zulässigen Differenz:**



Die Differenz setzt sich aus dem zufälligen und dem nicht korrigierbaren systematischen Anteil der Messunsicherheit zusammen (Abbildung 4-5).



Die maximal zulässige Differenz zwischen den Messergebnissen zweier redundanter Messsysteme (Hardwareredundanz) ermittelt sich zu:

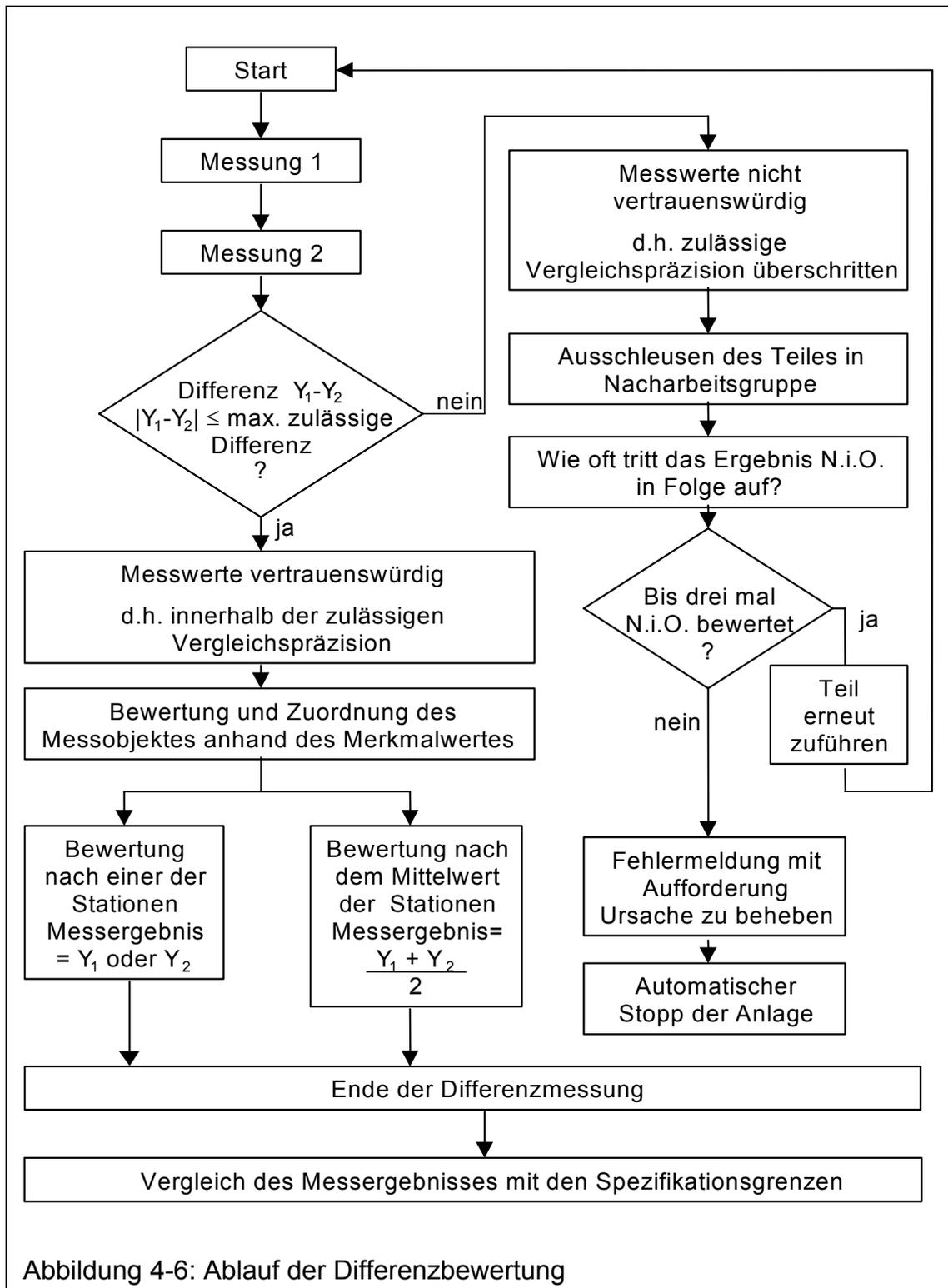
$ \Delta_{Max}  = k * u_{Zuf} +  \Delta_{Sys1} - \Delta_{Sys2}  \quad (4.1)$				
$\Delta_{Max}$	Maximal zulässige Differenz zwischen zwei unabhängigen Messstationen	k	$\alpha$	1- $\alpha$
$u_{Zuf}$	Zufälliger Anteil der Messunsicherheit (Anhang C)	2	5%	95%
$\Delta_{Sys}$	Systematischer Anteil der Messunsicherheit	3	0,27%	99,73%
k	Normalverteilungsquantil bei der Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha$	3,29	0,1%	99,9%
		5	0,00001%	99,9999%

Bei der praktischen Anwendung dieses Modells hat sich gezeigt, dass die sonst übliche quadratische Addition der systematischen Unsicherheitsanteile [DIN V ENV 13005 1999] zu einer maximal zulässigen Differenz führt, die zur Überwa-

chung des Differenzverlaufs zu klein ist. Deshalb werden die systematischen Anteile wie nicht korrigierbare Abweichungen behandelt und linear addiert [VDA 5 2003, S. 26]. Zur Berechnung des zufälligen Anteils siehe auch Anhang C.

Bedingung:

Beide Messsysteme müssen die Anforderungen der Prüfprozesseignung erfüllen. Der Nachweis für die Prüfprozesseignung kann mit verschiedene Methoden durchgeführt werden (siehe Gliederungspunkt 2.1.1).



In Abbildung 4-7 ist beispielhaft der Verlauf der Differenz zweier baugleicher Messstationen nach Tabelle 4-3 dargestellt

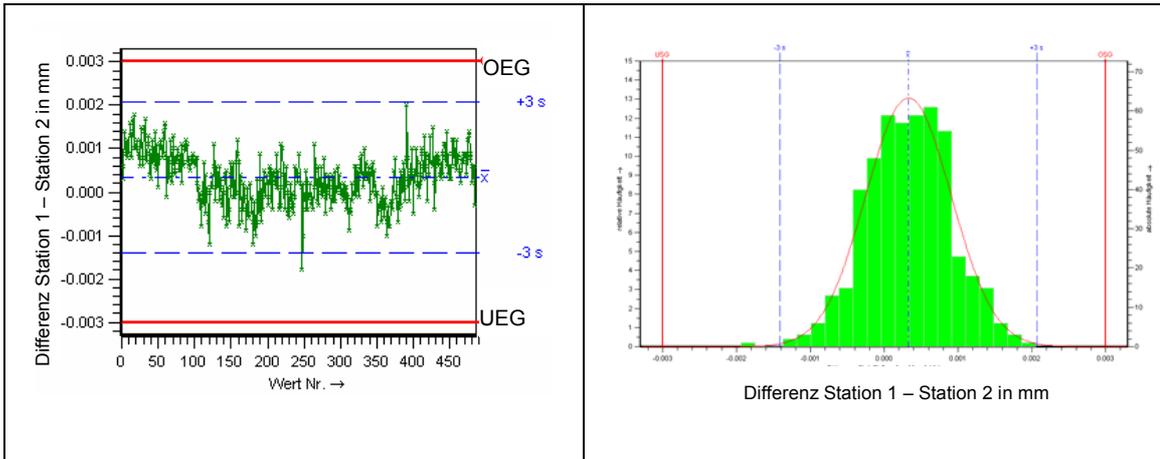


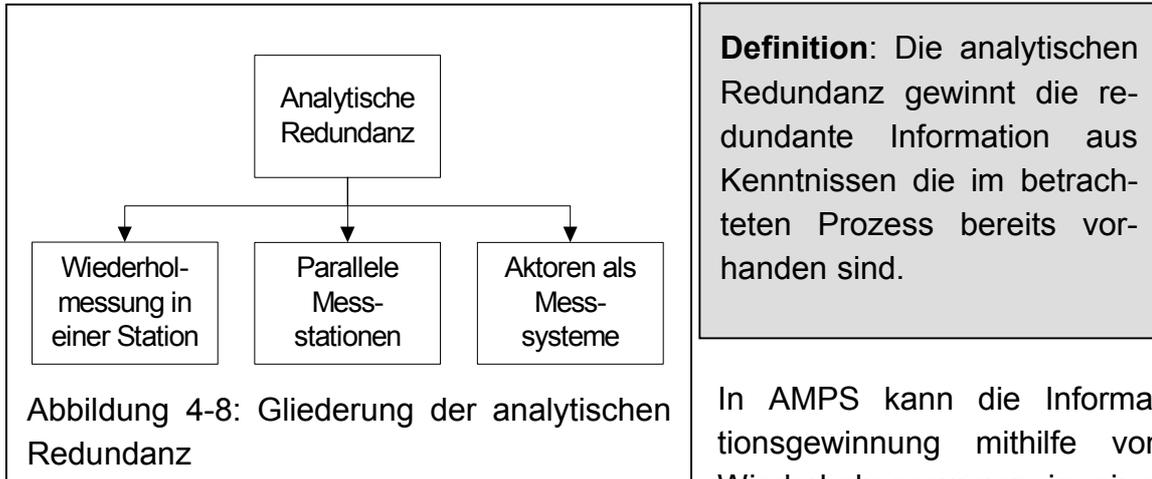
Abbildung 4-7: Beispiel für den Verlauf der Differenz bei homogener Hardware-redundanz

Tabelle 4-4: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der Hardware-redundanz

<b>Fehlersicherheit durch redundante sequenzielle Überwachungseinrichtungen</b>	
<b>Nachteile</b>	<b>Vorteile</b>
Investition: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhöhte Investition</li> <li>- Erhöhter Platzbedarf</li> <li>- Zusätzlicher Messkanal</li> </ul>	Qualitätsleistung und Fehlersicherheit: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prüfsysteme überwachen sich gegenseitig</li> <li>- Fehlmessungen eines Prüfsystems werden sicher erkannt</li> </ul>
Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit: <ul style="list-style-type: none"> <li>- erhöhte Bauteilanzahl</li> <li>- Komplexität des Gesamtsystems steigt</li> <li>- Zuverlässigkeit des Gesamtsystems sinkt in einem geringen Maß.</li> </ul> Vgl. dazu auch Kapitel 6.2 „Verfügbarkeitsverlust durch das Ausfallverhalten zusätzlicher Komponenten“.	Verfügbarkeit: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhöhte Verfügbarkeit durch Anheben des Kalibrierintervalls</li> <li>- Erhöhte Verfügbarkeit durch Verringerung des Überwachungsaufwands am Prüfsystem</li> <li>- Erhöhte Verfügbarkeit durch Verringerung des Wartungsintervalls</li> </ul>

### 4.2.2 Analytische Redundanz

Maßnahmen zur Fehlererkennung, die auf analytischer Redundanz beruhen, nutzen Informationen, die im Prozess schon vorhanden sind<sup>2</sup>. Dabei werden Daten, die ursprünglich zu anderen Zwecken generiert wurden, logisch miteinander verknüpft, so dass daraus Überwachungsinformationen abgeleitet werden können.



In AMPS kann die Informationsgewinnung mithilfe von Wiederholungsmessungen in einer

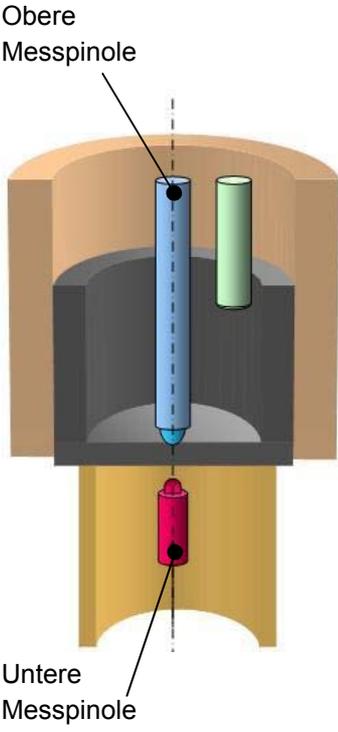
Station, baugleichen parallelen Messstationen oder Aktoren, die Messsignale liefern, erfolgen. Die Messwerte verschiedener Sensoren werden durch geeignete Algorithmen untereinander verglichen und überwacht [Wernz 1992, S.3].

#### 4.2.2.1 Wiederholungsmessungen in der Messstation

Zur Erhöhung der Sicherheit des Produktionsprozesses können Wiederholungsmessungen mit derselben Überwachungseinrichtung durchgeführt werden. Im Gegensatz zur Einzelmessung wird bei Wiederholungsmessungen und Mittelwertbildung die Messunsicherheit um den Faktor  $1/\sqrt{n^*}$  ( $n^*$  = Anzahl der Wiederholungsmessungen) verringert. Diese praktische Vorgehensweise dient der Reduzierung zufälliger Messabweichungen und wird auch als „ $\sqrt{n^*}$ -Gesetz“ bezeichnet [Sandau 1999, S. 20]. In Anhang C ist die Herleitung des  $\sqrt{n^*}$ -Gesetzes beschrieben. Die Wiederholungsmessung hat jedoch zur Folge, dass sich die Taktzeit um die Dauer von  $n^*-1$  Messungen erhöht. Weiterhin ergibt sich bei Wiederholungsmessungen das Problem, dass die folgenden Messungen den gleichen Bedingungen wie die Erstmessung unterliegen. Dies wirkt sich negativ aus, wenn z. B. die Messstation verschmutzt ist. Auch die zweite Messung wird wie die Erstmessung durch den Schmutz beeinflusst werden und ein fehlerhaftes Ergebnis liefern. Trotz dieser Nachteile ist die Wiederholungsmessung bei ausreichender Taktzeit als einfaches Instrument zur Fehlererkennung zu empfehlen.

<sup>2</sup> Die analytische Redundanz kann auch „...die redundante Information aus theoretischen Kenntnissen über den betrachteten Prozess...“ gewinnen [Prock 1989, S. 290]. Hierauf soll in dieser Arbeit aber nicht weiter eingegangen werden.

Tabelle 4-5: Wiederholmessung in einer Messstation

<p><b>Aufbau und Prinzip:</b> Die Messung des Merkmals wird bei Bedarf (nicht grundsätzlich) in derselben Messstation wiederholt. Dies ist dann sinnvoll, wenn das Messergebnis in der Nähe der Spezifikationsgrenze liegt und aufgrund der Messunsicherheit das Messergebnis zufällig zwischen „gut“ und „schlecht“ schwankt.</p>	<p style="text-align: center;"><u>Messprinzip</u></p> 
<p><b>Auswertung:</b></p> <p><b>1. Möglichkeit:</b> Liefert die erste Messung das Ergebnis „Aus-schuss oder Nacharbeit“ so wird die Messung wiederholt. Liefert die zweite Messung dasselbe Ergebnis, wird das Teil als Schlechttteil deklariert und ausgeschleust. Ist die zweite Messung „gut“, erfolgt die Bewertung Gutteil<sup>3</sup>.</p> <p><b>2. Möglichkeit:</b> Berechnung der Mittelwerte aus den beiden Messergebnissen. Dadurch kann der zufällige Anteil der Messunsicherheit reduziert werden. (Wurzel <math>n^*</math> –Gesetz).</p>	
<p><b>Vorteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduktion des Einflusses der Messunsicherheit</li> <li>- Erhöhung der Qualitätsleistung</li> <li>- Keine zusätzliche Messstation nötig</li> <li>- Wiederholmessung nur bei Bedarf</li> </ul>	<p><b>Nachteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Störungen wirken sich auf Erst- und Zweitmessung aus (Abhängigkeit)</li> <li>- Taktzeitschädlich</li> </ul>
<p><b>Bemerkung:</b> Eine andere Vorgehensweise hat sich bei Prüfmerkmalen bewährt, die durch Einlaufeffekte am Bauteil bei der zweiten Messung ein zuverlässigeres Ergebnis erwarten lassen. Z. B. bei der Geräuschprüfung von Wälzlagern wird bei der ersten Prüfung das Schmiermittel in der Laufbahn verteilt, bei der Wiederholprüfung erhält man deutlich stabilere (mit weniger Bauteileinfluss) Messergebnisse.</p>	

<sup>3</sup> Voraussetzung für diese Vorgehensweise ist, dass die Messunsicherheit des Messsystems zuvor im Sinne der DIN EN ISO 14253 (siehe Kapitel 2) an den Spezifikationsgrenzen abgezogen wurde. Dadurch wird gewährleistet, dass der wahre Wert des Merkmals mit der gewählten statistischen Sicherheit innerhalb der vereinbarten Spezifikationsgrenzen liegt.

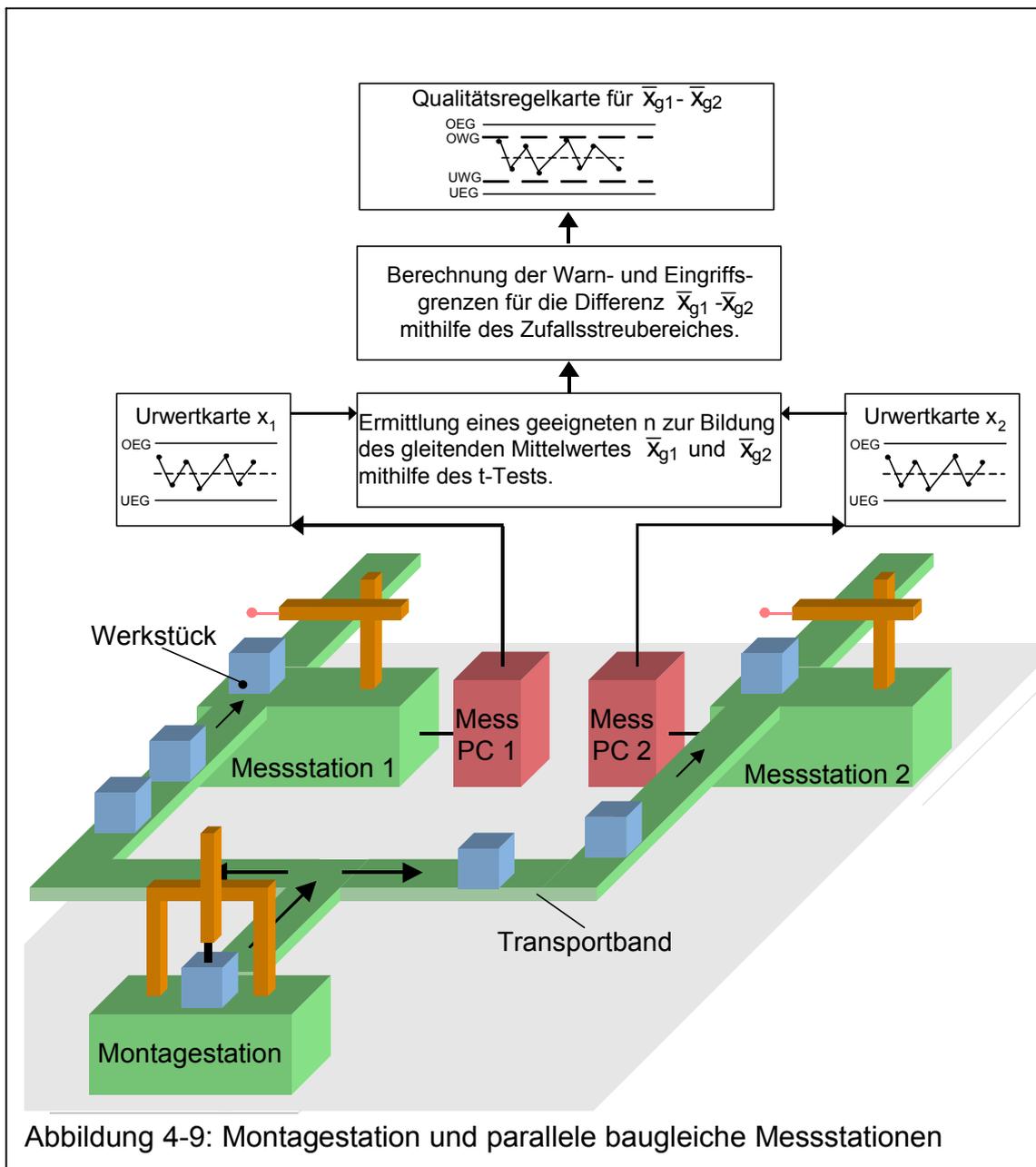
In der Praxis unterscheiden sich beide Möglichkeiten in der Abhängigkeit des ersten und zweiten Messergebnisses. Die Wiederholmessung in derselben Messstation wird dabei weitgehend den gleichen Bedingungen unterliegen wie die Erstmessung [Herz 2004]. Die Wiederholung der Messung in einer sequenziell angeordneten zweiten Messstation ist dagegen von der Erstmessung weitgehend unabhängig. Dies erklärt sich z. B. mit dem Verschmutzungsverhalten. Während in derselben Messstation die Verschmutzung sowohl auf die erste als auch auf die zweite Messung Auswirkungen hat, wird eine baugleiche zweite Messstation ein anderes Verschmutzungsverhalten aufweisen und damit andere Messergebnisse liefern.

Tabelle 4-6: Vergleich der beiden Vorgehensweisen

Wiederholung der Messung in derselben Messstation	Wiederholung der Messung in einer baugleichen zweiten Messstation
<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- nur eine Messstation nötig</li> <li>- unveränderter Anlagenaufbau</li> <li>- Messunsicherheit wird um den Faktor <math>\frac{1}{\sqrt{n^*}}</math> verringert</li> </ul>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- keine Veränderung der Taktzeit</li> <li>- geringe Abhängigkeit (höhere Unabhängigkeit), da zwei Messsysteme zur Verfügung stehen.</li> <li>- Messunsicherheit wird um den Faktor <math>\frac{1}{\sqrt{n^*}}</math> verringert</li> </ul>
<p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Taktzeit erhöht sich um die „Ablaufzeit in der Station“ (ca. doppelte Zeit)</li> <li>- die Wiederholmessungen unterliegen den gleichen Bedingungen. Störungen beeinflussen sowohl die Erst- als auch die Folgemessung</li> </ul>	<p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mehrere Messstationen nötig (mindestens zwei)</li> <li>- für mehr als zwei Wiederholmessungen ungeeignet, da dann eine dritte bzw. vierte Messstation benötigt wird</li> </ul>

## 4.2.2.2 Parallele baugleiche Messstationen

Parallele baugleiche Messstationen werden aus Gründen der Mengenleistung in automatisierten Montage- und Prüfsystemen eingesetzt. Die damit erzeugte Redundanz kann zur gegenseitigen Überwachung der Messstationen verwendet werden. Fehler, wie z. B. ein Offset durch fehlerhafte Kalibrierung oder Einflüsse auf das Messgerät während der Produktion, können dadurch erkannt werden. Die Fehlererkennung basiert auf dem Vergleich der Messergebnisse der beiden Messstationen durch Differenzbildung und ermöglicht das Erkennen einer Veränderung der Messgerätestreue. Eine schematische Darstellung paralleler baugleicher Messstationen zeigt Abbildung 4-9. Die Produktionsteile werden in einer Montagestation gefertigt und in zufälliger Reihenfolge auf beide Messstationen verteilt.



Zunächst werden die Messergebnisse wie gewohnt mit einer Urwertregelkarte überwacht. Zusätzlich werden gleitende Mittelwerte aus n-Urwerten gebildet. Auf Basis eines Vorlaufs wird mithilfe eines Hypothese-Tests eine geeignete Anzahl n zur Bildung des gleitenden Mittelwertes ermittelt. Dies ist ein iterativer Vorgang, der mithilfe eines Computerprogramms so lange durchgeführt wird, bis mit einer Anzahl n ein für den Prozessverlauf repräsentativer Stichprobenumfang gefunden ist. Optimierungsziel ist die Glättung der Prüfgröße  $t_{Prüf}$  durch ein möglichst großes n und gleichzeitig die möglichst kurze Verzögerung des Ansprechverhaltens durch ein möglichst kleines n. In Abbildung 4-10 ist ein Vorlauf mit einer Messabweichung ab Urwert 51 dargestellt.

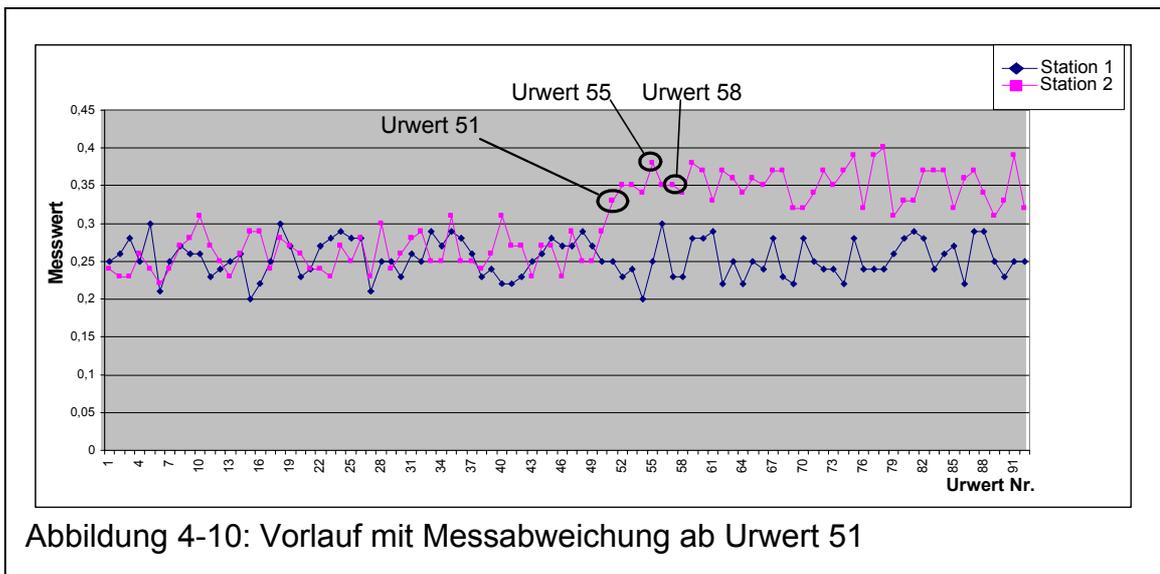


Abbildung 4-10: Vorlauf mit Messabweichung ab Urwert 51

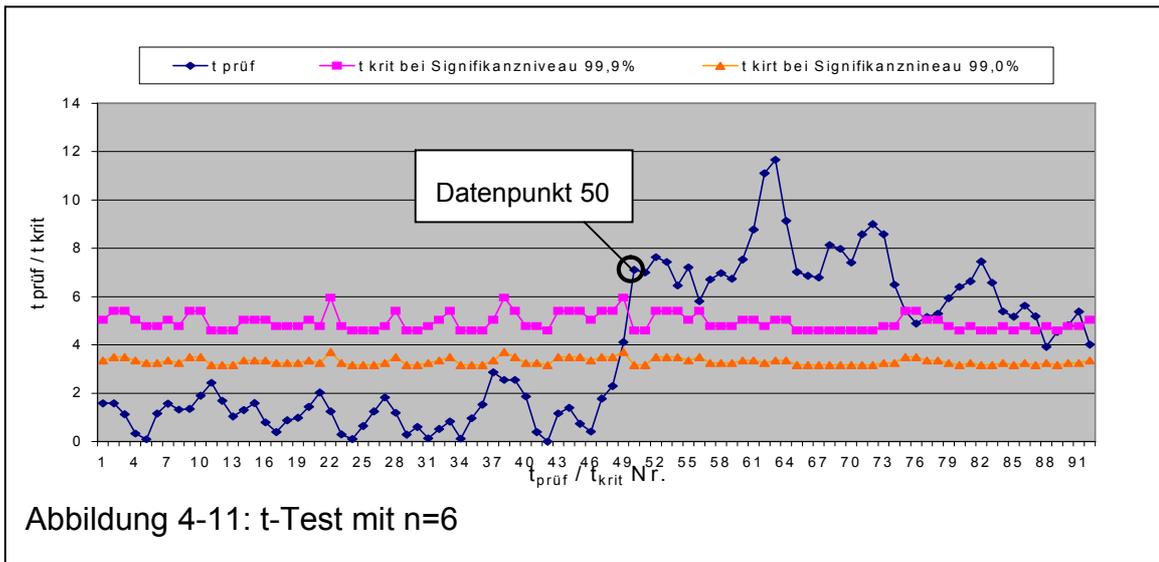
Der im Folgenden angewandte Hypothese-Test ist ein Mittelwertvergleich mit einer t-verteilter Prüfgröße ( $t_{Prüf}$ ) und wird deshalb auch t-Test genannt.

Tabelle 4-7: Mathematische Grundlagen des t-Tests [DGQ 1992, S. A 3.6 – 29f]

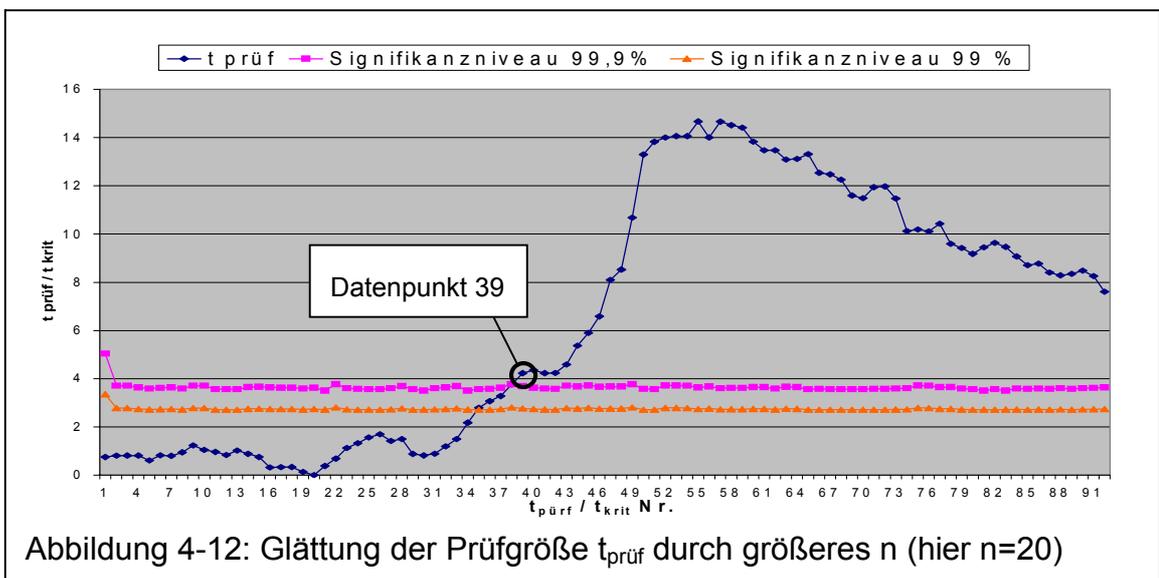
Nullhypothese		Alternativhypothese	
$\mu_1 = \mu_2$		$\mu_1 \neq \mu_2$	
mit der Prüfgröße		$t_{Prüf} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_d}$	
die Nullhypothese wird verworfen, wenn: $ t_{Prüf}  > t_{krit}$ mit $t_{krit} = t_{f; 1-\alpha/2}$			
mit: $s_d^2 = \frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}$		$f = \frac{c^2}{n_1 - 1} + \frac{(1-c)^2}{n_2 - 1}$	
$c = \frac{\frac{s_1^2}{n_1}}{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}$			
$\bar{x}_1 = \bar{x}_{g1}; \bar{x}_2 = \bar{x}_{g2}$ Gleitenden Mittelwerte aus Station 1 und 2 $n_1, n_2 \dots$ Anzahl der Werte zur Berechnung der gleitenden Mittelwerte, $s_1, s_2 \dots$ Standardabweichung der Werte zur Berechnung der gleitenden Mittelwerte, $s_d, f, c \dots$ Hilfsgrößen			

Der t-Test gehört zu den „...robusten statistischen Verfahren...“, bei denen sich eine „...Abweichung der Wahrscheinlichkeitsverteilung von der Normalverteilung auf das Testergebnis nur gering auswirkt.“ [Dietrich 1998a, S. 115]. Deshalb kann auf einen Test auf Normalverteilung verzichtet werden. Der t-Test wird mit dem Signifikanzniveau von 99,9% ( $\alpha=0,1\%$ ) und 99,0% ( $\alpha=1\%$ ) durchgeführt.

In Abbildung 4-11 ist der t-Test mit  $n=6$  dargestellt. Die Überschreitung des Signifikanzniveaus von 99,9% findet mit Datenpunkt 50 statt. Dies entspricht Urwert 55 in Abbildung 4-10. Damit wäre das Ansprechverhalten mit fünf Produktionsteilen nach Eintritt der signifikanten Messabweichung definiert.



In Abbildung 4-12 ist der t-Test mit  $n=20$  dargestellt. Die Überschreitung des Signifikanzniveaus von 99,9% findet bei Datenpunkt 39 statt. Dies entspricht Urwert 58 in Abbildung 4-10. Damit wäre das Ansprechverhalten mit acht Produktionsteilen nach Eintritt der signifikanten Messabweichung definiert.

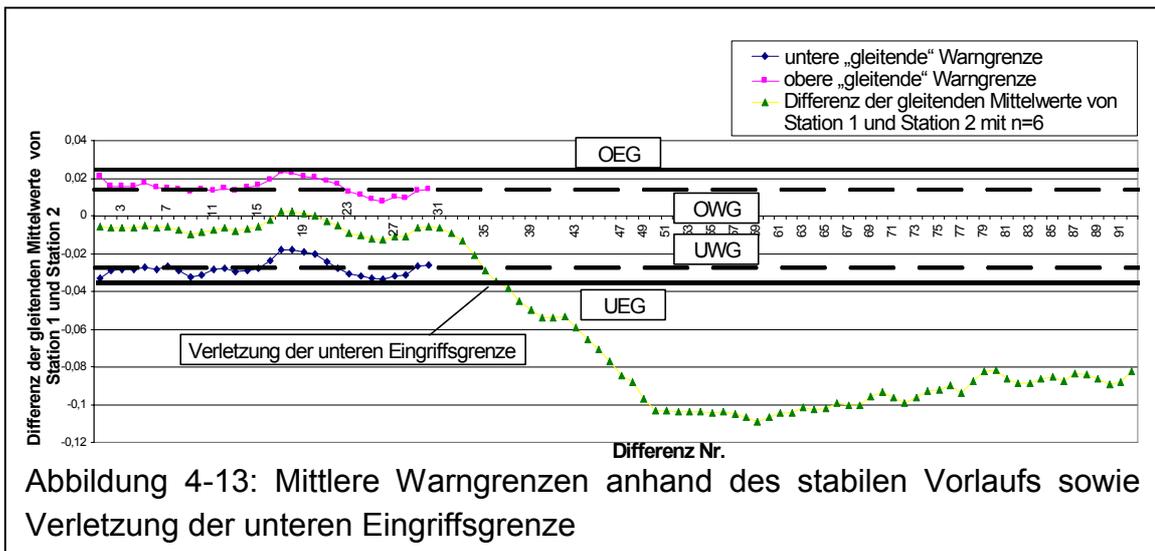


Der festgelegte Stichprobenumfang  $n$  wird vorläufig zur Berechnung der Qualitätsregelkarte für die Differenz der gleitenden Mittelwerte verwendet. Nachdem weitere Erfahrungen mit dem Verhalten des Montage- und Messprozesses vorliegen, wird das gewählte  $n$  iterativ überprüft, bis ein stabiler Überwachungsprozess definiert werden kann.

Die Warn- und Eingriffsgrenzen für die Qualitätsregelkarte werden mithilfe des Zufallsstrebereichs auf unterschiedlichem Signifikanzniveau bestimmt. Die Eingriffsgrenze wird in diesem Beispiel mit 99,9% (statt den üblichen 99%) Zufallsstrebereich und die Warngrenze mit 99% (statt 95%) Zufallsstrebereich berechnet. Die Berechnung erfolgt auf der Basis von DGQ [DGQ 1992]:

$$\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - t_{f;1-\alpha/2} \cdot s_d \leq \mu_1 - \mu_2 \leq \bar{x}_1 - \bar{x}_2 + t_{f;1-\alpha/2} \cdot s_d \quad (4.2)$$

Wird der Zufallsstrebereich verlassen, kann mit einer Sicherheit von  $P = 1 - \alpha$  angenommen werden, dass die Messunsicherheit einer der beiden Messprozesse signifikant zugenommen hat. Da zur Berechnung der Grenzen gleitende Mittelwerte verwendet werden, ergeben sich auch „gleitende“ Warn- und Eingriffsgrenzen. Der Anwender muss deshalb eine „mittlere“ Grenze festlegen. In Abbildung 4-13 sind die mittleren Warn- und Eingriffsgrenzen auf Basis des stabilen Teils des Vorlaufs (Abbildung 4-10 bis Urwert 50) eingezeichnet.



In der Montagetechnik können Ausreißer entstehen. Diese würden die Streuung des gleitenden Mittelwertes derart beeinflussen, dass dieser kein repräsentatives Bild des Prozesses liefern kann. Ausreißer sollten deshalb nicht zur Bildung des gleitenden Mittelwertes herangezogen werden. In der automatisierten Überwachung kann dies durch die Definition von Schwellgrenzen geschehen. Messwerte, die diese Schwellgrenzen verletzen, werden nicht zur Berechnung verwendet. Als Schwellgrenzen können die Eingriffs-, die Toleranzgrenzen oder zusätzlich definierte Grenzen dienen.

## 4.2.2.3 Aktoren als Messsysteme

Aktoren sind Gerätekomponenten, die unter Einsatz von Energie eine Veränderung des Systemzustandes bewirken [Wünsche 1993]. Aktoren werden sensorische Eigenschaften zugesprochen, wenn ein Zusammenhang zwischen Leistungsaufnahme und Prozessänderung zu erkennen ist. Diese Eigenschaft kann analytisch redundant genutzt werden, wenn mit einem Messwertempfänger die Prozessveränderung gemessen und mit der Leistungsaufnahme des Aktors verglichen wird. Voraussetzung für diese Vorgehensweise ist ein definierter Zusammenhang zwischen der Eingangsgröße des Aktors und der mit dem Messsystem gemessenen Ausgangsgröße. Beispielhaft ist in Abbildung 4-14 die Stromaufnahme eines Servomotors und das abgegebene Drehmoment, gemessen mit einem Drehmomentaufnehmer, dargestellt.

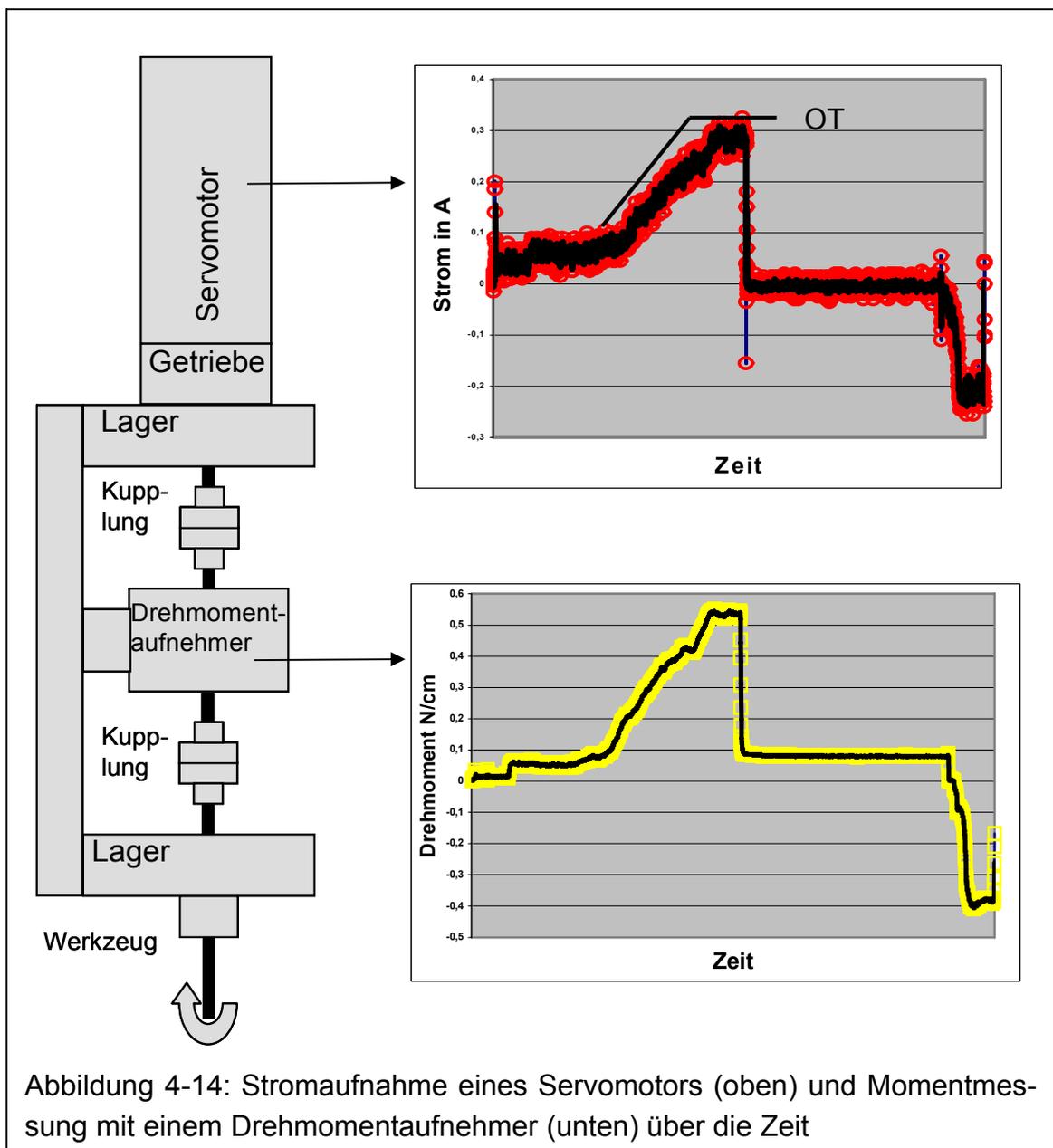


Abbildung 4-14: Stromaufnahme eines Servomotors (oben) und Momentmessung mit einem Drehmomentaufnehmer (unten) über die Zeit

Zur Fehlererkennung können folgende Zusammenhänge genutzt werden:

1. Bei konstanter Drehzahl ist die Stromaufnahme des Motors abhängig vom
  - Drehmoment am Werkzeug,
  - Reibwert in den Lagern,
  - Reibwert im Getriebe und von der
  - Charakteristik des Servomotors.
2. Das gemessene Drehmoment ist abhängig vom
  - Drehmoment am Werkzeug,
  - Reibmoment im unteren Lager und von der
  - Charakteristik des Drehmomentaufnehmers.

Zielgröße ist das Drehmoment am Werkzeug. Solange die Reibwerte in den Lagern und im Getriebe klein bleiben und die Charakteristik des Servomotors und des Drehmomentaufnehmers sich nicht verändert, können diese Einflüsse vernachlässigt werden. Erst wenn durch Störgrößen (z. B. Beschädigung, Verschleiß) Änderungen bei den eingesetzten Komponenten eintreten, wird sich ein anderer Zusammenhang zwischen Strom und Drehmoment ergeben. Zur Fehlererkennung kann nun eine Toleranzgrenze (OT) bei der Stromaufnahme definiert (siehe Abbildung 4-14), das Proportionalitätsverhalten überwacht (siehe Abbildung 4-15) oder die beiden Messergebnisse durch Differenzbildung miteinander verrechnet werden (siehe Abbildung 4-16). Über einen Vorlauf werden die Überwachungsparameter festgelegt. Wird die Toleranzgrenze beim Strom überschritten, ändert sich der Proportionalitätsfaktor oder weicht die berechnete Differenz von einer definierten zulässigen Differenz ab, so ist das ein Hinweis auf eine signifikante Störung, z. B. aufgrund eines schwergängigen Lagers.

Für den praktischen Anwendungsfall muss beachtet werden, dass der momentbildende Strom eines Servomotors eine deutlich größere Streuung als das gemessene Drehmoment aufweist. Dies ist in Abbildung 4-14 gut zu erkennen. Deshalb müssen zur Auswertung des Stroms geeignete Filter (z. B. Tiefpassfilter) eingesetzt werden, die eine Glättung der Stromwerte zulassen [Führer 1998].

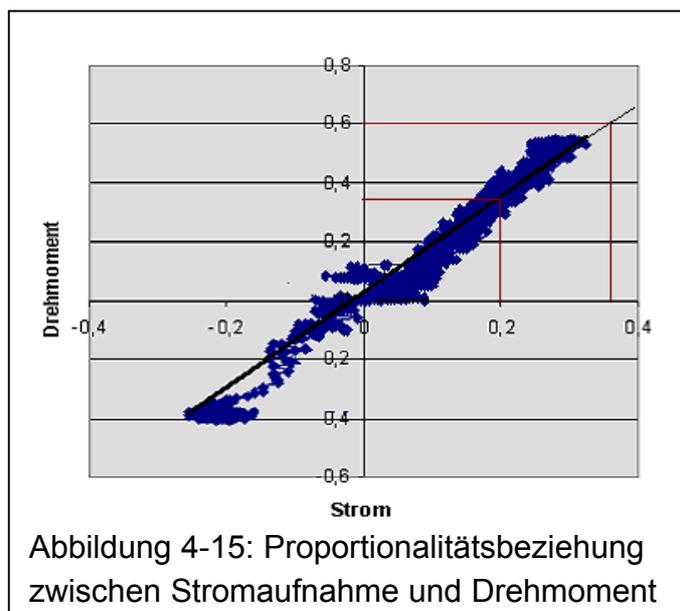
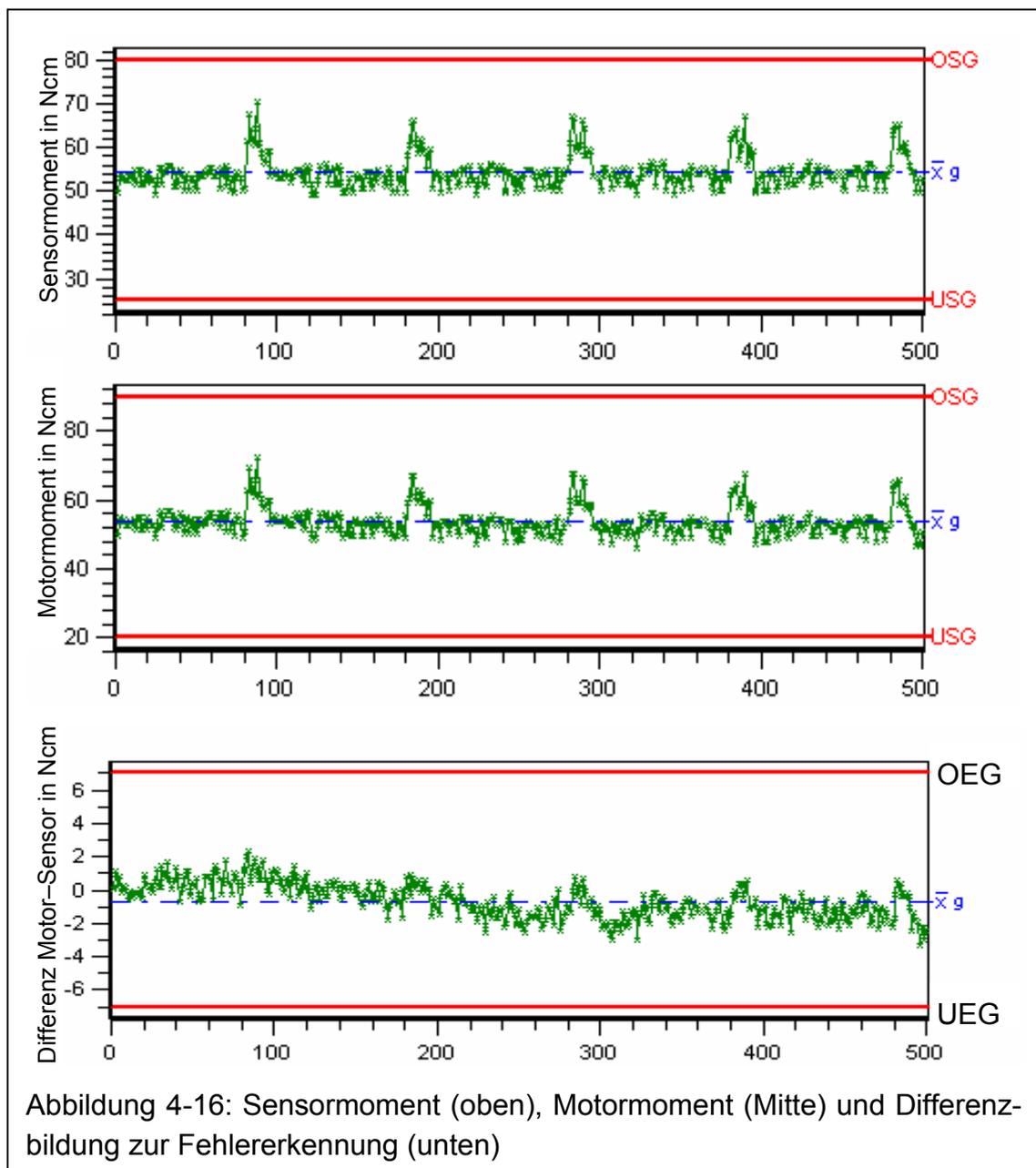


Abbildung 4-15: Proportionalitätsbeziehung zwischen Stromaufnahme und Drehmoment

Der Nachteil beim Einsatz von Filtern ist, dass damit nicht nur Stör- sondern auch Messsignale gefiltert werden und dadurch das Ansprechverhalten der Fehlererkennungsmethode verzögert wird. In der Praxis muss deshalb eine etwas größere Toleranz für den Strom zugelassen werden [Gebauer 1992].

In Abbildung 4-16 ist ein Beispiel für die Überwachung durch Differenzbildung dargestellt. Die Messergebnisse des Drehmomentsensors sind in der Einheit Newtonzentimeter (Ncm) (in Abbildung 4-16 oben) dargestellt. Über das bekannte Proportionalitätsverhalten zwischen Stromaufnahme und dem vom Motor abgegebenen Drehmoment kann dem Messwert in der Einheit Ampere (A) ein Moment der Einheit Ncm zugeordnet werden (in Abbildung 4-16 Mitte). Zur Überwachung wird die Differenz nach der Berechnungsvorschrift Motormoment minus Sensormoment gebildet (in Abbildung 4-16 unten). Die Eingriffsgrenzen wurden mithilfe des Zufallsstrebereichs anhand eines Vorlaufs bestimmt.



### 4.3 Selbsttests zur Fehlererkennung

Definition:

Durch Selbsttests prüfen einzelne Komponenten von AMPS ihre Funktionsfähigkeit selbst. Dies kann softwareseitig z. B. mit zyklischen Tests und hardwareseitig mit mechanischen oder elektrischen Bauteilen realisiert werden.



Selbsttests können in definierten periodischen Abständen, nach manuellen Eingriffen (z. B. Wartung, Reparatur) oder bei jedem Neustart des Systems aktiviert werden.

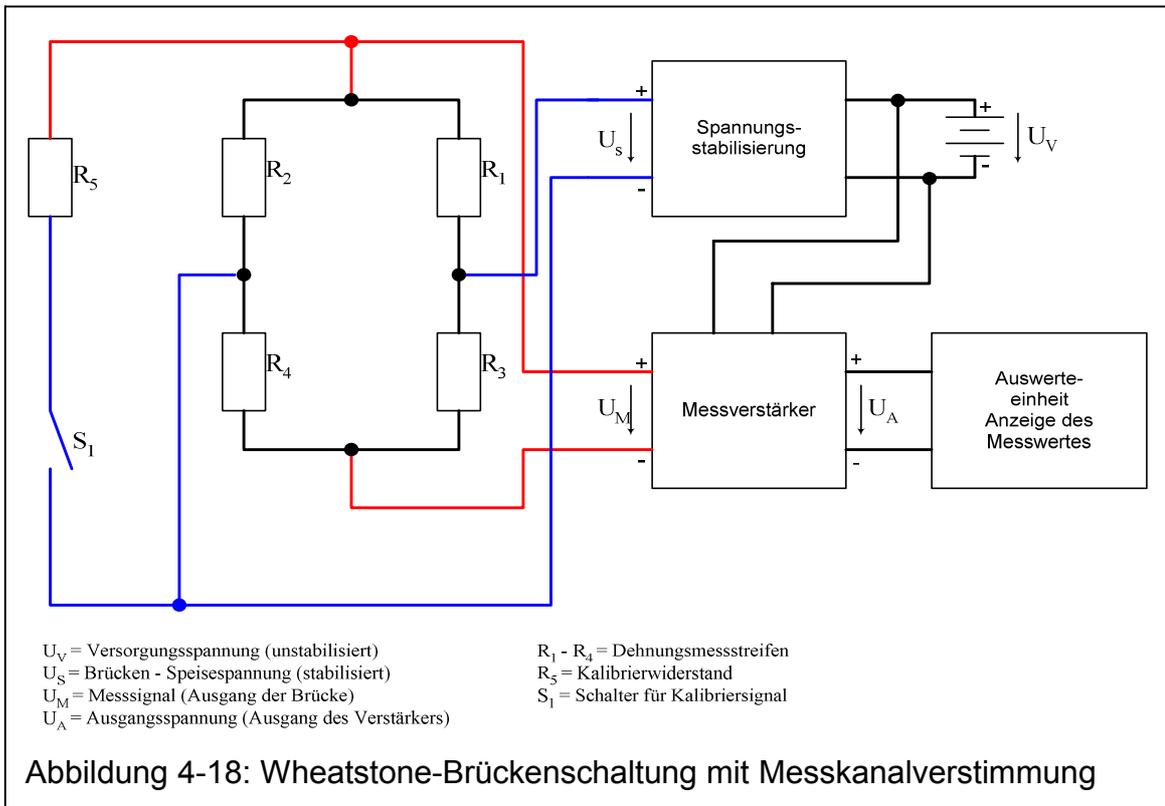
#### 4.3.1 Selbsttests zur Fehlererkennung in der Messkette

Bei Messketten (Messwertaufnehmer, Kabel, Messverstärker und Auswerteeinheit vgl. Kapitel 3) mit Dehnungsmessstreifen-Messbrücke in Vollbrückenschaltung (Wheatstone-Brückenschaltung) können folgende Tests durchgeführt werden (Abbildung 4-17). Während der Nullpunkttest eine bekannte Überwachungsmethode für DMS-Messwertaufnehmer ist, stellt die automatisierte Anwendung der zusätzlichen Tests in AMPS eine Neuerung dar. Zum Beispiel wird der Kalibrierwerttest zum Zweck der Justage und Kalibrierung des Messwertverstärkers durch den Hersteller des Messaufnehmers vor Auslieferung an den Kunden durchgeführt [Staiger 2003]. Die spätere Nutzung des Tests durch den Kunden ist nicht vorgesehen, da die dazu notwendige elektrische Verdrahtung fehlt. Die im Folgenden beschriebene Umsetzung nutzt diese latent vorhandene Überwachungsmöglichkeit zur Fehlererkennung bei AMPS.

##### **Nullpunkttest:**

Mit dem Nullpunkttest wird der korrekte Abgleich der unbelasteten Messbrücke überprüft. Dieser kann sich aufgrund der Veränderungen der DMS-Klebestelle sowie Schäden an den DMS in Folge von Überlast ändern. Beim Nullpunkttest

liegt die stabilisierte Brücken-Speisespannung  $U_S$  (z. B. 5V +/- 0,1%) an. Der Kalibrierwiderstand  $R_5$  ist abgeschaltet. Bei unbeschädigter Brücke ist das Verhältnis der Widerstände  $R_1$  zu  $R_2$  gleich dem Verhältnis der Widerstände  $R_3$  zu  $R_4$  (Berechnung 4.3). Als Resultat aus Stromfluss und Innenwiderstand der Messbrücke ergibt sich bei abgeglichenen Messbrücke ein (Antwort-) Messsignal  $U_m$  von 0V plus/minus einer zulässigen bauartbedingten Toleranz. Das Messsignal  $U_m$  wird vom Messverstärker zur Ausgangsspannung  $U_A$  verstärkt und an der Auswerteeinheit als Messwert angezeigt. Bei verstimmter, d. h. beschädigter Messbrücke, weicht das Ausgangssignal  $U_A$  vom erwarteten Wert um mehr als die zulässige Toleranz (z. B. +/- 20 mV) ab (Abbildung 4-18).



Ableichbedingung für die unbelastete Brücke ohne  $R_5$  ( $S_1$  geöffnet):

$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ <p>mit <math>U_M = U_{R_2} - U_{R_4} = R_2 * I_2 - R_4 * I_4 = \frac{R_2 * U_S}{R_1 + R_2} - \frac{R_4 * U_S}{R_3 + R_4}</math></p> $U_M = U_S * \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$ <p>Beispiel:</p> $U_M = 5V * \left( \frac{350\Omega}{(350 + 350)\Omega} - \frac{350\Omega}{(350 + 350)\Omega} \right) = 5V * 0 = 0V$	<b>(4.3)</b>
---	--------------

**Kalibrierwerttest:**

Beim Kalibrierwerttest wird durch Schließen eines Schalters ( $S_1$ ) die Messbrücke über einen Kalibrierwiderstand ( $R_5$ ) gezielt verstimmt. Die Brückenspeisespannungen  $U_S$  liegt unverändert an und die Brücke ist unbelastet. Als Ergebnis wird bei unbeschädigter Messbrücke ein charakteristisches Messsignal  $U_M$  (Kalibrierwert) erzeugt (Berechnung 4.4), das als verstärkter Messwert an der Auswerteeinheit abgelesen werden kann. Ist die Messbrücke beschädigt, weicht der gemessene Wert vom erwarteten Kalibrierwert (z. B. 5mV) ab. Abgleichbedingung für die unbelastete Brücke mit  $R_5$  ( $S_1$  geschlossen):

$\frac{R_1}{R_{ges}} = \frac{R_1 * (R_5 + R_2)}{R_5 * R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{mit} \quad \frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5}; \quad R_{ges} = \frac{R_2 * R_5}{R_2 + R_5}$ $U_M = R_{ges} * I_{ges} - R_4 * I_4 = \frac{R_2 * R_5}{R_2 + R_5} * \frac{U_S}{R_1 + \frac{R_2 * R_5}{R_2 + R_5}} - R_4 * \frac{U_S}{R_3 + R_4}$ $U_M = U_S * \left( \frac{R_2 * R_5}{R_1(R_2 + R_5) + R_2 * R_5} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$ <p>Beispiel:</p> $U_M = 5V * \left( \frac{(350 * 87330)\Omega^2}{(350(350 + 87330))\Omega^2 + (350 * 87330)\Omega^2} - \frac{350\Omega}{(350 + 350)\Omega} \right)$ $U_M = 5V * \left( \frac{8733}{17501} - \frac{1}{2} \right) = 5V * (-0,001) = -0,005V = -5mV$	<p><b>(4.4)</b></p>
---	---------------------

Abbildung 4-19 zeigt ein Beispiel für einen automatischen Nullpunkt- und Kalibrierwerttest in einem AMPS. Durch den Einbaufall des Aufnehmers treten Querkräfte auf, die einen Offset des Nullpunkts und eine gewisse Streuung bewirken (Mittelwert = 0,82 Ncm, Standardabweichung = 0,024 Ncm). Der Kalibrierwert weicht ebenfalls von den Herstellerangaben (-50 Ncm) ab [Staiger 2003]. Dies ist durch den Einbaufall bedingt. Die Streuung (scheinbare Ausreißer nach oben und unten in Abbildung 4-19 rechts) sind auf die hohe Prozessgeschwindigkeit (sehr kurze Taktzeit) zurückzuführen, die für die analoge Kalibrierwerterfassung nur wenig Zeit lässt. Dies wird als prozesstypisch akzeptiert. Die Eingriffsgrenzen wurden mithilfe des Zufallsstrebereiches anhand eines Vorlaufs bestimmt.

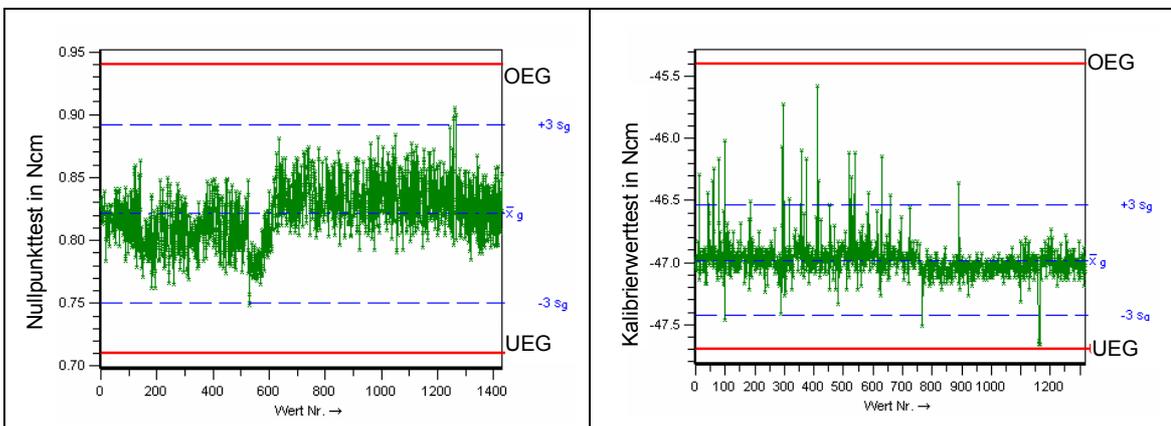


Abbildung 4-19: Nullpunkttest (links) und Kalibrierwerttest (rechts)

### **Spannungstest:**

Die Aufgabe der eingesetzten Spannungsstabilisierung liegt in der Bereitstellung einer definierten und stabilisierten Brücken-Speisespannung für die Messbrücke (z. B. 5V +/- 0,1% DC). Die stabilisierte Brücken-Speisespannung der Messbrücke wird aus einer unstabilisierten Versorgungsspannung (z. B. 24V +/- 10% DC) erzeugt. Die hierfür verwendeten elektronischen Bauteile unterliegen den üblichen Fehlerquellen (Temperatur, elektromagnetische Störungen usw.) und könnten ihre Charakteristik verändern. Ändert sich dadurch die Brücken-Speisespannung, würde bei funktionsfähiger Brücke der Nullpunkt zwar gleich bleiben, der Kalibrierwert sich aber ändern. Durch den Kalibrierwerttest können somit gleichzeitig Fehler in der Spannungsversorgung erkannt werden.

### **Messverstärkertest**

Die Aufgabe des Messverstärkers liegt in der Verstärkung des Messsignals der Messbrücke (z. B. Verstärkung von 5mV Messsignal auf 5V Ausgangssignal). Für die Verstärkung des Messsignals gelten analoge Zusammenhänge wie beim Spannungstest. Würde sich die am Messverstärker eingestellte Verstärkung ändern, so würde der Nullpunkttest zwar eine korrekte Nulllage ergeben, der Kalibrierwerttest jedoch vom erwarteten Kalibrierwert abweichen.

### **Test der Auswerteeinheit:**

Bei den beschriebenen Tests wird die gesamte Messkette, d. h. Messwertnehmer, Spannungsversorgung, Messverstärker und Auswerteeinheit überprüft. Das bedeutet, dass mit dieser Vorgehensweise auch Fehler bei der Messwertübertragung (Kabel) sowie bei der Messwertverarbeitung (Auswerteeinheit) festgestellt werden können, da Fehler in diesen Komponenten zwar nicht zwangsläufig auf die Anzeige des korrekten Nullpunkts, sicher aber auf die Anzeige des korrekten Kalibrierwerts auswirken würden.

Ein Diskussionspunkt der Tests ist, dass eine Abweichung des Kalibrierwertes durch verschiedene Fehler in der Messkette (z. B. Spannungsversorgung, Beschädigung der Messbrücke, Messverstärkung) verursacht werden kann. Der Fehler wird zwar entdeckt, die Ursache muss jedoch mit zusätzlichem Aufwand ermittelt werden. Bei automatisierten Prüfungen steht aber zunächst die automatische Entdeckung eines Fehlers im Vordergrund, um durch unverzügliche Reaktion eine Fehlerfortpflanzung zu vermeiden. Die beschädigte Messkette kann präventiv ausgetauscht und einer anschließenden manuellen Ursachenanalyse, unabhängig vom automatischen Betrieb, unterzogen werden.

Die beschriebenen Tests haben den Nachteil, dass die Messkette nur im unbelasteten Zustand geprüft werden kann. Fehler, die sich nur im belasteten Zustand auf die Messung auswirken, können dadurch nicht erkannt werden. Mahmoud schlägt dazu vor, das Messsignal zu einem bestimmten Zeitpunkt zu speichern, ein Kontrollsignal von wenigen Millisekunden additiv zu überlagern

und das Ergebnis mit der Summe aus (gespeichertem) Messsignal und erwartetem Antwortsignal auf das Kontrollsignal zu vergleichen [Mahmoud 2000, S. 96]. Dies hätte zum Vorteil, dass die Messkette nicht nur im unbelasteten, sondern auch im belasteten Zustand überprüft werden könnte. Jedoch ist hier zu beachten, dass durch die Verstimmung der Messbrücke mit einem Kalibrierwiderstand sich auch das Linearitätsverhalten der Brückenschaltung ändert. Ist diese Linearitätsabweichung klein, wäre diese Vorgehensweise dann vertretbar, wenn eine Unsicherheitsbetrachtung der Messkette (z. B. nach DIN V ENV 13005, GUM) eine weiterhin geringe kombinierte Messunsicherheit ergäbe.

Um diesen Nachteil zu kompensieren, werden im nächsten Gliederungspunkt weitere Möglichkeiten der Fehlererkennung beschrieben.

#### **4.3.2 Selbsttests zur Fehlererkennung an Motor, Getriebe und Lager**

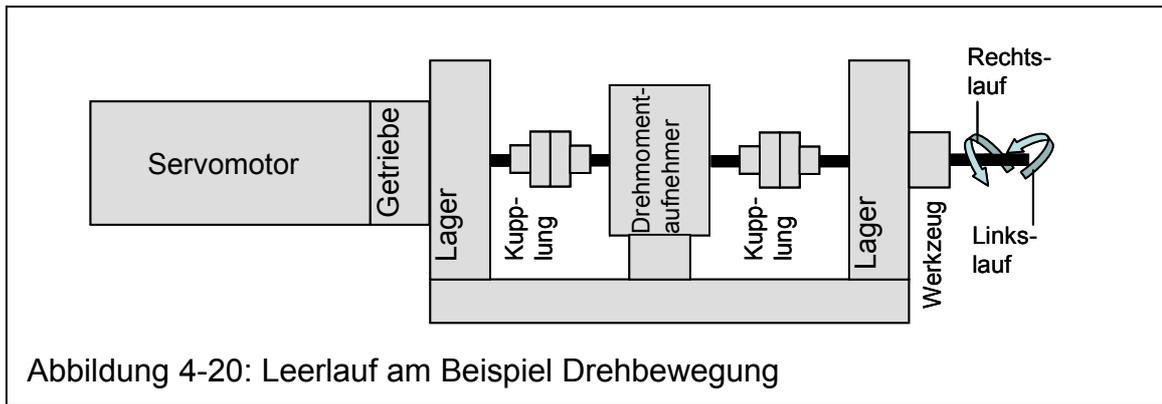
##### **Reibwerttest:**

Beim Reibwerttest wird mit der Montagekomponente unter definierten Bedingungen ein „Leerhub“ gefahren (Abbildung 4-20). Das heißt, die Montagebewegung wird ohne Montageeingriff durchgeführt. Bei elektromechanischen Pressen kann z. B. von Ausgangs- in Endlage gefahren und bei elektromechanischen Schraubern eine Drehbewegung der Schraubspindel durchgeführt werden. Durch die Reibverhältnisse in den mechanischen Bauteilen wie z. B. Motor, Getriebe und Lager wird dadurch ein Messwert erzeugt. Dieser Messwert ist im Vergleich zum Montageeingriff i. d. R. sehr klein, jedoch für die unbeschädigte Montagekomponenten charakteristisch.

##### **Drehzahltest, Motortest:**

Beim Drehzahltest wird die Montagekomponente während eines definierten Zeitraums mit einer vorgegebenen Drehzahl im Leerlauf betrieben. Das Ergebnis der Drehzahlmessung während dieses Leerlaufs muss innerhalb eines Toleranzbereichs mit der vorgegebenen Drehzahl übereinstimmen. Alternativ kann auch ein Messwert während eines Leerlaufs in eine Richtung (z. B. nach links drehen, abwärts bewegen) mit dem Ergebnis eines Leerlaufs in die andere Bewegungsrichtung (z. B. nach rechts drehen, aufwärts bewegen) verglichen werden. Dieser Test lässt eine Aussage über die Funktionsfähigkeit des Antriebs (Motor) und der Messaufnehmer zur Ermittlung der Drehzahl zu.

Bei diesem Test sollte jedoch zusätzlich die Leistungsaufnahme des Antriebs überwacht werden. Dies ist deshalb nötig, da bei Schäden in den Komponenten (Lager, Getriebe, Motor) die korrekte Drehzahl nur durch eine erhöhte Leistungsaufnahme erreicht werden kann.



### Referenztest (Winkel- und Wegtest)

Beim Referenztest wird die Montagekomponente ebenfalls im Leerlauf betrieben. Dabei wird eine definierte Bewegung (auf/ab, links/rechts) ausgeführt. Die Bewertung kann durch den Vergleich der in beide Richtungen zurückgelegten Strecke beruhen oder es werden definierte Referenzpunkte angefahren. Für eine Drehbewegung eignet sich der Vergleich der zurückgelegten Strecke in Form des Drehwinkels während einer definierten Zeit bei einer definierten Drehzahl. Dabei wird der ermittelte Drehwinkel in die eine Richtung mit dem ermittelten Drehwinkel in die andere Richtung verglichen. Bei konstanten Bedingungen für die Drehzahl und die Messzeit müssen die Drehwinkel innerhalb eines definierten Toleranzbereiches gleich sein. Für eine translatorische Bewegung eignet sich der Wegtest. Bei diesem werden definierte Referenzpunkte angefahren.

Die drei beschriebenen Tests haben gemeinsam, dass sie nur im Leerlauf betrieben werden können. Nachteilig dabei ist, dass die Montagekomponente unter Last ein anderes Verhalten zeigen kann. Deshalb sollten diese Tests stets mit einer weiteren automatischen oder manuellen Methode der Fehlererkennung kombiniert werden. Vorteilhaft ist jedoch, dass die Tests zwischen zwei Montagevorgängen automatisch und deshalb ohne Taktzeitverlust durchgeführt werden können. Zwar können diese Tests die manuelle Überwachung nicht vollständig ersetzen, jedoch können sie die Häufigkeit der notwendigen Durchführung deutlich reduzieren.

## 4.4 Plausibilitätskriterien

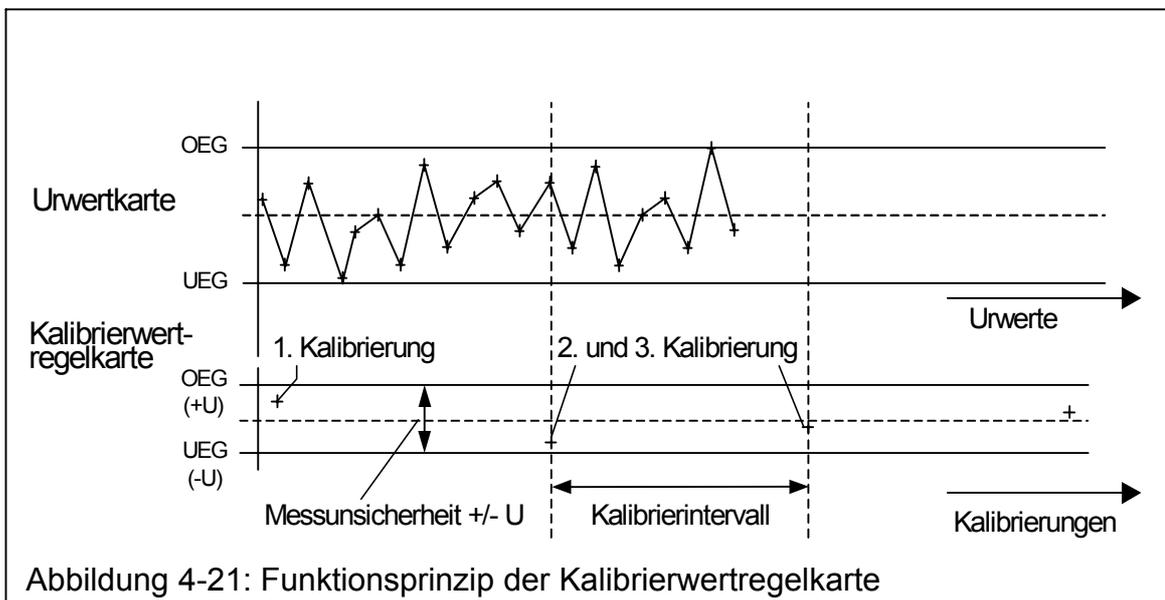
Plausibilitätskriterien sind Methoden der Fehlererkennung, mit denen die Abschätzung der richtigen Größenordnung eines Montage- oder Messergebnisses durchgeführt werden kann. Ziel der Plausibilitätskriterien ist eine Aussage über die Richtigkeit und Stimmigkeit von Ereignissen in AMPS.

Definition Plausibilitätskriterien:

Methoden zur Abschätzung der Richtigkeit und Stimmigkeit von Ereignissen in AMPS.

### 4.4.1 Kalibrierwertregelkarte

Mit der Kalibrierwertregelkarte wird überprüft, ob die Kalibrierung eines Messsystems im Bereich des erwarteten Kalibrierergebnisses liegt. Dazu wird ein Kalibriernormal mit einem bekannten und auf internationale Normale rückführbaren Istwert mit dem Messsystem verglichen. Der Anzeigewert wird in eine Qualitätsregelkarte eingetragen und mit den zuvor definierten Eingriffsgrenzen verglichen. Die Eingriffsgrenzen stellen die erweiterte Messunsicherheit ( $\pm U$ , vgl. Kapitel 2) dar (Abbildung 4-21).

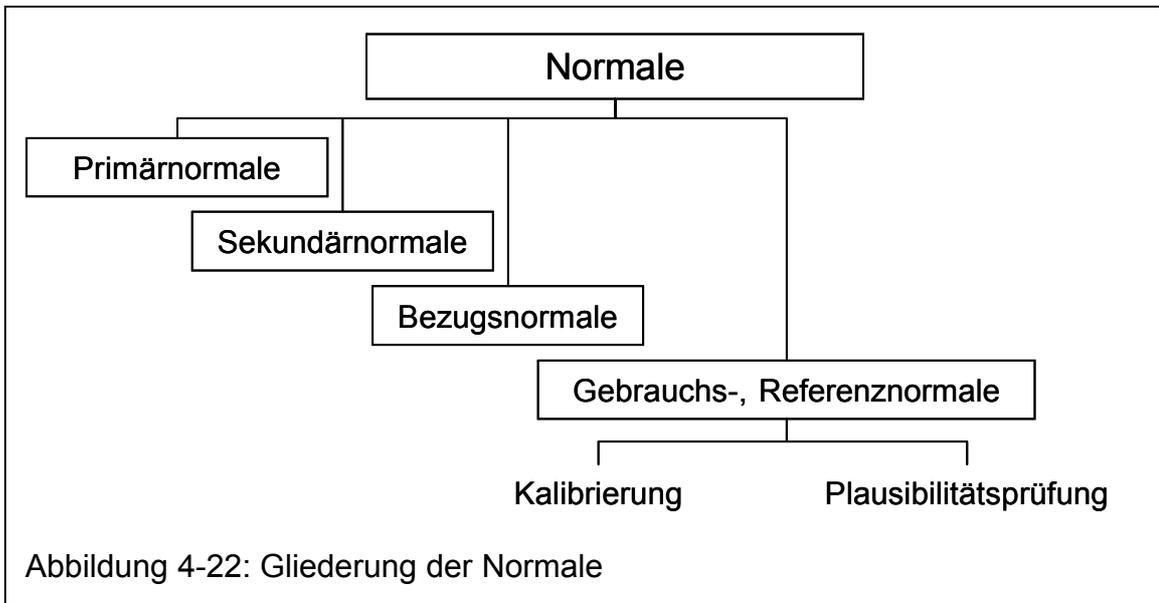


Liegt der Messwert innerhalb der Eingriffsgrenzen, ist das Kalibrierergebnis vertrauenswürdig. Liegt er außerhalb, ist ein signifikanter, über die erwartete Messunsicherheit hinausgehender Fehler aufgetreten. Der Messwert ist nicht vertrauenswürdig und kann nicht als Kalibrierergebnis gewertet werden. Verbesserungsmaßnahmen müssen eingeleitet und die Kalibrierung muss wiederholt werden.

#### 4.4.2 Normale

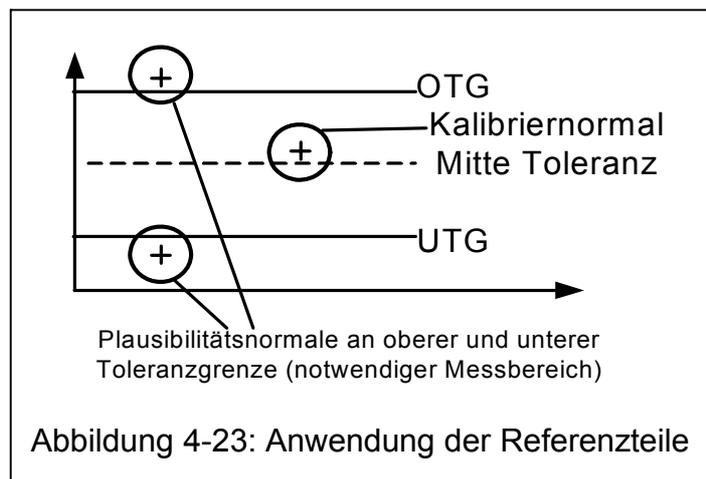
##### Definition:

Unter einem Normal versteht man eine „Maßverkörperung, Messgerät, Referenzmaterial oder Messeinrichtung zum Zweck, eine Einheit oder einen oder mehrere Größenwerte festzulegen, zu verkörpern, zu bewahren oder zu reproduzieren.“ [VIM 1994, S. 80]



Primärnormale erfüllen die höchste metrologische Forderung. Sekundärnormale werden durch den Vergleich mit einem Primärnormal festgelegt. Bezugsnormale haben die höchste verfügbare Genauigkeit an einem betrachteten Ort. Gebrauchs- bzw. Referenznormale werden mithilfe der Bezugsnormale kalibriert [VIM 1994, S. 83]. Gebrauchs- bzw. Referenznormale werden auch als Referenzmaterial bezeichnet, bei dem „...ein oder mehrere Merkmalswerte so genau festgelegt sind, dass sie zur Kalibrierung von Messverfahren... verwendet werden können“ [VIM 1994, S. 87]. Gebrauchs- bzw. Referenznormale werden täglich zur Kalibrierung oder Plausibilitätsprüfung von Prüfsystemen in AMPS verwendet. Dazu gehören:

- Kalibrierung mit Kalibrierwertregelkarte
- Messmittelfähigkeitsuntersuchung
- Kontrolle der Messwertberechnung
- Kontrolle des verfügbaren Messbereiches

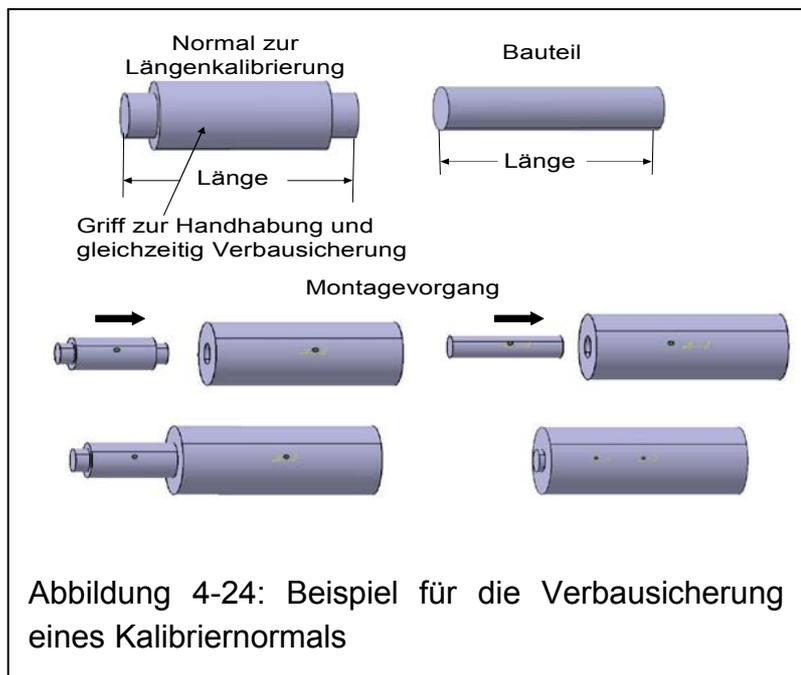


Um diese Prüfungen durchführen zu können, sollten für jedes Merkmal drei Gebrauchsnormale zur Verfügung stehen. Jeweils ein Plausibilitätsnormal (knapp) außerhalb der oberen und unteren Toleranzgrenze (OTG, UTG) sowie ein Kalibriernormal innerhalb der Toleranz (möglichst mittig). Abbildung 4-23 verdeutlicht den Zusammenhang.

### Verbausicherung gegen Handhabungsfehler von Gebrauchsnormalen

Wenn Gebrauchsnormale in ihrer Geometrie den Werkstücken nachempfunden sind, besteht die Gefahr, dass sie anstelle der Werkstück montiert werden. Da sich Gebrauchsnormale von den Werkstücken durch eine eingeschränkte Funktionalität (z. B. das Fehlen von Bohrungen) oder durch die Verwendung anderer

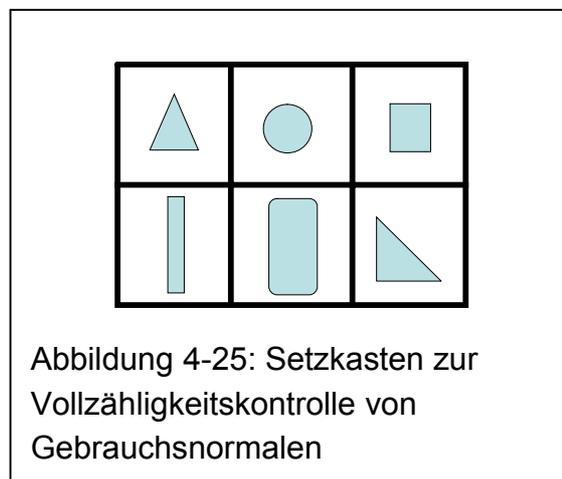
Materialien unterscheiden, führt dies in der Regel zum Funktionsausfall des Produktes. Meist wird der Fehler vor der Auslieferung an den Kunden bei der Funktionsprüfung erkannt. Ist dies nicht der Fall, ist eine Reklamation des Kunden die sichere Folge. Aus diesen Gründen sollten Gebrauchsnormale neben der farblichen Kennzeichnung auch eine Verbausicherung aufweisen. In Abbildung 4-24



ist ein Beispiel dafür dargestellt.

### Vollzähligkeitskontrolle von Gebrauchsnormalen

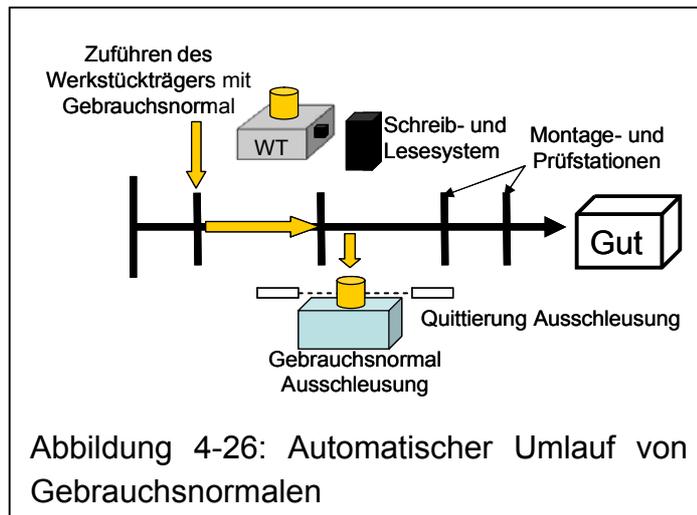
Eine weitere Möglichkeit zur Vermeidung von Verwechslungen ist die Vollzähligkeitskontrolle von Gebrauchsnormalen. Jedes Gebrauchsnormal hat eine definierte Lagerstelle außerhalb des AMPS. Nach Kalibriervorgängen müssen alle Normale an der vorgesehenen Lagerstelle sein. Ist dies nicht der Fall, darf die Produktion nicht freigegeben werden. Eine Möglichkeit der Umsetzung ist die Verwendung eines Setzkastens (Abbildung 4-25).



### Automatisierter Einsatz von Gebrauchsnormalen

Kalibrierungen und Plausibilitätsprüfungen können automatisiert ablaufen. Ziel ist die automatische Kalibrierung und Überwachung der Prüf- und Messsysteme. Dazu werden die (verbausichern) Gebrauchsnormale dem AMPS automatisch zugeführt. Voraussetzung für die Durchführung ist, dass die Position des Gebrauchsnormals im AMPS zum Zeitpunkt der Kalibrierwertermittlung eindeutig bekannt ist, so dass der Abgleich zwischen Soll- und Istwert und das gezielte Ausschleusen möglich ist.

Der auf ein Bezugsnormal rückführbare Sollwert ist in der Maschinensteuerung hinterlegt. Erreicht das Kalibrier- bzw. Plausibilitätsnormal die Messstelle und wird gemessen, wird der erzeugte Messwert als Kalibrier- bzw. Plausibilitätsresultat erkannt und mit dem Sollwert ver-



glichen. Die Überwachung erfolgt z. B. mit der bereits beschriebenen Kalibrierwertregelkarte. Die Positionsbestimmung der Gebrauchsnormale kann z. B. durch die Codierung eines Werkstückträgers (WT) mithilfe eines Schreib- und Lesesystems erfolgen. Die Ausschleusung muss durch eine Quittierung zusätzlich abgesichert sein. In Abbildung 4-26 ist der Ablauf beispielhaft dargestellt.

#### 4.4.3 Handhabung von Schlechtteilen

In AMPS muss eine eindeutige Handhabung und Ausschleusung von Schlechtteilen und Teilen mit dem Status „unbekannt“ gewährleistet werden. Schlechtteile entstehen durch fehlerhafte Montage- oder Prüfprozesse, oder werden als fehlerhafte Einzelteile dem AMPS zugeführt. Teilstatus unbekannt liegt vor, wenn Montage- oder Prüfprozesse nicht abgeschlossen werden können, oder wenn durch einen manuellen Eingriff die eindeutige Zuordnung verloren geht. Zur fehlerfreien Handhabung von Schlechtteilen und unbekanntem Teilen sind folgende Prinzipien zu beachten.

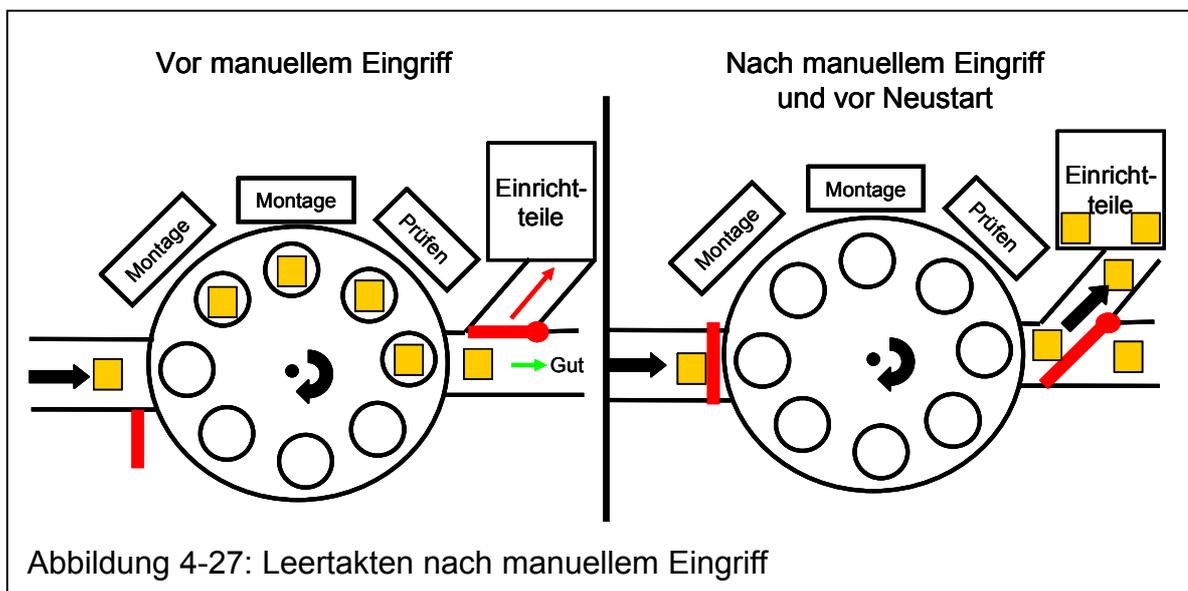
##### Obligatorische Teilebewertung „unbekannt“

In der Maschinensteuerung (SPS) muss für jedes im AMPS befindliche Werkstück grundsätzlich der Ausgangsstatus „unbekannt“ programmiert werden. Während des Prozessablaufes werden in einem teilebezogenen Datenspeicher alle Montage- und Prüfergebnisse gesammelt. Ist eines der Ergebnisse schlecht, z. B. Ausschuss oder Nacharbeit, wird der Teilstatus unverzüglich auf Ausschuss oder Nacharbeit gesetzt. Erst wenn alle Montage- und Prüfpro-

zesse mit „gut“ bewertet wurden, darf der Teilestatus in der Maschinensteuerung auf „Gutteil“ gesetzt werden. Wird der Prozessablauf unterbrochen, z. B. durch eine Störung oder einen manuellen Eingriff, bleibt der Teilestatus unbekannt erhalten.

### Leertakten nach manuellem Eingriff

Durch einen manuellen Eingriff in ein AMPS ist die eindeutige Position und Bewertung von Werkstücken nicht immer nachvollziehbar. Werkstücke könnten vertauscht, oder zusätzliche, manuell ausgelöste Montage- und Prüfoperationen durchgeführt worden sein. Um eine Vermischung von Schlechtteilen mit Gutteilen bei Neustart des automatischen Betriebs zu vermeiden, ist das Leertakten des AMPS notwendig.

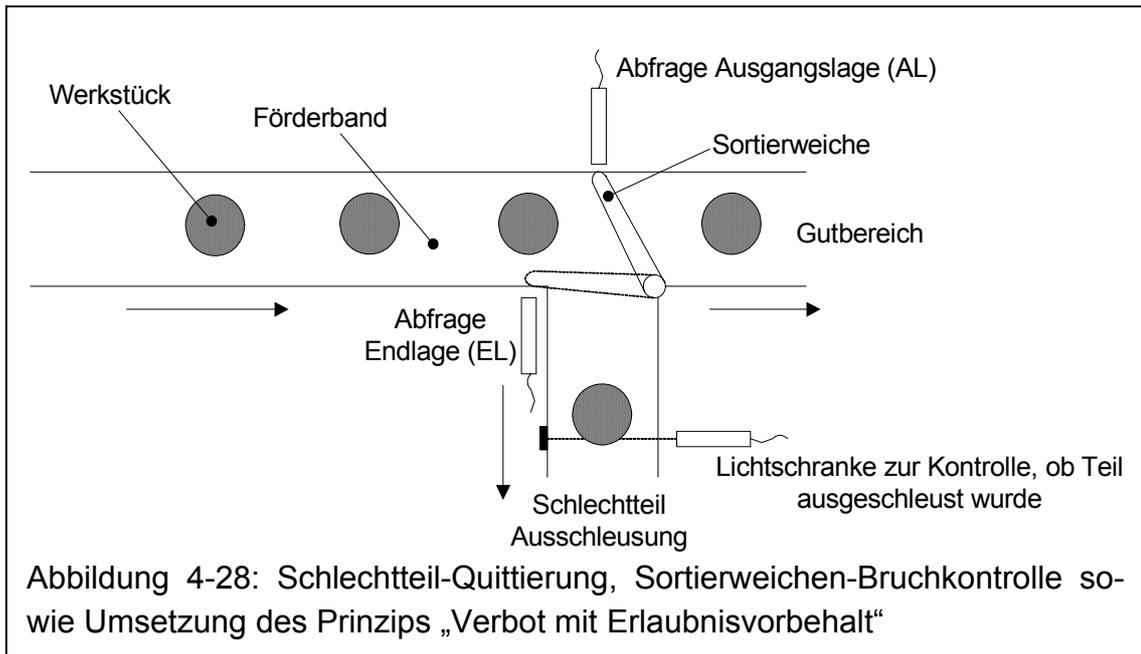


Alle Werkstücke, die nicht eindeutig einer Bewertung zugeordnet werden können, müssen ausgeschleust werden. Abbildung 4-27 zeigt das Prinzip am Beispiel eines Rundtaktmontage- und Prüfautomaten.

### Schlechtteil Quittierung und Sortierweichen Bruchkontrolle

Das Ausschleusen eines Schlechtheils in die Nacharbeit oder den Ausschuss muss durch eine Schlechtteilquittierung überwacht werden. Da im automatischen Ablauf die Position jedes Werkstücks (gut und schlecht) im AMPS eindeutig bekannt ist, kann ein Zeitfenster definiert werden, in dem ein Schlechtteil in den Schlechtteilbehälter ausgeschleust werden muss. Innerhalb dieses Zeitfensters muss durch das Werkstück, z. B. beim Passieren einer Lichtschranke, ein Signal ausgelöst werden (Abbildung 4-28). Fehlt das Signal im Zeitfenster, wird der automatische Betrieb und der Teiletransport gestoppt. Der Maschinenbediener muss nun das Werkstück, das nicht ausgeschleust wurde, aus dem Teiletransport entfernen. Dieser manuelle Eingriff stellt einen Nachteil dieser Vorgehensweise dar, da meist mehrere Werkstücke entfernt werden, um sicher zu stellen, dass das Schlechtteil ausgeschleust wurde. Deshalb sollte, z. B.

durch eine zusätzliche Sortierweichen-Bruchkontrolle, die Ausgangs- und Endlage der Sortierweiche abgefragt werden, um das Auftreten dieses Fehlers zu verhindern (Abbildung 4-28).

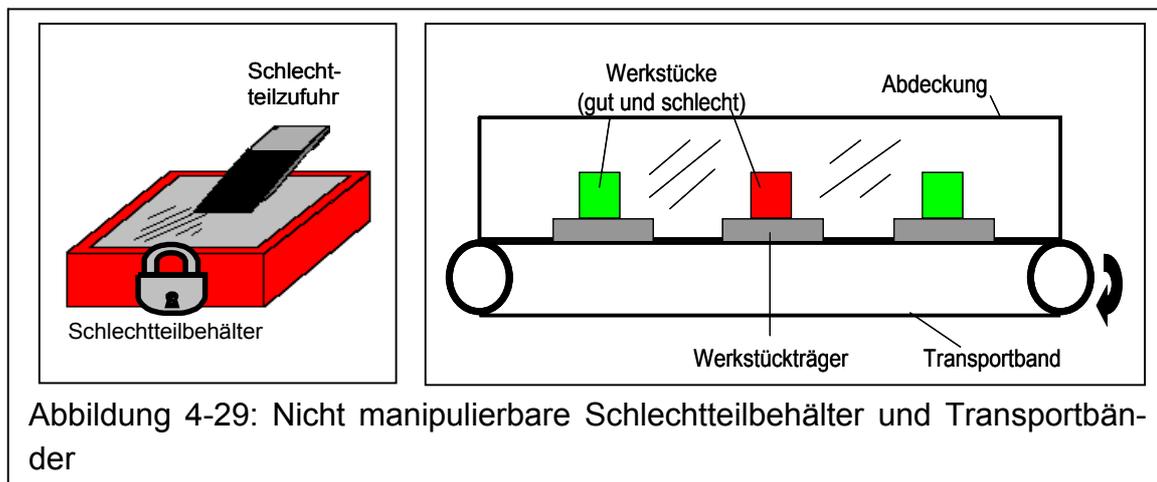


### Prinzip „Verbot mit Erlaubnisvorbehalt“

Dieses Sortierprinzip der Werkstücke besagt, dass der Gutbereich grundsätzlich gesperrt ist. Erst durch eine Gutbewertung des Werkstücks wird eine Bewegung ausgelöst, die die Sortierung in den Gutbereich zulässt. Der stabile Zustand ist die Schlechtsortierung. In Abbildung 4-28 ist dies durch die Ausgangslage der Sortierweiche mit gesperrten Gutbereich dargestellt.

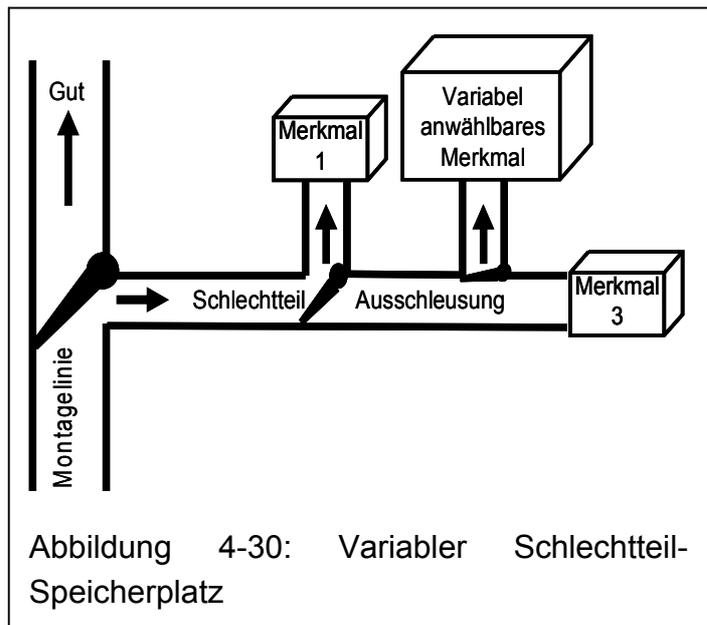
### Nicht manipulierbare Schlechteilbehälter und Transportbänder

Der Transport und die Aufbewahrung von Schlechteilen muss gegen manuellen Eingriff gesichert sein. Der Zugriff auf den Werkstücktransport oder auf den Schlechteilbehälter darf erst nach der Überwindung einer Sperre möglich sein. Dadurch wird z. B. ein unbeabsichtigtes Vertauschen von Werkstücken verhindert. Beispiele für die Umsetzung zeigt Abbildung 4-29.



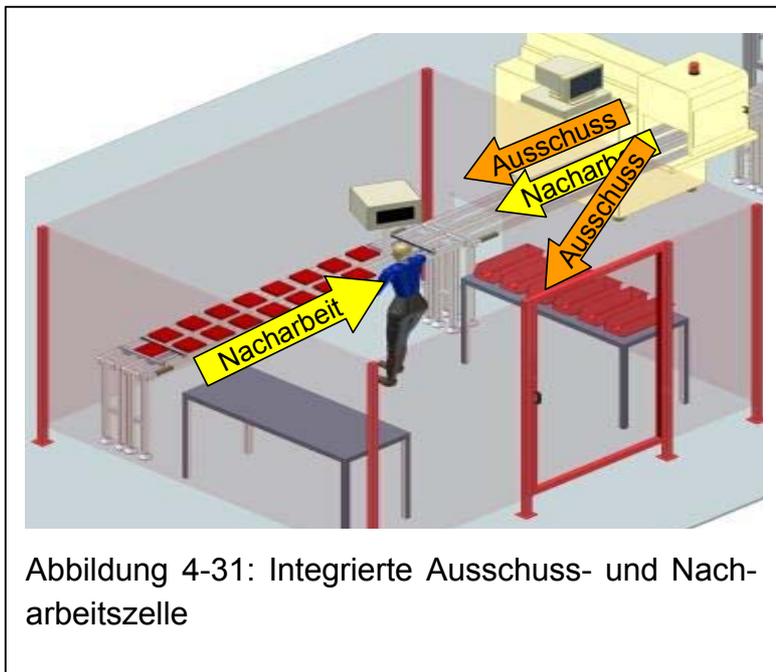
### Variabler Schlechteil-Speicherplatz

Bei dieser Sortiermöglichkeit für Werkstücke hat der Bediener die Möglichkeit, ein Qualitätsmerkmal gezielt auszuwählen und die Werkstücke mit Nacharbeits- oder Ausschussbewertung in diesem Speicherplatz zu sammeln. Dies ermöglicht eine temporäre Sammlung bestimmter Ausschuss- oder Nacharbeitskriterien um das Qualitätsverhalten des Montage- oder Prüfprozesses zu analysieren.



### Integrierte Ausschuss- und Nacharbeitszelle

Bei der integrierten Ausschuss- und Nacharbeitszelle werden Schlechteile an einem separaten, im AMPS integrierten, Arbeitsplatz gesammelt. Der Ausschuss- oder Nacharbeitsgrund ist in der SPS teilebezogen gespeichert und wird dem Bediener zusammen mit der Arbeitsanweisung zur weiteren Handhabung des Schlechteils über ein Informationssystem angezeigt. Eine Arbeitsanweisung könnte z. B. sein, dass Ausschussteile ausgeschleust und nach Ausschussursachen sortiert werden. Für Nacharbeitsteile wird in der Regel ein ursachenbezogener Nacharbeitsablauf durchgeführt und die nachgearbeiteten Teile wieder dem System zugeführt.



### Schwellgrenzen für Schlechteile

Schwellgrenzen erfassen Ausreißer im Prozessablauf. Sie werden zusätzlich zu den Eingriffs- und Toleranzgrenzen definiert und dienen dazu, besondere Ereignisse im Montage- und Prüfprozess zu erfassen. In Abbildung 4-32 ist ein Merkmalsverlauf mit Schwellgrenze dargestellt. In wenigen Fällen führen Störungen zu Extremwerten (Schwellwerten), die weit über die Toleranzgrenzen hinausgehen. Für die Verbesserung des Prozessablaufs ist es hilfreich, die Ursachen für diese Störungen zu analysieren. Dazu können die Werkstücke mit der extremen Merkmalsausprägung gesondert ausgeschleust werden. Auch andere Maßnahmen bei Überschreitung der Schwellgrenzen sind denkbar. Zum Beispiel der Stopp des Prozesses, wenn bekannt ist, dass die extremen Überschreitungen zu Schäden am AMPS führen können.

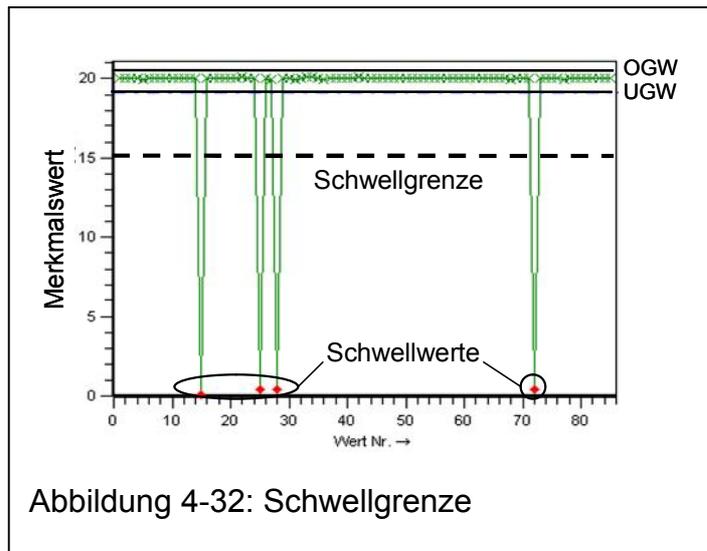


Abbildung 4-32: Schwellgrenze

#### 4.4.4 Teilerückverfolgbarkeit

Definition:

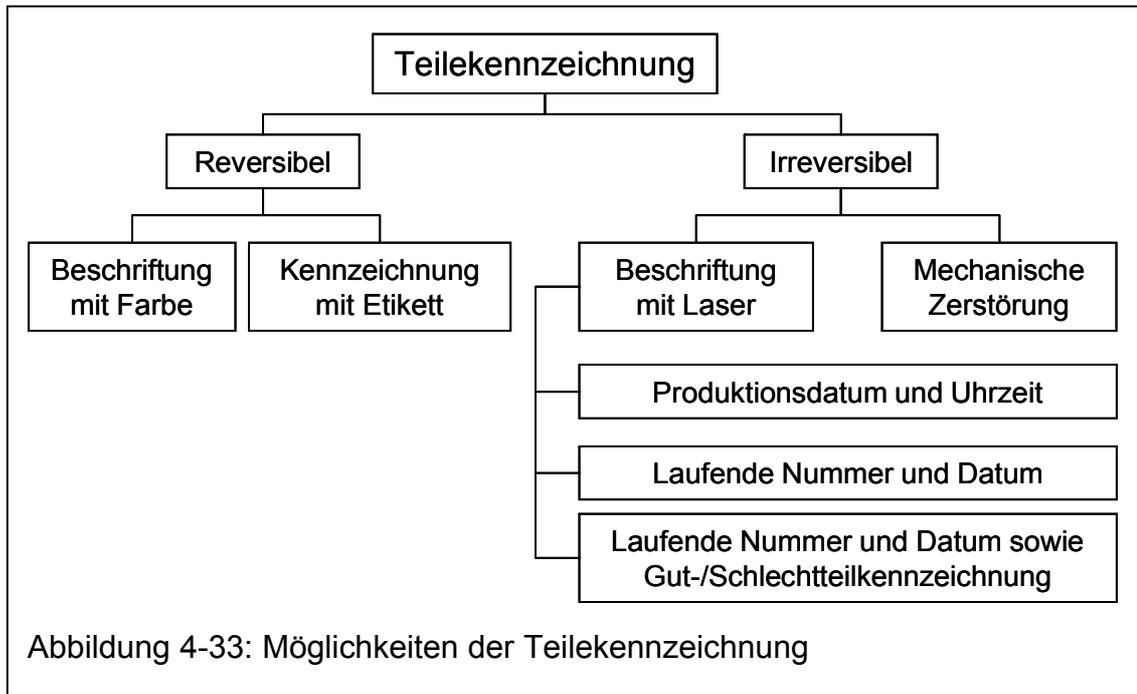
„Unter dem Begriff Rückverfolgbarkeit versteht man die Möglichkeit, Werdegang, Verwendung oder Ort einer Einheit anhand aufgezeichneter Kennzeichnungen verfolgen zu können.“ [DIN 8402 1995, S. 21]

Durch die Teilerückverfolgbarkeit kann zum einen der Nachweis der Einhaltung vereinbarter Qualitätskriterien gegenüber dem Kunden nachgewiesen und die Abgrenzung der betroffenen Teilemenge im Schadensfall durchgeführt werden. Zum anderen hilft die Rückverfolgbarkeit bei der Fehleranalyse im Produktionsprozess. Für sicherheitsrelevante Produkte ist die einzelteilbezogene Rückverfolgbarkeit zwingend vorgeschrieben. Zur Umsetzung der Teilerückverfolgbarkeit sind zwei Voraussetzungen zu erfüllen:

1. Teilekennzeichnung
2. Zuordnung von Produktionsdaten zum Teil oder zur Teilemenge

Die Teilekennzeichnung kann reversibel oder irreversibel erfolgen. Neben der reversiblen Kennzeichnung mit z. B. Farbe und Etiketten, ist die irreversible Beschriftung oder mechanische Zerstörung möglich. Die Kennzeichnung kann sowohl an Gutteilen wie auch an Schlechteilen durchgeführt werden. Während die Kennzeichnung von Schlechteilen zur Fehleranalyse und zur Vermeidung

von Verwechslungen durchgeführt wird, dient die Kennzeichnung von Gutteilen der Zuordnung der Produktionsdaten zum Werkstück. Die Kennzeichnung durch mechanische Zerstörung wird bei Schlechtteilen angewandt. Zum einen wird dadurch eine Verwechslung im Produktionsprozess sicher ausgeschlossen und zum anderen kann Missbrauch durch Dritte, zum Beispiel nach der Verschrottung, unterbunden werden. Abbildung 4-33 stellt die Möglichkeiten der Teilekennzeichnung dar.

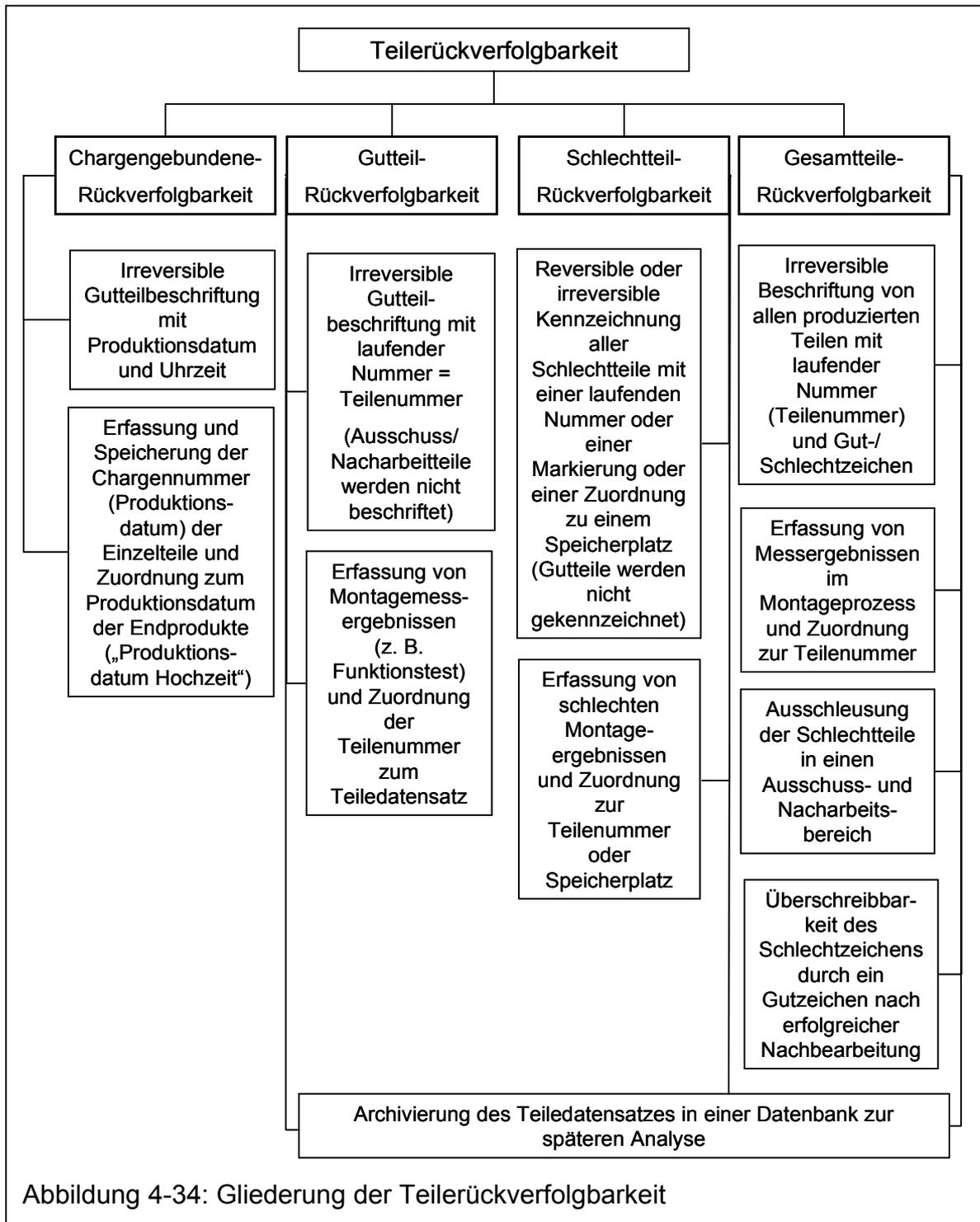


In Abhängigkeit welche Werkstücke gekennzeichnet werden, kann die Teilerrückverfolgbarkeit in eine Chargengebundene-, Gutteil-, Schlechtkteil- und Gesamtteile-Rückverfolgbarkeit gegliedert werden (Abbildung 4-34).

Bei der Chargengebundenen-Rückverfolgbarkeit werden die Werkstücke mit einem Produktionsdatum und einer Uhrzeit irreversibel beschriftet. Zum Produktionsdatum wird die Chargennummer der verwendeten Einzelteile gespeichert. Bei späteren Problemen mit Einzelteilen lässt sich so das „verseuchte“ Produktionslos eingrenzen. Bei der Gutteil-Rückverfolgbarkeit werden nur gute Werkstücke irreversibel mit einer laufenden Nummer beschriftet. Zu dieser Nummer werden die Produktionsdaten, z. B. die Ergebnisse der Funktionsprüfung, gespeichert. Bei der Schlechtkteil-Rückverfolgbarkeit werden nur die Schlechtkteile reversibel oder irreversibel gekennzeichnet. Gutteile werden nicht gekennzeichnet. Der Ausschuss- oder Nacharbeitsgrund wird teilebezogen gespeichert. Diese Vorgehensweise dient der Fehleranalyse im Produktionsprozess oder der Unterbindung von Verwechslung oder Missbrauch.

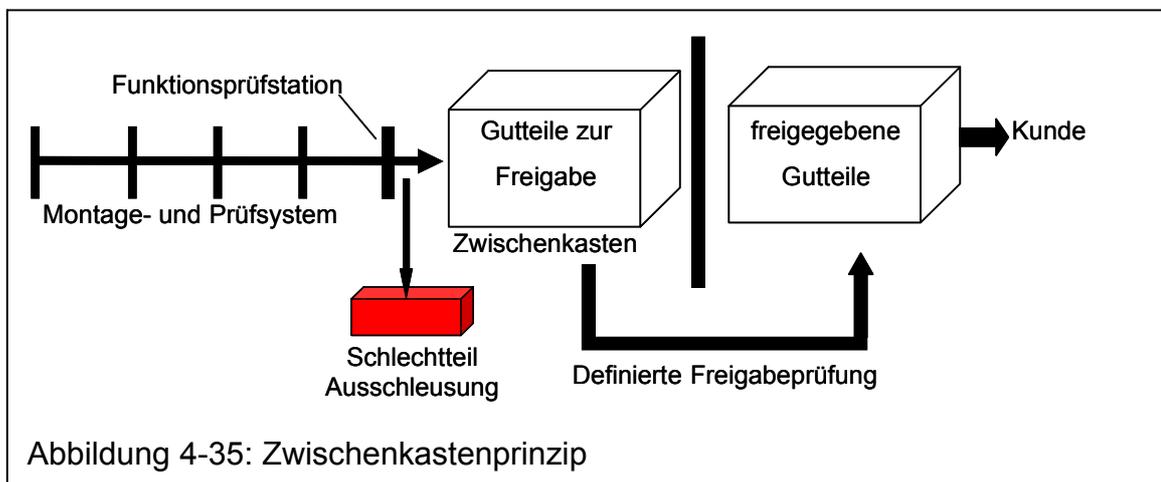
Die aufwändigste und gleichzeitig sicherste Methode ist die Gesamtteile-Rückverfolgbarkeit, bei der sowohl Gut- als auch Schlechtkteile gekennzeichnet werden. Die Gutteile werden sofort irreversibel beschriftet. Die Schlechtkteile

werden in Ausschuss und Nacharbeit unterschieden. Ausschuss wird ebenfalls sofort irreversibel beschriftet oder mechanisch zerstört. Nacharbeit wird reversibel beschriftet. Dabei gibt es verschieden Spielarten. Es kann der einmalige oder mehrmalige Versuch der Nacharbeit zugelassen werden. Ist die Nacharbeit erfolgreich, wird das Gutteil irreversibel beschriftet. Ist die Nacharbeit nicht erfolgreich, wird eine Ausschussbewertung mit der folgenden irreversiblen Kennzeichnung durchgeführt. Abbildung 4-34 gliedert die Teilerückverfolgbarkeit.



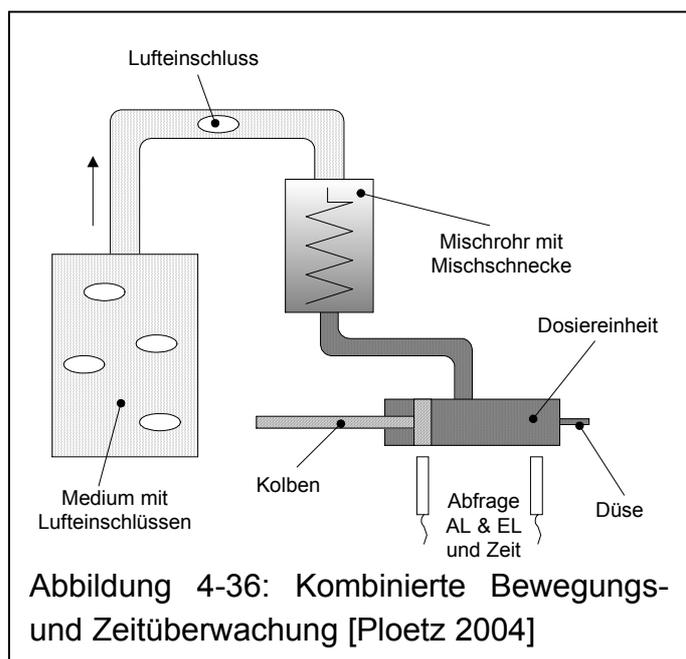
#### 4.4.5 Zwischenkastenprinzip

Beim Zwischenkastenprinzip wird das Produktionslos erst nach einer abschließenden zusätzlichen Prüfung zur Lieferung an den Kunden freigegeben. Diese Freigabeprüfung kann z. B. eine zusätzliche Stichprobenprüfung der Werkstücke oder eine Inspektion und Kalibrierung des AMPS sein. Durch diese Vorgehensweise wird die Qualität des Produktionsloses zusätzlich abgesichert, indem nachträglich die Funktionsfähigkeit qualitätsbestimmender Einrichtungen überwacht wird. Eine Freigabeprüfung kann z. B. die Überwachung einer Funktionsprüfstation der fertig montierten Baugruppe sein. Vor Freigabe des Zwischenkastens wird die Funktionsprüfstation mit Gebrauchsnormalen kalibriert und eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt. Liegen die Prüfergebnisse innerhalb des definierten Qualitätsbereiches (z. B. Kalibrierwertregelkarte), wird der Zwischenkasten freigegeben und mit der Produktion des nächsten Loses begonnen. Abbildung 4-35 stellt den Ablauf graphisch dar.



#### 4.4.6 Bewegungs- und Zeitüberwachung

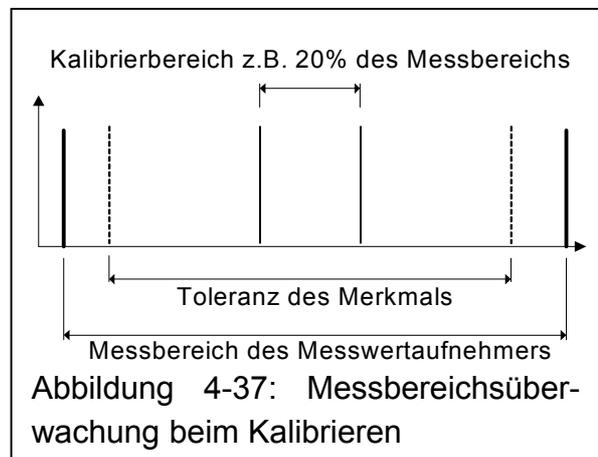
Bewegungen von Komponenten in AMPS können durch ihre Ausgangs- und Endlage sowie durch den Zeitablauf vom Startbefehl zum Verlassen der Ausgangs- bis zum Erreichen der Endlage definiert werden. Die Plausibilitätskriterien bestehen darin, dass nach dem Startbefehl die Ausgangslage verlassen (Signal 1 - 0) und nach einer definierten Zeit die Endlage erreicht (Signal 0 - 1) werden muss. Weiterhin dürfen die Signale von Ausgangs- und



Endlage nicht gleichzeitig anstehen. Die Stabilität des Signals ist ein zusätzliches Kriterium. Dieses wäre dann verletzt, wenn ein Signalwechsel ohne Startbefehl vorliegt. Zum Beispiel dann, wenn das Ausgangs- oder Endlagensignal zwar nach Zeitablauf erreicht, jedoch kurz danach wieder verlassen wird. Am Beispiel einer Dosiereinheit in Abbildung 4-36 wird der Ablauf erklärt. Durch eine Düse wird der Inhalt eines Zylinders mit Hilfe eines Kolbens ausgepresst. Abhängig von der Viskosität und vom Luftgehalt im Medium wird dafür ein gewisses Zeitfenster benötigt. Ausgangs- und Endlage des Kolbens werden durch Initiatoren überwacht. Wird das Zeitfenster vom Startbefehl zum Verlassen der Ausgangslage bis zum Erreichen der Endlage über- oder unterschritten, so ist das ein Hinweis auf eine signifikante Veränderung der Viskosität oder auf zu große Luftpneinschlüsse im Medium.

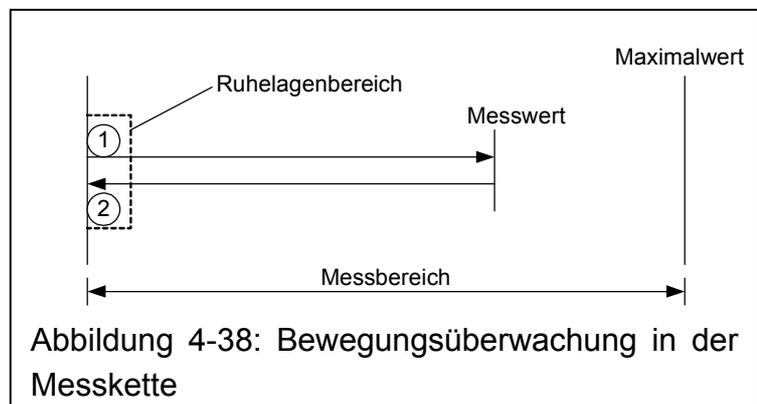
#### 4.4.7 Messbereichsüberwachung beim Kalibrieren

Bei diesem Plausibilitätskriterium muss die Kalibrierung in einem vorher definierten Kalibrierbereich ausgeführt werden. Dieser sollte in der Mitte des Messbereichs liegen. Ein Richtwert für die Breite des Kalibrierbereichs ist zwanzig Prozent des Messbereichs. Die Messbereichsüberwachung erfüllt zwei Funktionen. Erstens werden dadurch Linearitätsfehler minimiert. Zweitens wird die Erkennung von Justagefehlern, Beschädigung der Messkette und der Messstation sowie übermäßiger Verschleiß erkannt.



#### 4.4.8 Bewegungsüberwachung in der Messkette

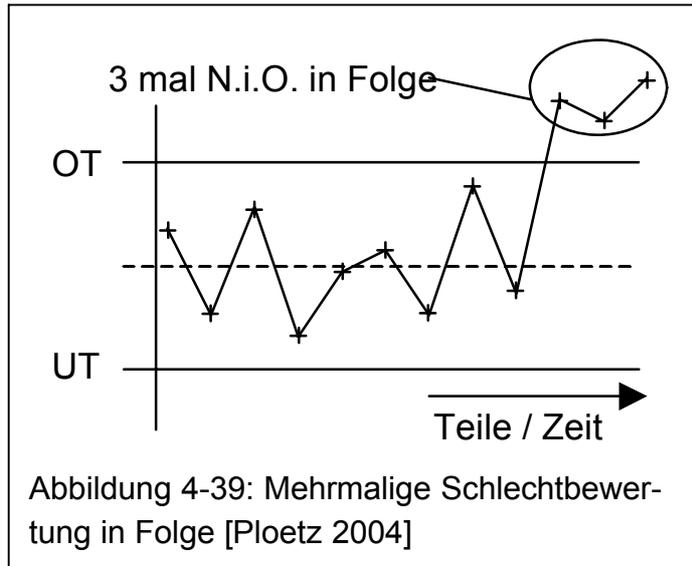
Die Bewegungsüberwachung in der Messkette wird durch die Definition eines Ruhelagenbereichs und einer Messposition außerhalb dieses Bereichs realisiert. Nach dem Start des Messablaufs muss das Messsignal (Punkt 1) den Ruhelagenbereich verlassen und nach Beendigung wieder dorthin zurückkehren (Punkt 2 in Abbildung 4-38). Durch dieses Plausibilitätskriterium können Schäden in



der Messkette, wie z. B. defekter Messaufnehmer, Kabelbruch oder eine fehlerhafte Justage des Messwertaufnehmers erkannt werden.

#### 4.4.9 Mehrmalige Schlechtbewertung in Folge

Die mehrmalig aufeinanderfolgende Überschreitung von Toleranzgrenzen kann zwei Gründe haben. Zum einen kann der Produktionsprozess gestört sein, zum anderen kann der Messprozess Schaden genommen haben. In beiden Fällen ist es sinnvoll, den Produktionsprozess anzuhalten, um die Ursache der mehrmaligen Überschreitung zu beseitigen. Dabei ist je nach Anwendungsfall zu definieren, wie viele aufeinanderfolgende Überschreitungen zugelassen werden, bis der Prozess gestoppt wird. In der Praxis hat sich eine dreimalige Schlechtbewertung in Folge als Unterbreungskriterium bewährt.



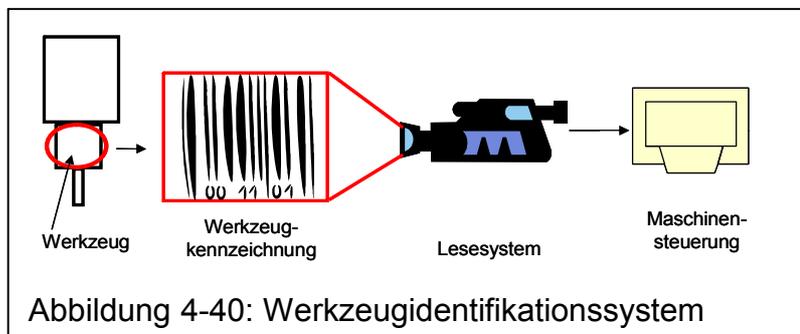
#### 4.4.10 Rüstvorgänge

Bei Rüstvorgängen können folgende Plausibilitätskriterien zur Fehlervermeidung beitragen.

##### Werkzeugidentifikationssysteme

Mithilfe einer automatischen Werkzeugidentifikation können manuelle Fehler bei der Werkzeugauswahl während des Rüstvorgangs auf einen andere Werkstücktype vermieden werden. Besonders hilfreich ist das bei ähnlichen Produkten.

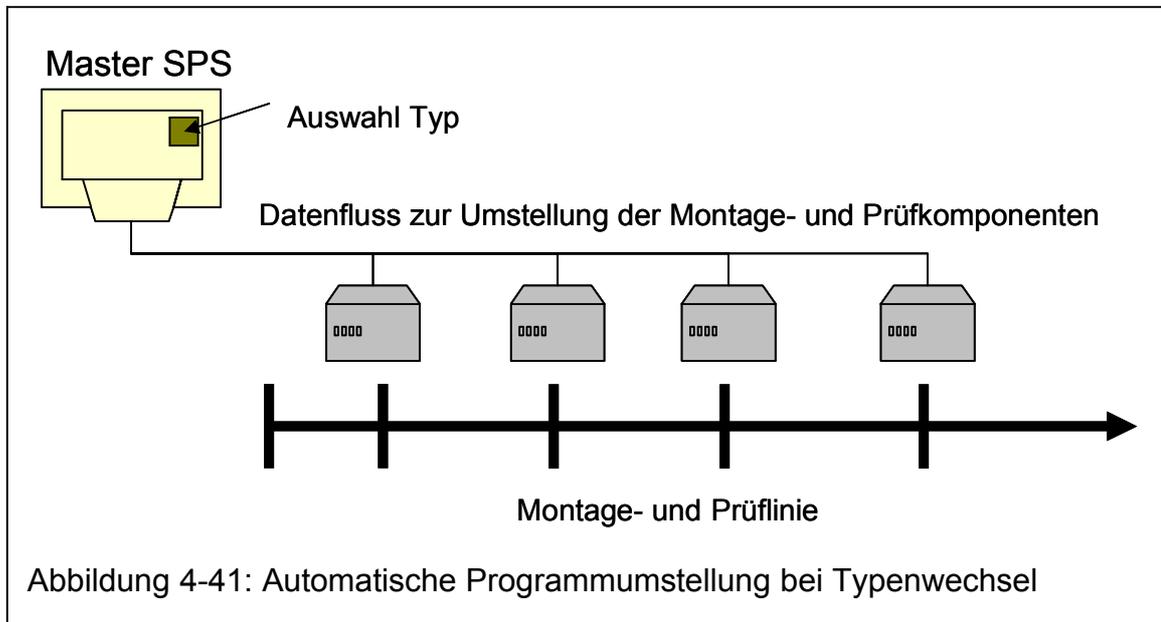
Der prinzipielle Aufbau in Abbildung 4-40 zeigt als Beispiel ein Werkzeug mit Barcodekennzeichnung und ein Kameralesesystem. Die Kennzeichnung wird mit der in der Maschinensteuerung hinterlegten Sollkennzeichnung verglichen. Die Werkzeugerkennung kann mit einer automatischen Programmumstellung kombiniert werden [Strauch 2005].



Die Werkzeugerkennung kann mit einer automatischen Programmumstellung kombiniert werden [Strauch 2005].

### Automatische Programmumstellung bei Typenwechsel

Dadurch wird gewährleistet, dass alle Montage- und Prüfkomponten in einem AMPS gleichzeitig auf den neuen Werkstücktyp umgestellt werden. Dies kann z. B. durch die Auswahl an einer Master SPS oder mit einem Werkzeugidentifikationssystem erfolgen. Abbildung 4-41 verdeutlicht den Ablauf.



### Schnellverschlüsse für Werkzeugwechsel

Diese mechanische Hilfestellung, z. B. über Schnappverschlüsse, ermöglicht das beschleunigte Auswechseln der typengebundenen Werkzeuge. Dies erleichtert das positionsgenaue Einpassen und verkürzt die Rüstzeit.

#### 4.4.11 Poka Yoke Maßnahmen

Der japanische Ausdruck Poka Yoke (Poka = unbeabsichtigter Fehler, Yoke = Vermeidung) ist eine Vorgehensweise zur Vermeidung und Verminderung unbeabsichtigter menschlicher Fehler [Linß 2002, S. 320]. Beim Poka Yoke Prinzip werden einfache Vorrichtungen eingesetzt, um den Bediener bei seiner Arbeit zu unterstützen. Dabei sollen alle Konstruktionen und Fertigungsabläufe so gestaltet werden, dass bestimmte zufällige Fehler nicht mehr auftreten können, oder sofort nach dem Auftreten entdeckt werden [Reich 2004].

Poka Yoke verfolgt die systematische Ausschaltung von folgenden Fehlerursachen:

- Vergessen,
- Verwechseln,
- Vertauschen,
- Missverständnisse,

- Lesefehler oder
- Informations- und Kommunikationsfehler [Linß 2002, S. 320].

In AMPS kann Poka Yoke hauptsächlich im manuellen Betrieb, also beim Rüsten und Instandhalten, aber auch als Leitidee beim Konstruieren und bei der Produktionsplanung eingesetzt werden. Besonders bei Rüstvorgängen, bei denen der Mensch als Fehlerquelle auftritt, ist Poka Yoke ein gut geeignetes Prinzip zur Fehlervermeidung oder Fehlererkennung. Beim Rüsten können dem Bediener standardisierte Abfolgen der Arbeitsschritte vorgeschrieben werden, die es trotz der Störgröße Mensch nicht möglich machen, einen Rüstfehler zu begehen [Quintec 2004].

## 5 Absicherungs-Algorithmen zur Steigerung der Qualitätsleistung

Als Neuerung bei der Planung von AMPS werden die Methoden der Fehlererkennung zu Algorithmen kombiniert, sodass sie in ihrer Gesamtwirkung die Qualitätsleistung von AMPS verbessern. Dabei wird zwischen einem Standard-Absicherungs-Algorithmus (S-Ab-AI) sowie einem planbaren Erweiterten-Absicherungs-Algorithmus (E-Ab-AI) unterschieden. Zur Umsetzung wurde ein Planungswerkzeug entwickelt, das die im Kapitel 3 beschriebenen finalen Fehler zusammenfasst und einem Planungsteam hilft, geeignete Methoden der Fehlererkennung auszuwählen. Das Planungsergebnis sind die bedarfs- und risikogerecht kombinierten Methoden der Fehlererkennung mit voraussichtlichen Kosten.

### 5.1 Standard-Absicherungs-Algorithmus (S-Ab-AI)

Der S-Ab-AI sollte für alle AMPS gelten. In diesem Standard werden alle Methoden der Fehlererkennung zusammengefasst, die als Voraussetzung für eine akzeptable Qualitätsleistung eines AMPS notwendig sind (Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Standard-Absicherungs-Algorithmus für alle AMPS

Messkette	Bewegungsüberwachung in der Messkette (Ruhe- und Messpositionsüberwachung)
	Messbereichsüberwachung beim Kalibrieren
	Mehrpunktkalibrierung bei Messsystemen, deren Linearitätsverhalten im Messbereich definiert werden muss (z. B. pneumatische Messsysteme).
	Automatisches Kalibrierintervall
Stationsebene	Existenz der Werkstücke prüfen
	Positions- und Lageüberwachung der Werkstücke
	Ausgangs- und Endlage von Bewegungen überwachen
Prozessebene	Obligatorische Teilebewertung „unbekannt“, bis alle Montage- und Prüfvorgänge positiv abgeschlossen sind.
	Verbot mit Erlaubnisvorbehalt Gutspur ist blockiert im Einricht- und Automatikbetrieb
	Schlechtteil Quittierung

Prozess- ebene	Stopp nach mehrmals (i. d. R. dreimal) Schlechtbewertung hintereinander
	Änderung der (normalen) Rahmenbedingungen (z. B. Verschmutzung) müssen zu einer Schlechtbewertung führen
	Schlechtteil-Klassifizierung; für jedes Schlecht-Merkmal ein eigener Speicherplatz. Ausnahme: sinnvolle Zusammenlegung von Merkmalen
manueller Eingriff	Leertakten nach manuellem Eingriff: Restteilbestände in der Maschine ausschleusen
	Eindeutige Sortierung bei Notaus oder Halt nach Ausgangslage / Leerlauf und bei Wiederanlauf (z. B. nach Störungen)
	Farbliche Kennzeichnung von Referenzteilen
	Nicht manipulierbare Schlechtteilbehälter und Transportbänder
	Referenzteile (z. B. Kalibrier- und Plausibilitätsteile) werden automatisch ausgeschleust

Der Verzicht auf nur einen dieser Standards kann im Wirkungsverbund des AMPS zu massiven Einbrüchen der Qualitätsleistung führen.

## 5.2 Erweiterter-Absicherungs-Algorithmus (E-AB-AI)

Der E-Ab-AI beinhaltet alle Methoden der Fehlererkennung, die nicht zum Standardumfang gehören. In ihm werden die beschriebenen Methoden zunächst in die, im Kapitel 3 definierten Funktionsbereiche gegliedert. Während der S-Ab-AL aus standardisierten Methoden der Fehlererkennung besteht, ist der E-Ab-AL variabel planbar. Abhängig von den Fehlermöglichkeiten in dem zu planenden AMPS, wird von einem Planungsteam eine bedarfsgerechte Kombination der Methoden erarbeitet.

Dazu wurde ein Planungswerkzeug entwickelt, mit dem das Planungsteam die Entdeckung der finalen Fehler durch den Standard-Absicherungs-Algorithmus bewerten und mit einer Risikoprioritätszahl (RPZ) eine Risikoabschätzung durchführen kann.

Ein Maß für das Fehler-Entdeckungspotenzial einer Methode ist die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E). Ein Maß für die Signifikanz des finalen Fehlers sind das Auftreten und das Gewicht. Tabelle 5-2 definiert den Bewertungsmaßstab. Auftreten, Gewicht und Entdeckung sowie die voraussichtlichen Kosten der Methoden der Fehlererkennung wurden bei der Erstellung des Planungswerkzeuges von einem Expertenteam festgelegt (Tabelle 5-3 bis 5-6).

Die Kosten entstehen pro Typ, das heißt pro Ausführung. Zum Beispiel entstehen die Kosten für Referenznormale (Gebrauchsnormale) in der Regel pro zu messendes Merkmal (MM), während die Kosten für die automatische Programmumstellung bei Typenwechsel einmalig anfallen. Die Angabe der Höhe der Kosten ist ein unverbindlicher Schätzwert und muss für die jeweilige Branche (z. B. Automobilzulieferindustrie) angepasst werden.

Auftreten	sicheres Auftreten	sehr wahrscheinlich	zufälliges Auftreten	nie bis selten	
Bewertungszahl	10 - 9	8 - 7	6 - 5	4 - 3	2 - 1
Prozessfähigkeit	Cpk < 0,8	0,8 < Cpk < 1,0	Cpk = 1,0	Cpk > 1,33	> 1,67
<b>Gewicht</b>	gravierend führt zu N.i.O am komplexen Fertigteil und kann nicht nachbearbeitet werden	schwerwiegend / hoch führt zu N.i.O am Zwischenprodukt; abhängig vom Montageschritt kann schwer oder nicht nachbearbeitet werden	mittelschwer / durchschnittlich führt zu N.i.O an einer preisgünstigen Baugruppe oder kann nachbearbeitet werden	leicht zu beheben oder kein großer Verlust	
Bewertungszahl	10 - 9	8 - 7	6 - 5 - 4	3 - 2 - 1	
<b>Entdeckung</b>	zufällige Entdeckung Fehler wird durch Absicherungsmaßnahme nicht erkannt	75% Chance des Entdeckens	sehr wahrscheinlich (>90%)  Absicherungsmaßnahmen relativ sicher	sicher (100%) Entdecken sehr wahrscheinlich; durch mehrere voneinander unabhängige Maßnahmen	
Bewertungszahl	10 - 9	8 - 7	6 - 5 - 4	3 - 2 - 1	

Ein Beispiel verdeutlicht den Aufbau der Tabellen 5-3 bis 5-6:

Die Methode „Schwellgrenzen“ (siehe 4.4.3) ist eine Methode der Fehlererkennung im Funktionsbereich Messkette und Station. Die Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fehlern im AMPS mit dieser Methode wurde in beiden Funktionsbereichen mit acht (8), d. h. mit einer relativ niedrigen Entdeckungswahrscheinlichkeit von ca. 75%, bewertet. Die Kosten für die Umsetzung liegen pro Merkmal, auf das diese Methoden angewandt wird, bei etwa 500 Euro .

Tabelle 5-3 bis 5-6: Methoden zur Fehlererkennung für die Funktionsbereiche

	E	Kosten in 1000€	pro Typ
Schwellgrenzen	8	0,5	MM
Min, max, mittel Referenzteil oder Referenzmesssystem	7	1,5	MM
PC-gestützte Kalibrierwertregelkarte	5	0,5	MM
Nullpunkt, Kalibrier-, Verstärkerkennwert automatisch prüfen	5	1	MA
Automatisches Kalibrieren mit PC-gestützter Kalibrierwertregelkarte	4	10	MM
Vergleich gleitender Mittelwert aus parallelen Messstationen	4	1	MM
Merkmal wird in einer bereits vorhandener Station zusätzlich geprüft	3	0,5	MM
Sequenzielle baugleiche Messstationen (homogene Hardwareredundanz (HR))	1	15	ST
Zusätzliche Prüfung des Merkmals mit bauähnlicher Station (diversitäre HR)	1	15	ST

	E	Kosten in 1000€	pro Typ
Schwellgrenzen	8	0,5	MM
Min, max, mittel Referenzteil	7	1,5	MM
PC-gestützte Kalibrierwertregelkarte	5	0,5	MM

Automatisches Kalibrieren mit PC-gestützter Kalibrierwertregelkarte	4	10	MM
Werkzeugüberwachung durch Lichtschranke (Bruch Überwachung)	4	1	WZ
Vergleich paralleler Messstationen (analytische Redundanz)	4	1	MM
Merkmal wird in vorhandener Station zusätzlich geprüft	3	0,5	MM
Identität zugeführtes Werkstück prüfen (z. B. Kamera)	3	3	MM
Leistungs- und Positionsüberwachung Antriebseinheit (Verschleißerkennung)	3	0,5	AT
Reibwerttest der Antriebs-, Getriebe und Lagereinheit	3	1	ST
Werkzeugüberwachung durch Kamera (Bruch und Verschleiß)	3	3	WZ
Prüfung Einzelteil vorsehen	3	15	ST
Sequenzielle Messstationen (homogene Hardwareredundanz (HR))	1	15	ST
Zusätzliche Prüfung des Merkmals mit bauähnlicher Station (diversitäre HR)	1	15	ST

Tabelle 5-5 Funktionsbereich "Prozess"

	E	Kosten in 1000€	pro Typ
Je N.i.O.-Merkmal ein N.i.O.-Speicherplatz	7	1	MM
Variabler N.i.O.-Speicherplatz	7	1	ML
Chargengebundene Teilerückverfolgbarkeit	7	1	ML
Sortierweichen Bruchkontrolle	6	0,5	ST
Wiedereintakten von Nacharbeitsteilen	6	5	ML
Reversible Schlechteilkennzeichnung	6	20	ML
Gutteile Rückverfolgbarkeit	5	12	ML
Integrierter Nacharbeits- und Ausschuss-Arbeitsplatz	4	25	ML
Gesamteile Rückverfolgbarkeit mit irreversibler Schlechteilkennzeichnung	3	15	ML
Integrierter NA- und AA-Arbeitsplatz mit Gesamteile Rückverfolgbarkeit	2	70	ML
Irreversible Schlechteilkennzeichnung	2	10	ML
Zusätzliche Prüfung (Station) Merkmal	2	15	ST
Automatischer Referenzteile Umlauf	2	10	ML
Ausreichend große N.i.O.-Speicher vorsehen	5	0,5	MM
Schlechtteil Einzelrückverfolgbarkeit (z. B. nummerierter Speicherteller)	5	2	MM
Speicherplatz für Teilestatus unbekannt vorsehen	6	2	ML

Tabelle 5-6 Funktionsbereich „Manueller Eingriff“

	E	Kosten in 1000€	pro Typ
Arbeitsanweisungen	7	0,5	ML
Checklisten	7	0,5	ML
Schnellverschlüsse für Werkzeugwechsel	7	1	ST
Schnellwechsellvorrichtung für Gebrauchsnormale bzw. Referenzmesssystem	7	1	ST
Unmanipulierbare Schlechteilebehälter und Transportbänder	5	2	ML
Verbausicherung Referenzteile	4	0,5	RT
Automatisches Ausschleusen von Referenzteilen	4	0,5	ML
Einfache Poka Yoke Lösung ausarbeiten (z. B. Einlegeschieke)	2	2	ST
Aufwändige Poka Yoke Lösung (z. B. zusätzliche Kameraprüfung)	2	10	ST
Vollzähligkeitskontrolle für Referenzteile (Setzkasten)	3	1	ML
Automatische Programmumstellung bei Typenwechsel	3	1	ML
Leertakten nach manuellem Eingriff/Notaus	3	1	ML
Werkzeugidentifikationssysteme (Kamera, Barcode)	3	3	WZ
Zusätzliche Prüfung Merkmal	2	15	ST
Zwischenkastenprinzip mit Zwischenspeicher realisieren	4	5	ML

Legende: MM Merkmal; AT Antrieb, BW Bewegung, WZ Werkzeug, ST Station; ML Montagelinie, MA Messaufnehmer, RT Referenzteil, E Entdeckungswahrscheinlichkeit

**Durchführung und Ergebnis des Planungswerkzeuges:**

## 1. Schritt:

Ein kleines Planungsteam bestehend aus drei, maximal vier Personen, diskutiert das Lastenheft und das vorläufige Layout des AMPS.

## 2. Schritt:

Anhand der finalen Fehler (Spalte „Finale Fehler“ in Abbildung 5-1) und des Standard-Absicherungs-Algorithmus entscheiden die Teammitglieder, welche Fehlerkette (Spalten „Ursache“ und „Fehlerfolge“) für das AMPS zutrifft. Wird eine zutreffende Fehlerkette mit zu hoher RPZ bewertet, können mithilfe des Auswahlkataloges zusätzliche Methoden der Fehlererkennung für einen verbesserten Zustand gewählt werden. Bietet der Auswahlkatalog keine geeignete Maßnahme an, so kann manuell eine andere Lösungsmöglichkeit eingetragen werden. Das Team arbeitet alle Fehlerketten in den Funktionsebenen ab und legt zusätzliche Maßnahmen für den verbesserten Zustand fest. Für jede Maßnahme sind Realisierungskosten hinterlegt, die automatisch in das Formblatt eingetragen werden.

## 3. Schritt:

Das Team diskutiert die Vollständigkeit der finalen Fehler. Werden zusätzliche Fehlermöglichkeiten erkannt, können diese manuell ergänzt werden.

## 4. Schritt:

Ebenfalls in Teamarbeit müssen die festgelegten zusätzlichen Absicherungsmaßnahmen auf ihre Plausibilität im Gesamtablauf überprüft werden. Insbesondere Methoden der Fehlererkennung, die sich auf das gesamte AMPS beziehen sowie Doppelnennungen müssen geprüft werden. Weiterhin ist die Kostenabschätzung auf die jeweilige Branche anzupassen und zu optimieren. Aufgrund der im Vorfeld festgelegten Entdeckungswahrscheinlichkeiten kann es dazu kommen, dass durch die ausgewählte Methode der Fehlererkennung die Risikoprioritätszahl nicht ganz den unkritischen Bereich ( $RPZ < 300$ ) erreicht, obwohl die gewählte Methode objektiv ausreichend ist. Zum Beispiel ist das im Anhang D bei der Methode „Werkzeugüberwachung durch Lichtschranke“ der Fall ( $RPZ = 320$ ). In diesem Fall sollte durch eine Bemerkung, z. B. Maßnahme ausreichend, die Auswahl dieser Methode gerechtfertigt werden.

Als Ergebnis erhält das Planungsteam zusätzlich zum festgelegten Standard-Absicherungs-Algorithmus eine bedarfsgerechte Kombination verschiedener Methoden der Fehlererkennung sowie voraussichtliche Kosten für deren Realisierung. In Abbildung 5-1 ist das Planungswerkzeug beispielhaft dargestellt. Als Auswahlkatalog sind im jeweiligen Funktionsbereich die Tabellen 5-3 bis 5-6 hinterlegt. Im Anhang D ist das Planungswerkzeug vollständig dargestellt.

FMEA für automatische Montage- und Prüfsysteme			Erstellt durch:		Überarbeitet durch:		Genehmigt durch:						
Merkmal: Verstemmen Bolzen			Datum:		Datum:		Datum:						
			500 < RPZ < 1000 <span style="color:red">■</span>		Teil-Nummer:		Teil-Bezeichnung:						
			300 < RPZ < 500 <span style="color:yellow">■</span>										
			0 < RPZ < 300 <span style="color:green">■</span>										
Finale Fehler	Ursache	Folge	Istzustand				Verbesserter Zustand				Kosten (in 1000 €)	Anzahl Type	
			S-Ab-AI	Anfahrlinien	Gewicht	Erkennung	RPZ	Zusätzliche Absicherungsmaßnahme Erweiterter-Absicherungs-Algorithmus (E-Ab-AI)	Anfahrlinien	Gewicht			Erkennung
Messkette Messwert liegt knapp außerhalb der Produktionstoleranz	Messunsicherheit an Toleranzgrenzen, Messsystem nicht korrekt justiert, Kalibrierfehler	Teil wird in AA / NA sortiert	S-Ab-AI	7	3	3	63	Tabelle 5-3 hinterlegt 1. Schwellgrenzen 2. Min, max, mittel Referenzteil 3. PC-gestützte Kalibrierwertregelkarte 4. Merkmal wird in vorhandener Station mitgeprüft					
		Teil wird in eine Nachbargutgruppe einsortiert		7	5	3	105						
Messkette Messwert liegt außerhalb der Funktionstoleranz	grober Messfehler durch grobe Störfaktoren (z. B. Verschmutzung, Werkzeugbruch)	Teil wird in AA / NA einsortiert	S-Ab-AI	7	3	5	105	Sequentielle Messstationen (Redundanz), ZK nicht nötig (2; 15/ST)				15,0	1
		Teil wird in eine entfernte Gutgruppe sortiert		7	10	10	700						
			Tabelle 5-4 hinterlegt ..... 4. Werkzeugüberwachung durch Lichtschranke 5. Leistungs- und Positionsüberwachung Antriebseinheit				7	10	2	140			
Station Initiator sendet falsches Signal	Initiator wird verstellt oder beschädigt, elektromagnetische Störungen	Keine Erkennung von Zuständen oder Bauteilen mehr möglich	S-Ab-AI	5	8	8	320	Anschlagposition vorsehen (5; 0,5/BW) Bemerkung zu Auswahl 8: Tabelle 5-5 hinterlegt 1. Chargengebundene-Teilerückverfolgbarkeit 2. Sortierweichen-Bruchkontrolle 3. Gutteile-Rückverfolgbarkeit				0,5	1
Prozess Teil durch Prüfsystem richtig bewertet, aber SPS oder Mechanik/Roboter sortiert falsch	Zuordnung Teile-Daten in SPS falsch oder Sortiermechanik beschädigt bzw. falsch justiert	Ni.O. wird gut	S-Ab-AI	5	10	7	350	Gutteile Rückverfolgbarkeit (5; 12/ML) Tabelle 5-6 hinterlegt 1. Arbeitsanweisungen 2. Schnellverschlüsse für Werkzeugwechsel 3. Nicht manipulierbare Schlechteilebehälter und Transportbänder 4. Verbausicherung Referenzteile				12,0	1
Einrichten Bauteile fallen herunter oder werden entnommen	manueller Eingriff, Fehler im automatischen Ablauf	ungeprüfte oder halbfertige Teile verseuchen Gutteile	S-Ab-AI	7	10	9	630	Verbausicherung Referenzteile (4; 0,5/RT) Bemerkung zu Auswahl 19:				1,0	2
zusätzliche Absicherungsmaßnahmen											<b>28,5 €</b>		

Abbildung 5-1: Planungswerkzeug zur bedarfsgerechten Planung des E-Ab-AI

## 6 Steigerung der Verfügbarkeit von AMPS

### 6.1 Verfügbarkeitsgewinn durch fehlersichere Montage- und Prüfkomponenten

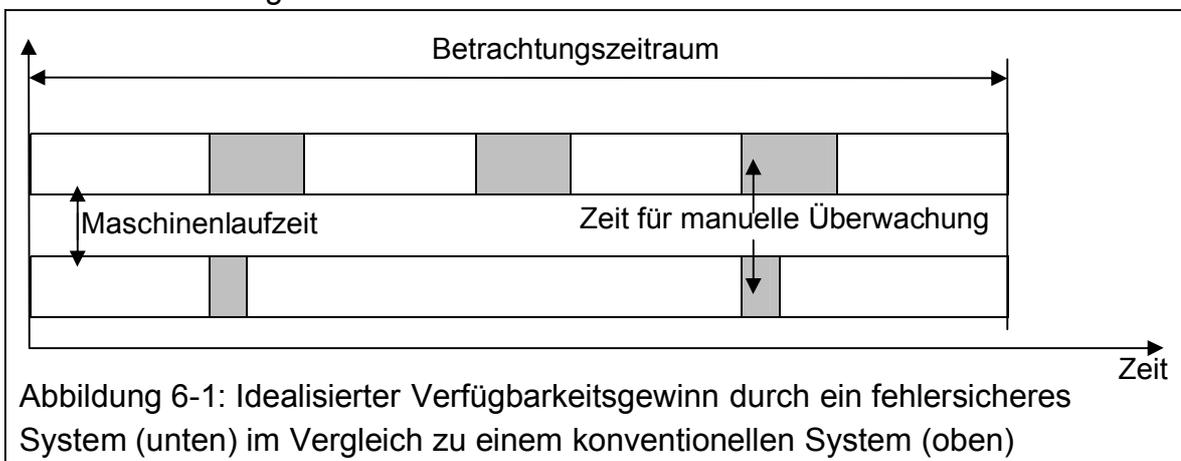
Der Beitrag der Absicherungs-Algorithmen zur Steigerung der Verfügbarkeit von AMPS besteht in der

zeitlichen Verkürzung und der Reduktion der Häufigkeit von manuellen präventiven Überwachungsmaßnahmen durch den Einsatz fehlersicherer Montage- und Prüfkomponenten.

Definition Fehlersicherheit bzw. Eigensicherheit (vgl. auch Kapitel 4.1)

Fähigkeit eines Montage- oder Prüfsystems Fehler sofort nach ihrem Auftreten oder in einem kurzen zeitlichen Abstand danach automatisch zu erkennen und anzuzeigen.

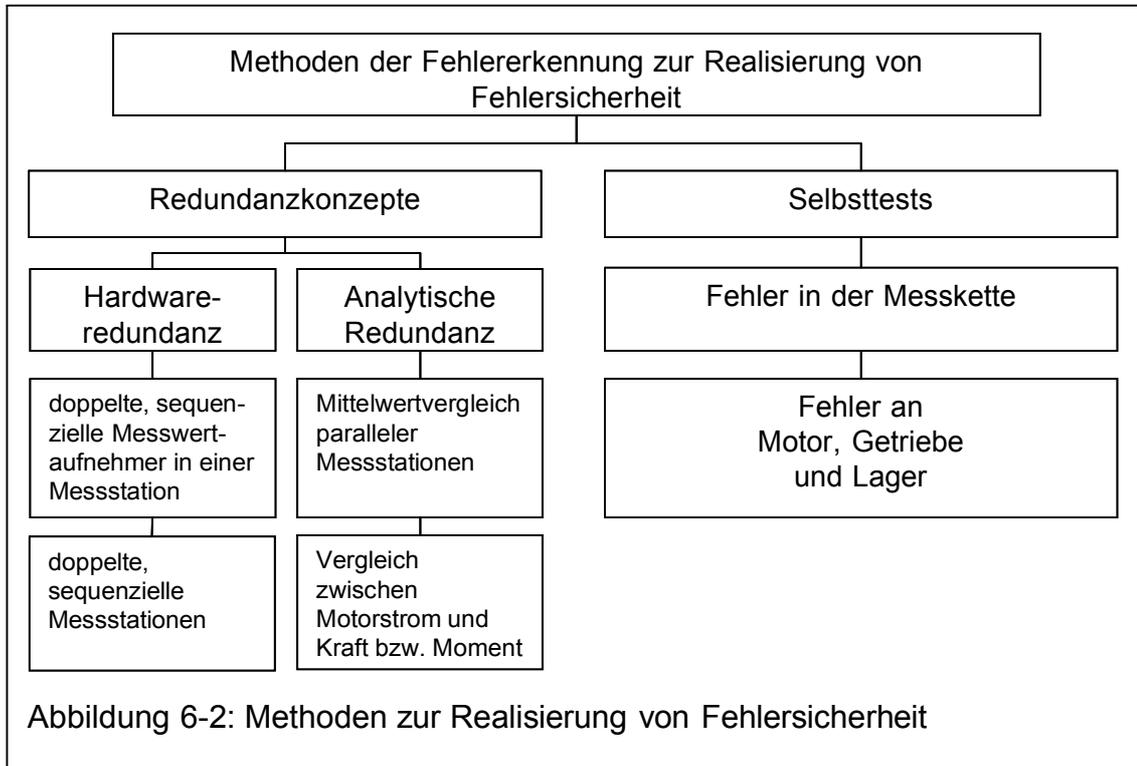
In Abbildung 6-1 ist der Gewinn an Maschinenlaufzeit durch die Reduktion des zeitlichen Aufwands und der Häufigkeit der manuellen Überwachungsmaßnahme idealisiert dargestellt.



Die Fehlersicherheit einer Montage- und Prüfkomponente wird durch den Einsatz von Fehlererkennungsmethoden auf Mess- und Stationsebene erreicht. Dadurch wird die gesamte Funktionsfähigkeit überwacht. Im Kapitel 4 wurden die Methoden der Fehlererkennung bereits beschrieben. Zur Realisierung der Fehlersicherheit eignen sich besonders Redundanzkonzepte und Selbsttests.

Mit Selbsttests können die Messkette, der Antrieb (Motor und Drehzahl) sowie der Reibwerte in einer Station geprüft werden. Bei der Hardwareredundanz wird die Differenz der Messergebnisse sequenzieller Messwertaufnehmer oder Stationen mit einer maximal zulässigen Differenz verglichen. Bei der analytischen

Redundanz erfolgt ein Mittelwert- oder ein Proportionalitätsvergleich. Der Mittelwertvergleich eignet sich für doppelte parallele Messstationen, die Merkmale aus derselben Grundgesamtheit prüfen. Der Proportionalitätstest eignet sich für den Vergleich proportionaler Zusammenhänge, wie z. B. zwischen der Stromaufnahme eines Antriebsmotors und dessen abgegebenes Drehmoment (Abbildung 6-2).



Der Verfügbarkeitsgewinn durch den Einsatz fehlersicherer Montage- und Prüfkomponenten wurde in Versuchen quantifiziert [Dornig 2005] und mit dem durchschnittlichen Aufwand zur Überwachung und Kalibrierung bestehender Systeme verglichen (vgl. Anhang B). Für die Komponenten Längenmesstechnik, Pressen und Schraubtechnik wurden Redundanzkonzepte und Selbsttests erprobt und das praktisch mögliche Verfügbarkeitspotenzial ermittelt. In Tabelle 6-1 sind die Montage- und Messaufgabe, die technische Realisierung sowie die Methode der Fehlererkennung zur Realisierung der Fehlersicherheit zusammengestellt. Mit Einsatz der Hardware-redundanz in der Längenmesstechnik kann durch den Übergang von der präventiven zur bedarfsorientierten Instandhaltung ein Verfügbarkeitsgewinn von bis zu 8% pro Station realisiert werden. Der Verfügbarkeitsgewinn bei Pressen fällt mit 3% pro Presse deshalb weniger hoch aus, weil diese Systeme robust und einfach zu überwachen sind. Die kurze und leicht durchzuführende Überwachung bietet nur wenig Verfügbarkeitspotenzial. Elektromechanische Schrauber sind ebenfalls robuste Systeme, jedoch im Vergleich zu Pressen deutlich schwieriger zu überwachen.

Häufig werden zur Überwachung von Schraubsystemen Schraubfallsimulationen oder zusätzliche Drehmoment-/Drehwinkelaufnehmer eingesetzt, die den automatischen Ablauf eines AMPS unterbrechen. Fehlersichere Schrauber liefern ein Verfügbarkeitspotenzial von bis zu 7% pro Schraubsystem. (Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Verfügbarkeitsgewinn durch Fehlersicherheit an Beispielen

	Längenmesssystem		Pressensystem		Schraubsystem
Aufgabe	Kontrolle und Gruppierung von Längenmaßen	Kontrolle eines Winkelmaßes mit kurzer Taktzeit	In-Prozess Überwachung eines Einpressvorgangs		In-Prozess Überwachung eines Schraubvorgangs
Realisierung	Längenmessstation mit inkrementalen Messwertaufnehmer	Doppelte parallele Winkelmessstation aus Taktzeitgründen	Hydraulische Presse mit piezoelektrischem Kraftaufnehmer	Elektromechanische Presse mit DMS Kraftaufnehmer	Elektromechanischer Schrauber mit DMS Drehmomentaufnehmer.
Absicherungsmaßnahme zur Realisierung der Fehlersicherheit:					
Hardware Redundanz	Doppelte sequenzielle Messstation	-	Doppelte sequenzielle Kraftaufnehmer	Doppelte sequenzielle Kraft-Wegaufnehmer <b>oder</b>	Doppelte sequenzielle Drehmoment- Drehwinkelaufnehmer <b>oder</b>
Analytische Redundanz	-	Mittelwertvergleich doppelter paralleler Messstationen	-	Kraft-Strom Proportionalität <b>oder</b>	Drehmoment-Strom Proportionalität <b>oder</b>
Selbsttest	-	-	-	Selbsttest für Aufnehmer, Getriebe, Motor und Lager	Selbsttest für Aufnehmer, Getriebe, Motor und Lager
Realisierbarer Verfügbarkeitsgewinn im Vergleich zu bestehenden Systemen:					
<b>bis 8% pro Station</b>		<b>bis 3% pro Presse</b>		<b>bis 7% pro Schrauber</b>	

## 6.2 Verfügbarkeitsverlust durch das Ausfallverhalten zusätzlicher Komponenten

Durch den Einsatz zusätzlicher (mechanischer und elektronischer) Bauelemente und Komponenten zur Realisierung der Hardwareredundanz steht dem Verfügbarkeitsgewinn durch die Reduzierung des Überwachungsaufwands ein Verfügbarkeitsverlust durch das Ausfallverhalten der zusätzlichen Komponente gegenüber.

Das Ausfallverhalten wird durch die Ausfallrate  $\lambda$  (siehe Kapitel 2) beschrieben. Mahmoud gibt Ausfallraten für elektronische Komponenten von Kraftfahrzeugen an. Da diese Komponenten in bauähnlicher Form auch in AMPS eingesetzt werden, sind die Erfahrungen aus der Kfz-Industrie auf AMPS übertragbar (Tabelle 6-2) [Mahmoud 2000, S. 91].

Stellvertretend für die mechanischen Komponenten wird die Ausfallrate eines Wälzlagers verwendet. Diese berechnet sich aus der Lebensdauer, die sich aus der konstruktiven Dimensionierung des Lagers ableitet. SKF gibt für Maschinen in Fabrikationsbetrieben bei Tag- und Nachtbetrieb (hier 7200 h/a Betriebszeit) eine erforderliche Lebensdauer eines Wälzlagers von 50.000 Betriebsstunden an [SKF 1989, S. 33].

Tabelle 6-2: Ausfallraten für Komponenten von AMPS ermittelt aus Angaben für bauähnliche Systeme [Mahmoud 2000]

Komponenten eines AMPS	Ausfallrate $\lambda$ Ausfälle/h	F(t) Ausfälle/a bei 7200h Betriebszeit
Absoluter Winkelgeber	$3,9 \cdot 10^{-6}$	0,028
Inkrementaler Längensensor	$8,3 \cdot 10^{-6}$	0,058
Induktiver Näherungssensor	$8,67 \cdot 10^{-6}$	0,061
Beschleunigungssensor	$8,5 \cdot 10^{-6}$	0,059
Schalter, z. B. Bremslichtschalter	$12 \cdot 10^{-6}$	0,083
Potentiometer, z. B. Drosselklappenpotentiometer	$0,12 \cdot 10^{-6}$	0,001
Mikrorechner, Messrechner, Steuergerät	$1 \cdot 10^{-6}$	0,007
Mechanische Komponente	$20 \cdot 10^{-6}$	0,130

Als Beispiel sei angenommen, dass zur Realisierung der Hardwareredundanz pro Station sieben zusätzliche Sensoren sowie vier zusätzliche mechanische Einheiten benötigt werden. Für die elektronischen Komponenten wird aus Tabelle 6-2 eine mittlere Ausfallrate von 0,06 Ausfällen/7200h angesetzt. In Tabelle 6-3 ist die Berechnung zusammengefasst.

Tabelle 6-3: Berechnung der zusätzlichen mittleren Reparaturzeit (MTTR) aufgrund der eingesetzten Hardwareredundanz im Vollbetriebsjahr (7200h)

Elektronische Komponenten	Mechanische Komponenten
0,06 Ausfälle/a * 7 zusätzl. Sensoren = 0,42 Ausfälle/a mit einer mittleren Reparaturzeit von 60 Minuten/Ausfall ergeben sich: 25 Minuten zusätzliche Reparaturzeit pro Vollbetriebsjahr	0,13 Ausfälle/a * 4 mech. Einheiten = 0,52 Ausfälle/a mit einer mittleren Reparaturzeit von 120 Minuten/Ausfall ergeben sich: 62 Minuten zusätzliche Reparaturzeit pro Vollbetriebsjahr
<b>Summe: 87 Minuten <math>\approx</math> 1,5 Stunden/Vollbetriebsjahr = 0,02%</b> zusätzliche Reparaturzeit im Vollbetriebsjahr pro redundanter Station.	

In der Realität ist nicht von einer Betriebszeit von 7200 Stunden pro Jahr auszugehen. Diese würde nur dann erreicht werden, wenn die praktische Verfügbarkeit (Gesamtnutzungsgrad) des AMPS während des gesamten Jahres 100% betragen würde. Dies ist in der Regel nicht der Fall. Realistische Nutzungsgrade liegen zwischen 75% und 95%. Das bedeutet, dass die berechnete zusätzliche Reparaturzeit als maximaler Wert angenommen werden kann.

Neben dem zusätzlichen zeitlichen Reparaturaufwand entsteht ein zusätzlicher Materialaufwand durch den notwendigen Austausch der elektronischen und mechanischen Komponenten.

Um beide Zusammenhänge darzustellen, fasst Tabelle 6-4 den zu erwartenden Aufwand nach obigen Beispiel zusammen.

Tabelle 6-4: Zusätzlicher Aufwand für Hardwareredundanz

	Zeitaufwand	Materialaufwand
Bei 7200h Nutzung (100%)	87 Minuten MTTR	0,4 Sensoren 0,5 mechanische Einheiten
Bei 5760h/a Nutzung (80%)	72 Minuten MTTR	0,3 Sensoren 0,4 mechanische Einheiten
Bei 4320h/a Nutzung (60%)	54 Minuten MTTR	0,2 Sensoren 0,3 mechanische Einheiten

**Fazit:**

Unter der Voraussetzung, dass die eingesetzten zusätzlichen mechanischen und elektronischen Komponenten zur Realisierung der Hardwareredundanz konstruktiv ausreichend dimensioniert und mechanisch korrekt in das AMPS eingebaut sind, ist ein unwesentlicher **Verfügbarkeitsverlust von ca. 0,02 %** pro redundanter Station zu erwarten. In Anbetracht des möglichen Verfügbarkeitsgewinns durch die Minimierung des Überwachungsaufwandes von 3% bis 8% ist dieser Verlust vernachlässigbar. In den weiteren Berechnungen wird der Verfügbarkeitsverlust deshalb nicht berücksichtigt.

## 7 Steigerung der Qualitätsleistung und Verfügbarkeit am Beispiel „Nockenwellenversteller“

Am Beispiel eines automatisierten Montage- und Prüfsystems für Nockenwellenverstellsysteme wird das vorgestellte Werkzeug zur Planung des Absicherungs-Algorithmus angewandt. Die Ergebnisse der Planung werden in dem AMPS umgesetzt und die Auswirkung auf die Qualitätsleistung und Verfügbarkeit mit einem Probelauf verifiziert.

Die im Folgenden dargestellten Systeme, Merkmale und Leistungsdaten sind mit Rücksicht auf den Know-how Schutz idealisiert dargestellt. Sie repräsentieren aber praxisbezogene Anforderungen.

### 7.1 Systembeschreibung und Aufgabenstellung

Nockenwellenverstellsysteme sind Motorelemente des Ventiltriebs eines PKW-Motors. Durch sie erfolgt der Antrieb und die Steuerung der Nockenwelle. Über hydraulischen Druck, der vom momentanen Lastzustand des Motors abhängt, wird ähnlich dem Wirkungsprinzip einer Flügelzellenpumpe, ein begrenzter Drehwinkel der Nockenwelle (ca.  $20^\circ$ ) relativ zu ihrer Rotationsrichtung gewährleistet. Dieser Verstellbereich bewirkt eine hinsichtlich Leistung, Drehmoment und Abgasverhalten verbesserte Motorcharakteristik. Abbildung 7-1 zeigt einen Reihensechszylinder mit zwei obenliegenden Nockenwellen und einem Nockenwellenversteller für die Einlass- und Auslassseite.

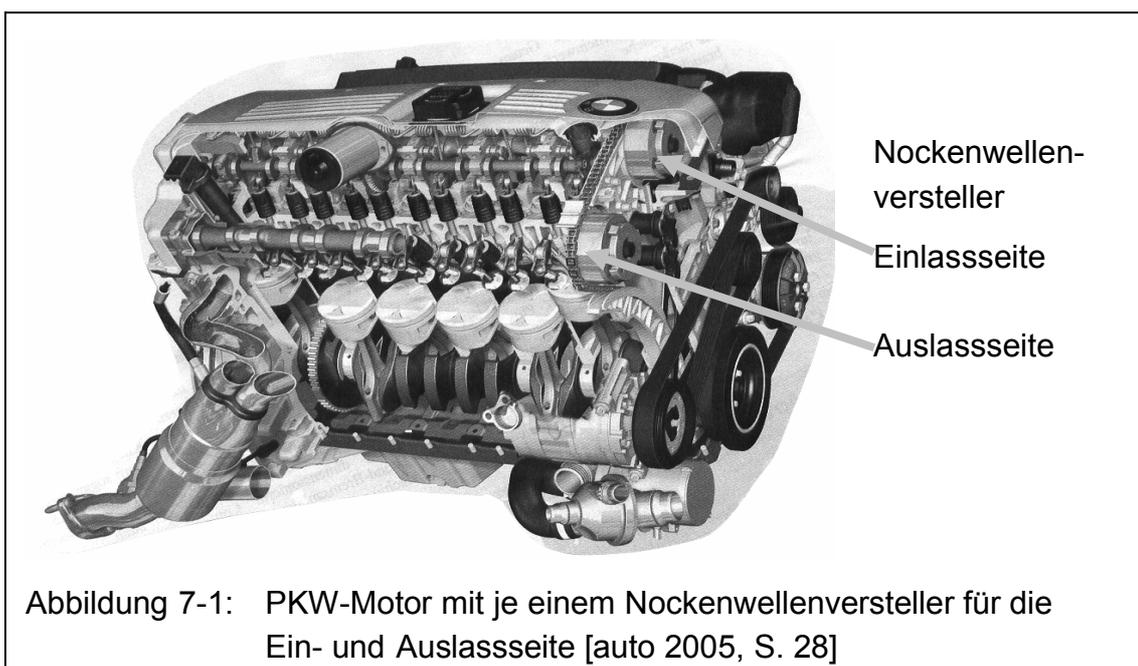
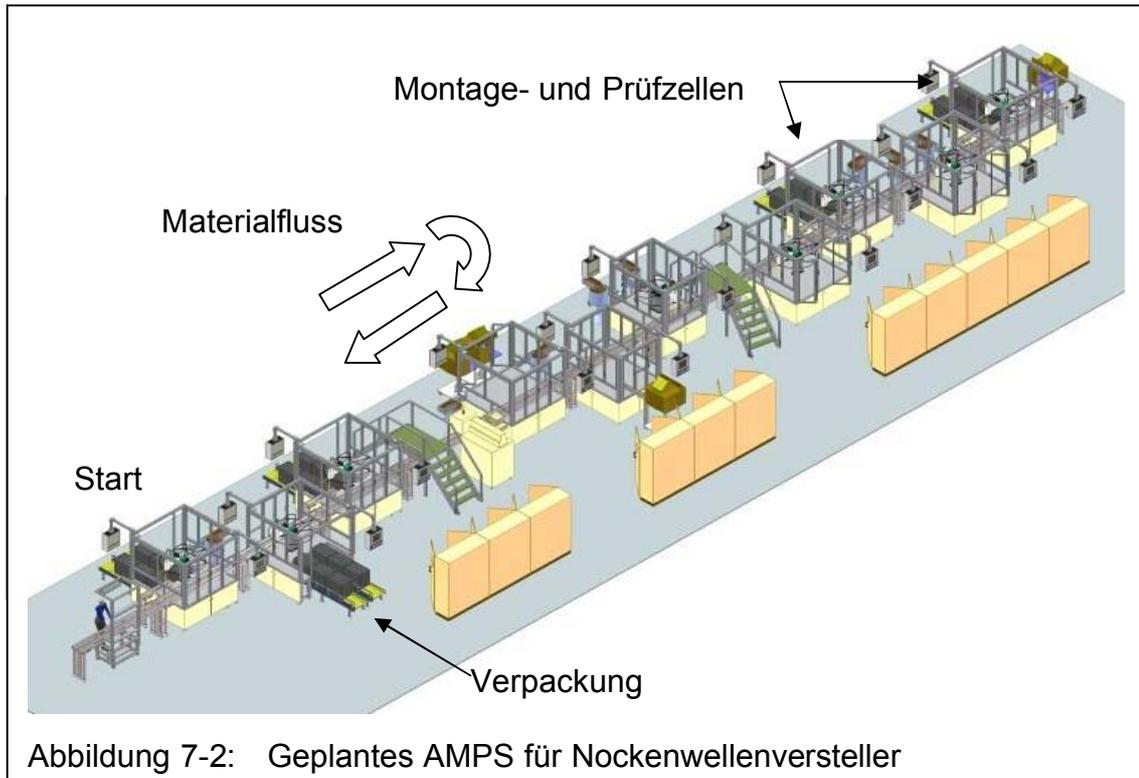


Abbildung 7-1: PKW-Motor mit je einem Nockenwellenversteller für die Ein- und Auslassseite [auto 2005, S. 28]

Zur automatisierten Montage und Prüfung der Nockenwellenversteller wurde ein AMPS auf Zellenbasis mit freiem Werkstückträgerumlauf geplant (Abbildung 7-2). Taktzeitanforderung ist höchstens 0,2 Minuten pro Stück. Es sollten vier verschiedene Typen des Produktes produziert werden können.



Zur Herstellung des Produktes sind zwei Montagevorgänge (Pressen und Schrauben) sowie vier Prüfvorgänge (zweimal Längenmessung, einmal Winkelmessung und einmal attributive Prüfung) notwendig (Tabelle 7-1).

Tabelle 7-1: Montage- und Prüfvorgänge im AMPS für Nockenwellenversteller

Durchmesserprüfung am Einzelteil Rotor	Attributive Prüfung von fünf Ölbohrungen	Spaltmaßprüfung durch Messung zwischen Rotor und Stator	Zylinderstifteinpressen	Fünf Verschraubungen	Funktionsprüfung Verriegelungsspiel
Toleranz $T = 30,000 + 0,020 \text{ mm}$	Ölbohrung vorhanden, nicht vorhanden	$T = 0,050 \pm 0,020 \text{ mm}$	$T_{\text{Kraft}} = 500- 3000\text{N}$ $T_{\text{Weg}} = 12,5 \pm 0,05\text{mm}$	$T_{\text{Winkel}} = 45 \pm 2^\circ \text{ ab } 5 \text{ Nm}$ $T_{\text{Moment}} = 17 \pm 1 \text{ Nm}$	$T = 0,35 \pm 0,25^\circ$
Pneumatische Messung mit Düsenmessdorn	Lehrung mit Lehrdorn	Drei induktive Messtaster	Elektromechanische Presse	Elektromechanischer Schrauber	Zwei parallele Messstationen mit Drehwinkelmessung

Die Montagevorgänge sollten mit einer In-Prozess-Überwachung ausgestattet sein. Die Prüfvorgänge müssen als 100%-Prüfung ausgelegt werden, d. h. je-

des Werkstück wird geprüft. Zur Realisierung dieser Aufgabe werden im ersten Planungsschritt geeignete Montage- und Prüfkomponten ausgewählt. Tabelle 7-1 fasst die Montage- und Prüfaufgaben, die Merkmale sowie die vorläufig ausgewählten Komponenten zusammen. Auf Basis dieser Vorleistungen wird mit der Planung der Absicherungs-Algorithmen begonnen.

## 7.2 Standard-Absicherungs-Algorithmus (S-Ab-AI)

Der Standard-Absicherungs-Algorithmus gilt für alle AMPS. In der Planungsphase wird er für jede Montage- und Prüfaufgabe als Checkliste genutzt, um sicher zu stellen, dass alle Anforderungen umgesetzt werden können. Tabelle 7-2 zeigt die Anwendung des S-Ab-AI beispielhaft für die Messaufgabe „Durchmesserprüfung am Einzelteil Rotor“ mit einem pneumatischen Düsenmessdorn.

Tabelle 7-2: Anwendung des S-Ab-AI als Checkliste

Messkette	Bewegungsüberwachung in der Messkette (Ruhe- und Messpositionsüberwachung)	o.k.
	Messbereichsüberwachung beim Kalibrieren	o.k.
	Mehrpunktkalibrierung bei Messsystemen, deren Linearitätsverhalten im Messbereich definiert werden muss (z. B. pneumatische Messsysteme)	o.k.
	Automatisches Kalibrierintervall	o.k.
Stationsebene	Existenz der Werkstücke prüfen	o.k.
	Positions- und Lageüberwachung der Werkstücke	o.k.
	Ausgangs- und Endlage von Bewegungen	o.k.
Prozessebene	Obligatorische Teilebewertung „unbekannt“, bis alle Montage- und Prüfvorgänge positiv abgeschlossen sind	o.k.
	Verbot mit Erlaubnisvorbehalt Gutspur ist blockiert im Einricht- und Automatikbetrieb	o.k.
	Schlechtteil Quittierung	o.k.
	Stopp nach mehrmals (i. d. R. dreimal) Schlechtbewertung in Folge	o.k.
	Änderung der (normalen) Rahmenbedingungen (z. B. Verschmutzung) müssen zur einer Schlechtbewertung führen	o.k.
	Schlechtteil-Klassifizierung; für jedes Schlecht-Merkmal ein eigener Speicherplatz. Ausnahme: sinnvolle Zusammenlegung von Merkmalen	o.k.

manueller Eingriff	Leertakten nach manuellem Eingriff: Restteilbestände in der Maschine ausschleusen	o.k.
	Eindeutige Sortierung bei Notaus oder Halt nach Ausgangslage / Leerlauf und beim Wiederanlauf (z. B. nach Störungen)	o.k.
	Farbliche Kennzeichnung von Referenzteilen	o.k.
	Unmanipulierbare Schlechteilebehälter und Transportbänder	o.k.
	Referenzteile (z. B. Kalibrier- und Plausibilitätsteile) werden automatisch ausgeschleust	o.k.

Zur Umsetzung dieser Forderungen werden notwendige hard- und softwaretechnische Maßnahmen bei der Realisierung (Konstruktion, Beschaffung von Komponenten sowie Montage- und Inbetriebnahme) berücksichtigt. Zum Beispiel werden die Anforderungen auf Messebene mit dem Einsatz eines Messcomputers, der diese Absicherungsmaßnahmen beinhaltet, realisiert.

Der Verzicht auf nur einen dieser Standards kann im Wirkungsverbund des AMPS zu massiven Einbrüchen der Qualitätsleistung führen, was im schlimmsten Fall die Auslieferung von Schlechteilen an den Kunden zur Folge hat.

### 7.3 Erweiterter-Absicherungs-Algorithmus (E-Ab-AI)

Mithilfe des in Kapitel 5.2 vorgestellten Werkzeuges wird für jede Montage- und Prüfaufgabe der Erweiterte-Absicherungs-Algorithmus in den Funktionsbereichen Messkette, Station, Prozess und manueller Eingriff geplant. Die folgenden Tabellen zeigen die Maßnahmen als Ergebnis der Planung, die zusätzlich zum Standard-Absicherungs-Algorithmus realisiert werden müssen (Tabelle 7-3 bis 7-7).

Tabelle 7-3: E-Ab-AI für die „Durchmesserprüfung durch Messung am Einzelteil Rotor“ mit einem pneumatischen Düsenmessdorn

Messkette	Station	Prozess	Manueller Eingriff
Max, min Referenzteil	Identität und Lage- richtigkeit des Werkstücks prüfen (Vermeidung einer Typenverwechs- lung)	Separater Schlecht- teil-Speicherplatz	Verbausicherung für Gebrauchsnormale
Wiederholmessung bei Schlechtbewer- tung		Chargengebundene- Rückverfolgbarkeit	Automatische Ty- penumstellung
Automatische Kalib- rierwertregelkarte			Schnellverschlüsse für Werkzeugwech- sel
			Speicherplatz für Gebrauchsnormale

Tabelle 7-4: E-Ab-AI für die „Attributive Prüfung von fünf Ölbohrungen“ mit einem Lehdorn

Messkette	Station	Prozess	Manueller Eingriff
Gute und schlechte Referenznormale	Exakte Positionsüberwachung der Lehdorne Werkzeugbruchüberwachung mit Lichtschranke	Separater Schlechteil-Speicherplatz Chargengebundene-Rückverfolgbarkeit	Wie bei Durchmesserprüfung

In diesem Fall bietet sich an, beide Prüfungen in einer Station zu realisieren (Abbildung 7-3).

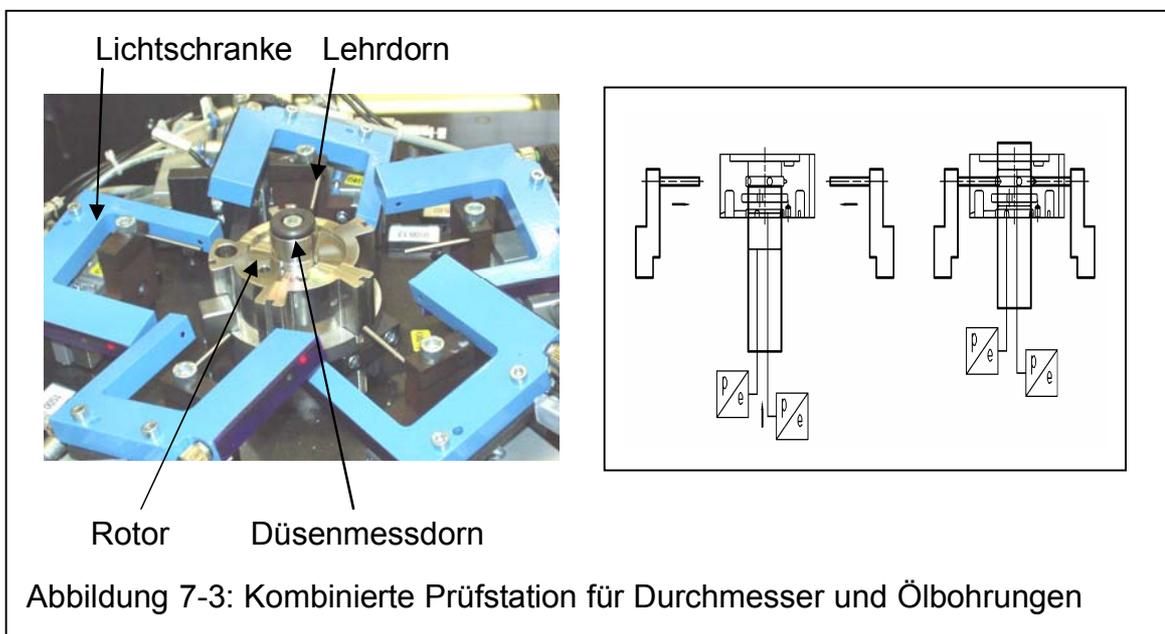


Tabelle 7-5: E-Ab-AI für die „Spaltmaßprüfung durch Messung zwischen Rotor und Stator“ mit induktiven Messtastern

Messkette	Station	Prozess	Manueller Eingriff
Wiederholmessung bei Schlechtbewertung Automatische Kalibrierwertregelkarte	keine zusätzlichen Absicherungsmaßnahmen nötig	Wiedereintaktung von Schlechteilen möglich Integrierte Ausschuss- und Nacharbeitszelle	Wie bei Durchmesserprüfung

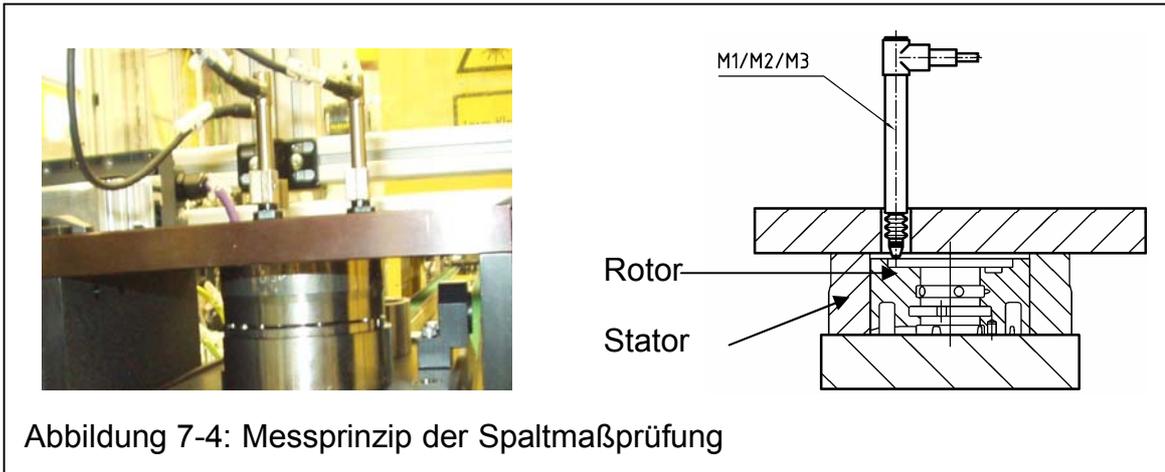


Abbildung 7-4: Messprinzip der Spaltmaßprüfung

Tabelle 7-6: E-Ab-AI für den Montagevorgang „Zylinderstift einpressen“ mit einer elektromechanischen Presse mit integrierter Überwachung der Kraft mit einem Dehnungsmessstreifen (DMS) Kraftaufnehmer und inkrementalen Wegmesssystem.

Messkette	Station	Prozess	Manueller Eingriff
Automatische Nullpunkt-, Kalibrierwert- und Verstärkerkennwert-Prüfung Referenzfahrt für Wegaufnehmer Referenzmesssystem	Exakte Positionsüberwachung Werkzeug	Wiedereintaktung von Schlechtteilen möglich Integrierte Ausschuss- und Nacharbeitszelle	Automatische Typenumstellung Schnellverschlüsse für Werkzeugwechsel Schnellwechsellvorrichtung für Referenzmesssystem

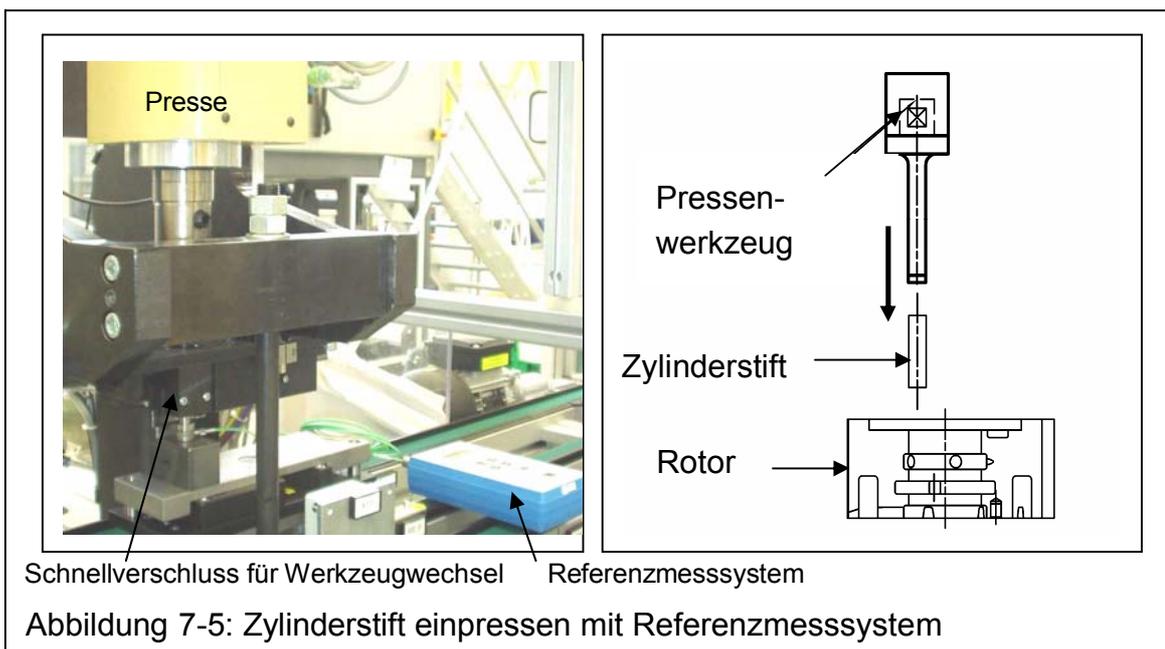


Abbildung 7-5: Zylinderstift einpressen mit Referenzmesssystem

Tabelle 7-7: E-Ab-AI für den Montagevorgang „Fünf Verschraubungen“ mit fünf elektromechanischen Schraubern mit integrierter Überwachung des Momentes und des Drehwinkels

Messkette	Station	Prozess	Manueller Eingriff
Sequenzielle Messwertaufnehmer (Hardwareredundanz) <u>Zusätzlich:</u> Referenzmesssystem als Schraubfallsimulation	<i>keine weitere Absicherung nötig</i>	Wiedereintaktung von Schlechtteilen möglich Integrierte Ausschuss- und Nacharbeitszelle	Automatische Typenumstellung Schnellverschlüsse für Werkzeugwechsel Schnellwechsellvorrichtung für Referenzmesssystem

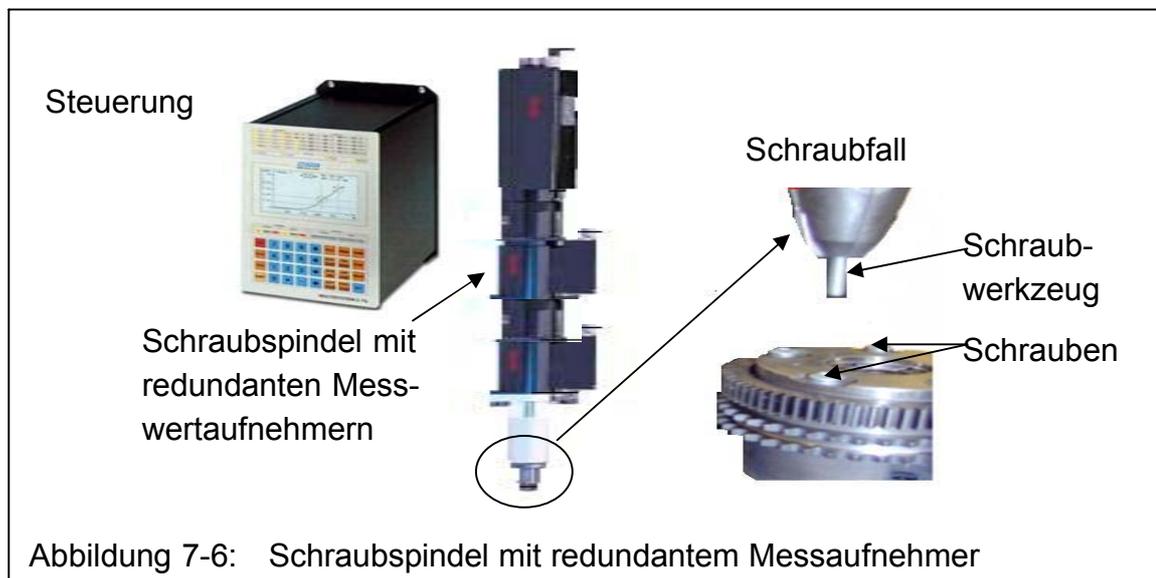
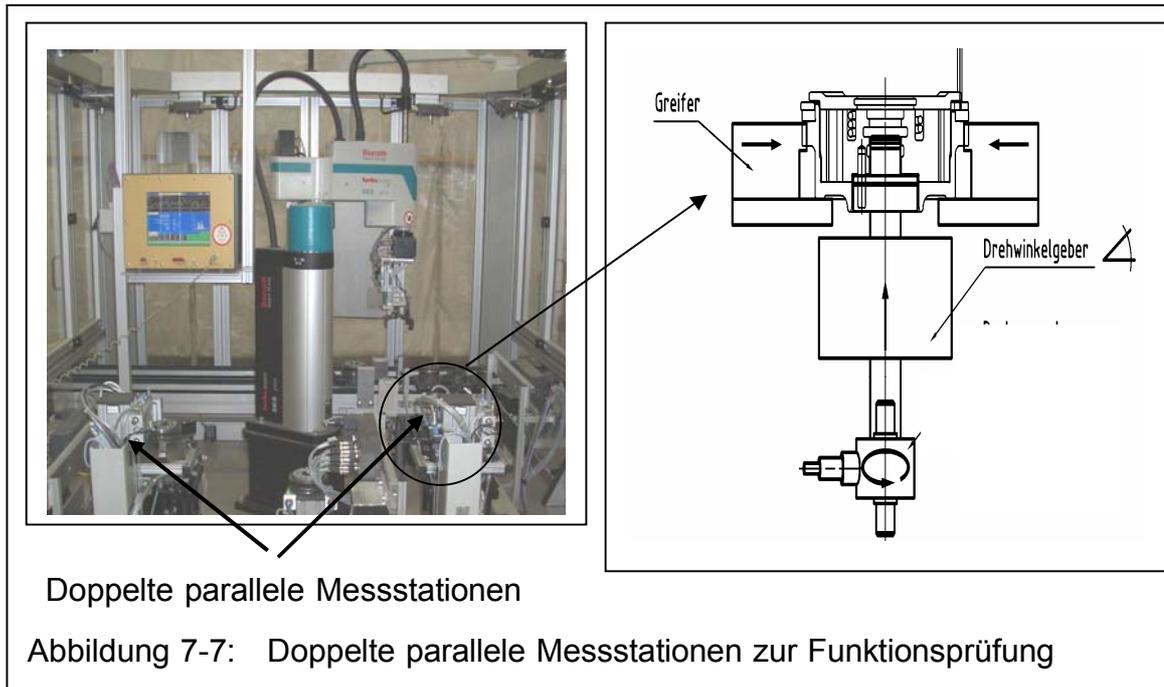
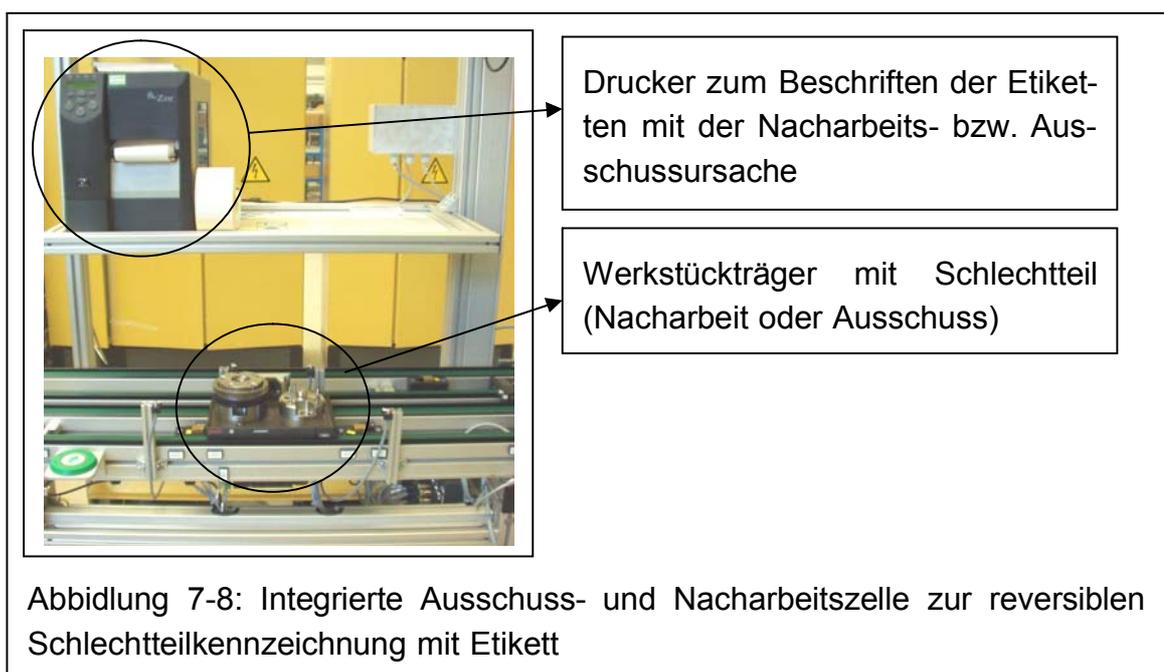


Tabelle 7-8: E-Ab-AI für „Funktionsprüfung Verriegelungsspiel“ mit zwei parallelen Messstationen und inkrementalen Drehwinkelmesssystem

Messkette	Station	Prozess	Manueller Eingriff
Vergleich gleitender Mittelwerte aus parallelen Messstationen (Analytische Redundanz) Min, max Referenznormale Kalibrierwertregelkarte	Positionsüberwachung des Werkzeugs (Drehwinkel Messantrieb)	Wiedereintaktung von Schlechtteilen möglich Integrierte Ausschuss- und Nacharbeitszelle Gutteil-Rückverfolgbarkeit Gutteilbeschriftung Reversible Schlechtteilbeschriftung	Automatische Typenumstellung Schnellverschlüsse für Werkzeugwechsel Verbausicherung für Gebrauchsnormale



Auf Prozessebene wurde eine integrierte Ausschuss- und Nacharbeitszelle geplant. Wie bereits im Kapitel 4.4 dargestellt, dient diese Art der Schlechtteilbehandlung zum einen der ursachenbezogenen Ausschleusung von Ausschussteilen und zum anderen der Nachbesserung von Nacharbeitsteilen. Die Nacharbeitsteile können dem AMPS wieder zugeführt werden. In Abbildung 7-8 ist der Arbeitsplatz dargestellt. Ausschussteile werden mit einem Etikett reversibel beschriftet. Nacharbeitsteile können von hier aus dem AMPS wieder zugeführt werden.



## 7.4 Vorläufige Systemfähigkeit

Nachdem der Standard-Absicherungs-Algorithmus sowie der Erweiterte-Absicherungs-Algorithmus realisiert wurden, kann im Rahmen einer Vorabnahme die vorläufige Systemfähigkeit (vgl. Kapitel 2.5) ermittelt werden.

Tabelle 7-9: Ermittlung der vorläufigen Systemfähigkeit

Taktzeit Soll: 0,2 min/St; Taktzeit Ist: 0,28 min/St										
Kennzahl	Durchmesser- messung Rotor in mm	Prüfung der fünf Ölbohrungen	Spaltmaßmessung in mm	Zylinderstift auf Maß einpressen in mm	Zylinderstift einpres- sen kraftüberwacht in N	Fünf Schrauben ein- schrauben winkel- überwacht in Grad	Fünf Schrauben ein- schrauben moment- überwacht in Nm	Funktionsprüfung Station 1 in Grad	Funktionsprüfung Station 2 in Grad	
Tol.:	0,018	frei	0,030	0,600	500- 3500	20,0	4,0	0,500	0,500	
Messprozess	C <sub>g</sub>	2,4	-	2,1	1,9	o.k. <sup>1</sup>	o.k. <sup>2</sup>	o.k. <sup>2</sup>	2,1	1,9
	C <sub>gk</sub>	2,2	-	1,9	1,7	o.k. <sup>1</sup>	o.k. <sup>2</sup>	o.k. <sup>2</sup>	1,9	1,8
	R&R % absolut	7,7 0,0014	- -	9,3 0,0028	- -	- -	- -	- -	9,8 0,0490	10,0 0,0500
	Attrib. Test	-	o.k.	-	-	-	-	-	-	-
Montageprozess	Absich. Maßna.	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.
	Plausi. Test	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.
	C <sub>m</sub>	1,9	-	1,9	o.k. <sup>1</sup>	o.k. <sup>1</sup>	o.k. <sup>2</sup>	o.k. <sup>2</sup>	2,1	2,2
	C <sub>mk</sub>	1,8	-	1,8	o.k. <sup>1</sup>	o.k. <sup>1</sup>	o.k. <sup>2</sup>	o.k. <sup>2</sup>	2,0	2,1
	P <sub>p</sub>	1,8	-	1,7	2,3	1,9	2,5 <sup>3</sup>	1,9 <sup>3</sup>	1,9	2,0
P <sub>pk</sub>	1,5	-	1,4	2,1	1,8	2,2 <sup>3</sup>	1,7 <sup>3</sup>	1,7	1,9	
<b>Vorläufige Systemfähigkeit ist gegeben</b>										

Bemerkung	<sup>1</sup> Angaben des Pressenherstellers, <sup>2</sup> Angabe des Schrauberherstellers, <sup>3</sup> kleinster Wert der fünf Schrauber, Graue Felder: Durch Maschinenhersteller beeinflussbar
-----------	--

Wie aus Tabelle 7-9 ersichtlich, ist die vorläufige Systemfähigkeit gegeben. In der Spalte „Durchmesser Messung Rotor in mm“ und „Spaltmaß Messung in mm“ wurden zwar die Maschinenfähigkeit (C<sub>m</sub>, C<sub>mk</sub>) und die vorläufige Prozessfähigkeit (P<sub>p</sub>, P<sub>pk</sub>) ermittelt, jedoch hat das AMPS keinen Einfluss auf diese Ergebnisse, da es sich hier um zugeführte Einzelteile handelt. Die niedrigeren Fähigkeitskennwerte lassen aber auf Abweichungen in den Bearbeitungsprozessen dieser Merkmale schließen. Im folgenden Probelauf werden die Merkmale weiter beobachtet.

## 7.5 Erwarteter Verfügbarkeitsgewinn

Durch die systematische Planung des Erweiterten-Absicherungs-Algorithmus wird ein hoher Grad an Fehlersicherheit der Montage- und Prüfkomponenten erreicht. Dies ist die Voraussetzung für die Reduktion der Häufigkeit der präventiven Instandhaltungsmaßnahmen, wie z. B. Überwachung, Kalibrierung und Wartung. In der Tabelle 7-10 sind die durchschnittlichen Zeiten für die präventive Instandhaltung (vgl. Anhang B) den reduzierten Instandhaltungszeiten gegenübergestellt. Die reduzierten Instandhaltungszeiten sind eine Abschätzung. Als Ergebnis ist ein Verfügbarkeitsgewinn von ca. 103 Minuten pro Tag zu erwarten. Das entspricht etwa 7%.

Tabelle 7-10: Durchschnittlicher und reduzierter Aufwand für präventive Instandhaltungsmaßnahmen

	Durchschnittlicher Aufwand nach Anhang B	Reduzierter Aufwand Abschätzung	Verfügbarkeitsgewinn
Pneumatische Durchmesser-messung am Rotor	3 mal pro Tag 5 min pro Durchführung	3 mal pro Tag 5 min pro Durchführung	0 min
Attributive Prüfung Ölbohrung	3 mal pro Tag 4 min pro Durchführung	1 mal pro Woche 4 min pro Durchführung	11 min
Spaltmaßmes-sung	6 mal pro Tag 5 min pro Durchführung	3 mal pro Tag 5 min pro Durchführung	15 min
Zylinderstift ein-pressen	3 mal pro Tag 5 min pro Durchführung	1 mal pro Woche 5 min pro Durchführung	14 min
Fünf Ver-schraubungen	1 mal pro Tag 10 min pro Schrauber 5 Schrauber	1 mal pro Woche 10 min pro Schrauber 5 Schrauber	42 min
Funktionsprü-fung Verriegelungsspiel	3 mal pro Tag 3 min pro Referenzteil 2 Referenzteile 2 Stationen	3 mal pro Woche 3 min pro Referenzteil 2 Referenzteile 2 Stationen	30 min
<b>Summe</b>	<b>148 min pro Tag</b>	<b>45 min pro Tag</b>	<b>103 min</b>

## 7.6 Probelauf

Zur Verifizierung der Ergebnisse wird ein Probelauf durchgeführt. Der Probelauf findet unter realistischen Bedingungen statt, d. h. nicht mehr als die geplanten Bediener und ohne besondere Vorbereitung hinsichtlich der Materialbereitstellung. Die präventive Instandhaltung erfolgt nach dem in Tabelle 7-10 angegebenen reduzierten Aufwand.

**Die Ergebnisse des Probelaufs sind:**

Betrachtungszeitraum:	8 h = 480 min
Pausen:	45 min
Belegungszeit $T_B$ :	435 min
Geplante Zeit für Instandhaltung:	15 min/Schicht (45 min/Tag)
Geplante Taktzeit $t_{plan}$ :	0,2 min/Stück ( $M_{plan} = 5$ Stück/min)
Reale Taktzeit $t_{real}$ :	0,2083 min/Stück ( $M_{real} = 4,8$ Stück/min)
Mindestanzahl Bediener:	2 Bediener, 1 Hilfskraft
Tatsächliche Anzahl Bediener:	2 Bediener, 1 Hilfskraft

Tabelle 7-11: Ausbringungsmenge des Probelaufs

Ausbringungsmenge		Stück
Produzierte Menge (Gut- und Schlechteile)	m	1723
Gutteile	$m_{gut}$	1682
Maschinenbedingte Schlechteile	$m_{amb}$	15
Nicht maschinenbedingte Schlechteile	$m_{anmb}$	26
Anzahl Schlechteile gesamt	$m_a = m_{amb} + m_{anmb}$	41
Schlechteile in Gutmenge	$N.i.O._G = N.i.O._{Gmb} + N.i.O._{Gnmb}$	0
Schlechteile in Gutmenge maschinenbedingt	$N.i.O._{Gmb}$	0
Schlechteile in Gutmenge nicht maschinenbedingt	$N.i.O._{Gnmb}$	0

Tabelle 7-12: Ausfallanalyse während des Probelaufs

Komponente	Fehler	Ursache	Maßnahme	Zeit	Art
Spaltmaß Rotor Stator prüfen	Rotor klemmt in Station	Rotor nicht korrekt ausgerichtet	Justage Station und Kalibrierung	5	$T_T$
	Kalibrierregelkarte meldet Grenzwertverletzung	Messplatte ist verschmutzt	Reinigung und erneute Kalibrierung	5	$T_O$
	3 x N.i.O in Folge	Messplatte ist verschmutzt	Reinigung und erneute Kalibrierung	5	$T_T$
Zylinderstift auf Maß einpressen	3 x N.i.O in Folge	Einpresskraft zu hoch, weil Bohrung Rotor zu klein	Manuelle Preprozessprüfung der zugeführten Einzelteile (Rotor) und Aussortieren der Schlechteile	5	$T_O$
Ver-schrauben	Störung Schrauber 1 und 2	unbekannt	Kurze Inspektion und Neustart	4	$T_T$
	Schraube fehlt in der Zuführung	Schrauben wurden nicht nachgefüllt	Schrauben nachfüllen	7	$T_O$
	3 x N.i.O in Folge	Schraubengewinde beschädigt	Inspektion der Schrauber und Prüfung der Schrauben	10	$T_O$
Funktionsprüfung Verriegelungsspiel	Differenz Station 1 zu Station 2 zu groß	Kalibrierwert Station 1 hat sich verändert	Justage Station 1 und Kalibrierung Station 1 und 2	10	$T_T$
	Differenz Station 1 zu Station 2 zu groß	Kalibrierwert Station 1 hat sich verändert	Justage Station 1 und Kalibrierung Station 1 und 2	10	$T_T$

**Tabelle 7-13: Analyse der Schlechteilmenge**

Fehlerart Station	N.i.O.-Teile in N.i.O.				N.i.O.-Teile in Gutmenge		Gutteile in N.i.O. Scheinausschuss		N.i.O.-Teile gesamt		Ursache	Vorgeschlagene Maßnahme																															
	Ausschuss AA		Nacharbeit NA		mb	nmb	mb	nmb	mb	nmb																																	
	mb	nmb	mb	nmb																																							
Durchmesserprüfung Rotor	0	4	0	0	0	0	0	0	0	4	Bohrung des Rotors war zu klein	Qualität der der Einzelteile verbessern																															
Attributive Prüfung an 5 Ölbohrungen	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	Grat in Bohrung	Qualität der Einzelteile verbessern																															
Spaltmaß Rotor-Stator messen	0	0	0	5	0	0	3	3	3	8	Verschmutzung der Einzelteile führt zu einer Verschmutzung der Station	Sauberkeit der Einzelteile und Verschmutzungsverhalten der Station verbessern																															
Zylinderstift auf Maß einpressen	0	6	0	0	0	0	0	0	0	6	Einpresskraft zu groß, weil Bohrung für den Zylinderstift zu klein	Qualität der Rotoren verbessern																															
5x Verschrauben	0	0	2	6	0	0	0	0	2	6	2 x Störung des Schraubers und 6 mal beschädigte Gewinde	Schrauber verbessern und Qualität der Gewinde verbessern																															
Funktionsprüfung	0	0	0	0	0	0	10	0	10	0	Stabilität der Messung in Station 1 nicht gegeben	Weitere Beobachtung, ob sich der Verdacht des Einlaufverhaltens bestätigt.																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>AA<sub>mb</sub></th> <th>AA<sub>nmb</sub></th> <th>NA<sub>mb</sub></th> <th>NA<sub>nmb</sub></th> <th>N.i.O.-G<sub>mb</sub></th> <th>N.i.O.-G<sub>nmb</sub></th> <th>SA<sub>mb</sub></th> <th>SA<sub>nmb</sub></th> <th>ma<sub>mb</sub></th> <th>ma<sub>nmb</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>12</td> <td>2</td> <td>11</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>13</td> <td>3</td> <td>15</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td colspan="5"></td> <td>N.i.O.-G</td> <td>0</td> <td colspan="2"></td> <td>ma</td> <td>41</td> </tr> </tbody> </table>											AA <sub>mb</sub>	AA <sub>nmb</sub>	NA <sub>mb</sub>	NA <sub>nmb</sub>	N.i.O.-G <sub>mb</sub>	N.i.O.-G <sub>nmb</sub>	SA <sub>mb</sub>	SA <sub>nmb</sub>	ma <sub>mb</sub>	ma <sub>nmb</sub>	0	12	2	11	0	0	13	3	15	26						N.i.O.-G	0			ma	41		
AA <sub>mb</sub>	AA <sub>nmb</sub>	NA <sub>mb</sub>	NA <sub>nmb</sub>	N.i.O.-G <sub>mb</sub>	N.i.O.-G <sub>nmb</sub>	SA <sub>mb</sub>	SA <sub>nmb</sub>	ma <sub>mb</sub>	ma <sub>nmb</sub>																																		
0	12	2	11	0	0	13	3	15	26																																		
					N.i.O.-G	0			ma	41																																	

**Tabelle 7-14: Ausfallzeiten während des Probelaufs**

Unterbrechungen	Anzahl	Art	min
Maschinenbedingte Unterbrechung wegen präventiver Inspektion und Wartung (geplanter Aufwand, Tabelle 7-10)	1	T <sub>w</sub> MRDP	15 15
Maschinenbedingte Unterbrechung wegen Störung und Reparatur	5	T <sub>T</sub> MTTR	34 6,8
Organisatorische Unterbrechungen wegen Teilemangel, Teillehygiene und Personalverfügbarkeit	4	T <sub>O</sub> MRDA	27 6,75
Nicht maschinenbedingte Unterbrechung wegen höherer Gewalt (z. B. Streik, Stromausfall)	0	MRDL	0

Mit diesen Ergebnissen kann die Bereitschafts- und Maschinenlaufzeit berechnet werden:

$$\text{Bereitschaftszeit } T_{\text{Bereit}}: \quad T_{\text{Bereit}} = T_B - (T_T + T_W) = 435 - (34 + 15) = 386 \text{ min}$$

$$\text{Maschinenlaufzeit } T_{\text{Lauf}}: \quad T_{\text{Lauf}} = T_{\text{Bereit}} - T_O = 386 - 27 = 359 \text{ min}$$

## 7.7 Gesamtanlageneffektivität

Mit den Ergebnissen aus dem Probelauf kann die Gesamtanlageneffektivität berechnet werden.

### Qualitätsleistung

#### Maschinenbedingte Qualitätsleistung

(Werte aus Tabelle 7-11)

$$QL_{\text{mb}} = \begin{cases} \frac{m - m_{\text{amb}}}{m} * 100\% & \text{für Ni.O.Gmb} = 0 \\ 0 & \text{für Ni.O.Gmb} > 0 \end{cases} \quad QL_{\text{mb}} = \frac{1723 - 15}{1723} = \underline{\underline{99,13\%}}$$

Die maschinenbedingte Qualitätsleistung ist mit 99,1% zunächst ausreichend. Jedoch sollte das Schmutzungsverhalten der Messung „Spaltmaßprüfung durch Messung zwischen Rotor und Stator“ verbessert werden. Dies kann z. B. durch eine Punkt- statt Flächenaufgabe der Messobjekte geschehen. Die Station 1 der Funktionsprüfung zeigt eine unzureichende Stabilität der Messung. Dadurch wurden 10 gute Werkstücke als Schlechteile (Scheinausschuss) bewertet und ausgeschleust. Als Ursache wird ein Einlaufverhalten vermutet. Mithilfe der analytischen Redundanz sollte das Stabilitätsverhalten der Station weiter beobachtet werden.

#### Gesamtqualitätsleistung

(Werte aus Tabelle 7-11)

$$QL = \begin{cases} \frac{m - m_a}{m} * 100\% & \text{für Ni.O.G} = 0 \\ 0 & \text{für Ni.O.G} > 0 \end{cases} \quad QL = \frac{1723 - 41}{1723} = \underline{\underline{97,62\%}}$$

Die Gesamtqualitätsleistung ist mit 97,6% noch nicht ganz zufriedenstellend. Potenzial liegt in der Verbesserung der Qualität der zugeführten Einzelteile. Sowohl die Teilehygiene (Verschmutzung, Grat) als auch die Maßhaltigkeit der Einzelteile können verbessert werden.

**Verfügbarkeit und Nutzungsgrad:****Technische Verfügbarkeit bzw. maschinenbedingter Nutzungsgrad:**

Werte aus Tabelle 7-14

$V_t = NG_{mb} = \frac{T_{\text{Lauf}}}{T_B - T_O} * 100\%$	$V_t = NG_{mb} = \frac{359 \text{ min}}{(435 - 27) \text{ min}} * 100\%$ $= 87,99\%$
---	--

Die technische Verfügbarkeit ist mit 88% noch nicht ausreichend. Sie sollte größer 90% sein. Ursachen sind die Ausfallzeiten aufgrund technischer Probleme bei Schrauber 1 und bei Station 1 der Funktionsprüfstation. Als Ursache wird für beide Komponenten ein Einlaufverhalten vermutet. Eine weitere Beobachtung wird empfohlen.

**Praktische Verfügbarkeit bzw. Gesamtnutzungsgrad:**

Werte aus Tabelle 7-14

$V_p = NG = \frac{T_{\text{Lauf}}}{T_B} * 100\%$	$V_p = NG = \frac{359 \text{ min}}{435 \text{ min}} \cdot 100\% = \underline{\underline{82,52\%}}$
--	--

Die praktische Verfügbarkeit sollte größer 85% sein. Die realisierten 82,5% sind noch nicht ausreichend. Verbesserungspotenzial liegt in der Minimierung der Ausfallzeiten infolge mangelnder Qualität und Hygiene der Einzelteile. Weiterhin kann die Teileversorgung verbessert werden.

**Leistungsgrad**

Der Leistungsgrad entspricht der maschinenmöglichen Bearbeitungsgeschwindigkeit und ist i. d. R. maschinenbedingt. Deshalb ist eine Unterscheidung in maschinenbedingten Leistungsgrad und Gesamtleistungsgrad nicht nötig.

Tabelle 7-15: Berechnung des Leistungsgrades

Taktzeitrechnung	Mengenrechnung
$LG = \frac{t_{\text{plan}}}{t_{\text{real}}} * 100\%$	$LG = \frac{M_{\text{real}}}{M_{\text{plan}}} * 100\%$
$LG = \frac{0,2 \text{ min/Stück}}{0,2083 \text{ min/Stück}} * 100\%$ $= 96\%$	$LG = \frac{5 \text{ Stück/min}}{4,8 \text{ Stück/min}} * 100\%$ $= 96\%$

Mit 96% ist der Leistungsgrad ausreichend, er sollte jedoch nicht unter 90% fallen.

Mit diesen Kennzahlen kann die Gesamtanlageneffektivität berechnet werden.

Tabelle 7-16: Berechnung der maschinenbedingten Gesamtanlageneffektivität

Direkte Berechnung	Differenzierung nach Einflüssen
$G.A.E_{mb} =$ $= QL_{mb} * LG * NG_{mb} * 100\% = 0,9913 * 0,96 * 0,8799 * 100\% = 83,73\%$ <p style="text-align: center;">oder</p> $= \frac{m_{gut} + m_{anmb}}{(T_B - T_O) * M_{plan}} * 100\% = \frac{(1682 + 26) \text{ St}}{(435 - 27) \text{ min} * 5 \text{ St/min}} * 100\% = 83,73\%$ <p style="text-align: center;">oder</p> $= \frac{t_{plan} * (m_{gut} + m_{anmb})}{T_B - T_O} * 100\% = \frac{0,2 \text{ min/St} * (1682 + 26) \text{ St}}{(435 - 27) \text{ min}} * 100\% = 83,73\%$	$QL_{mb} =$ $= 99,13\%$
	$LG = 96\%$
	$NG_{mb} = V_t =$ $= 87,99\%$

Die maschinenbedingte Gesamtanlageneffektivität sollte mindestens 80% betragen. Die realisierten 83,7% sind ein guter Anfang, müssen aber systematisch verbessert werden. Neben der zu großen Schlechtheilmenge muss vor allem die Häufigkeit und Dauer der technischen Störungen reduziert werden.

Tabelle 7-17: Gesamtanlageneffektivität

Direkte Berechnung	Differenzierung nach Einflüssen
$G.A.E =$ $= QL * LG * NG * 100\% = 0,9762 * 0,96 * 0,8252 * 100\% = 77,33\%$ <p style="text-align: center;">oder</p> $= \frac{m_{gut}}{T_B * M_{plan}} * 100\% = \frac{1682 \text{ St}}{435 \text{ min} * 5 \text{ St/min}} * 100\% = 77,33\%$ <p style="text-align: center;">oder</p> $= \frac{t_{plan} * m_{gut}}{T_B} * 100\% = \frac{0,2 \text{ min/St} * 1682 \text{ St}}{435 \text{ min}} * 100\% = 77,33\%$	$QL = 97,62\%$
	$LG = 96\%$
	$NG = V_p =$ $= 82,52\%$

Die Gesamtanlageneffektivität ist mit 77,3% akzeptabel. Hier sollten als idealer Kennwert 85% angestrebt werden. Verbesserungspotenzial bestehen bei der Qualität der Einzelteile (z. B. Maßhaltigkeit) sowie in der Teilehygiene (z. B. Sauberkeit, Gratfreiheit). Weitere Verbesserungen sind bei den organisatorischen Rahmenbedingungen möglich.

Die Kosten für die Umsetzung des Erweiterten-Absicherungs-Algorithmus betragen ca. 5% der Gesamtinvestition. Unter der Voraussetzung einer guten Qualitätsleistung konnte die Verfügbarkeit in diesem Beispiel um ca. 7% verbessert werden.

## 7.8 Zusammenfassung zur Systemfähigkeit (Tabelle 7-18)

	Kennzahlen [Einheit]	Definition	Analyseumfang	Formel	Kennwert	  
<b>Messprozess am Beispiel QS 9000/MSA</b>	$C_g$ [1] Gage capability	Wiederholbarkeit des Messmittels	1 Bediener	$C_g = \frac{0,2T}{6s_g}$	$\geq 1,33$	1,9
	$C_{gk}$ [1] Critical gage capability	Genauigkeit	1 Referenzteil 30 Messungen	$C_{gk} = \frac{0,1T -  \bar{x}_g - x_m }{3s_g}$	$\geq 1,33$	1,8
	R&R [mm, %] Wiederholbarkeit und Nachvollziehbarkeit	Bedienereinfluss und Wiederholbarkeit unter Prozessbedingungen	3 Bediener, 10 Serienteile, 2 Messreihen oder 2 Durchläufe, 10 Teile	$R \& R = \sqrt{(EV^2 + AV^2)}$	$\leq 20\%$	10
	Attributive Fähigkeit	Wiederholbarkeit der Gut-, Schlechtentscheidung	10 Gutteile 10 Grenzteile 10 Schlechteile je 10 mal prüfen	Bei 100 Gut- und 100 Grenzteilprüfungen je 1 Fehlbewertung Bei 100 Schlechteilprüfungen 0 Fehlbewertungen zulässig	$\frac{100-1}{1/0}$	$\frac{100-0}{0/0}$
<b>Montageprozess</b>	Absicherungsmaßnahmen	Absicherung gegen unvorhergesehene Störgrößen	Vorhandensein der technischen Einrichtungen	mit Checkliste prüfen		o.k.
	Plausibilitätsprüfung	korrekte Teilesortierung	2 Schlecht- und 2 Gutteile pro Merkmal der Anlage mind. zweimal zuführen	Gut- und Schlechteile müssen erkannt und richtig gehandhabt werden. Bei acht Prüfungen ist keine Abweichung zulässig.	8-0	8-0
	$C_m$ [1] Machine capability	Kurzzeitige Merkmalsstreuung, verursacht durch die Maschine	50 Teile produzieren	<b>Für Normalverteilte Merkmale:</b> $C_m, P_p, C_p = \frac{OGW - UGW}{6 \cdot \hat{\sigma}}$	$\geq 2,0$	2,1
	$C_{mk}$ [1] Critical machine capability	Fähigkeit der Maschine zur Produktion in der Toleranzmitte		$C_{mk}, P_{pk}, C_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{OGW - \hat{\mu}}{3 \cdot \hat{\sigma}}; \frac{\hat{\mu} - UGW}{3 \cdot \hat{\sigma}} \right\}$	$\geq 1,67$	2,0
	$P_p$ vorläufig [1] Process potential	Kurzzeitige Merkmalsstreuung von Maschine und Umgebung	125 Teile produzieren	<b>Für alle Verteilungsdichten:</b> $C_m, P_p, C_p = \frac{OGW - UGW}{o_p - u_p}$	$\geq 1,67$	1,9
	$P_{pk}$ vorläufig [1] Critical process potential	Kurzfristige Fähigkeit zur Produktion in der Toleranzmitte		$C_{mk}, P_{pk}, C_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{OGW - \hat{\mu}}{o_p - \hat{\mu}}; \frac{\hat{\mu} - UGW}{\hat{\mu} - u_p} \right\}$	$\geq 1,33$	1,9
	$C_p$ Langzeit [1] Process capability	Langzeitmerkmalsstreuung von Prozess und Umgebung	Für Abschätzung mindestens achtstündiger Probelauf.	oder: $C_m, P_p, C_p = \frac{OGW - UGW}{x_{\max} - x_{\min}}$	$\geq 1,33$	1,4
	$C_{pk}$ Langzeit [1] Critical process capability	Langzeitfähigkeit zur Produktion in der Toleranzmitte	Zur Beurteilung mindestens 20 Produktionstage	$C_{mk}, P_{pk}, C_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{OGW - \hat{\mu}}{x_{\max} - \hat{\mu}}; \frac{\hat{\mu} - UGW}{\hat{\mu} - x_{\min}} \right\}$	$\geq 1,0$	1,2

Leistung	Reale Taktzeit [Stück/min]	Zeit zwischen zwei fertigen Teilen im ungestörten Betrieb	Durchschnitt der langsamsten Komponente	Ermittlung durch Stoppen	$< t_{\text{plan}} / 0,90$	0,208
	Leistungsgrad [%]	Verhältnis von geplanter und realer Taktzeit	mindestens einminütiger ungestörter Betrieb bei maximal möglicher Geschwindigkeit.	$LG = \frac{t_{\text{plan}}}{t_{\text{real}}} * 100\%$	$> 90\%$	96%
		Verhältnis von realer und geplanter Kurzzeitleistung im ungestörten Betrieb		$LG = \frac{M_{\text{real}}}{M_{\text{plan}}} * 100\%$	$> 90\%$	96%
	Technische Verfügbarkeit, maschinenbedingter Nutzungsgrad [%]	Anteil der Laufzeit an der Belegungszeit minus organisatorischer Ausfallzeiten	mindestens vierstündiger Produktionslauf	$V_t = NG_{\text{mb}} = \frac{T_{\text{Lauf}}}{T_B - T_O} * 100\%$	$> 90\%$	88%
	Gesamtnutzungsgrad, praktische Verfügbarkeit [%]	Anteil der Laufzeit an der Belegungszeit	mindestens achtstündiger Produktionslauf	$V_p = NG = \frac{T_{\text{Lauf}}}{T_B} * 100\%$	$> 85\%$	82%
	Maschinenbedingte Qualitätsleistung [%]	Produktion und Sortierung von Schlechteilen	mindestens vierstündiger Produktionslauf	$QL_{\text{mb}} = \begin{cases} \frac{m - m_{\text{amb}}}{m} * 100\% & \text{für } N.i.O_{\text{Gmb}} = 0 \\ 0 & \text{für } N.i.O_{\text{Gmb}} > 0 \end{cases}$	$> 99\%$	99,1%
	Gesamtqualitätsleistung [%]		mindestens achtstündiger Produktionslauf	$QL = \begin{cases} \frac{m - m_a}{m} * 100\% & \text{für } N.i.O_G = 0 \\ 0 & \text{für } N.i.O_G > 0 \end{cases}$	$> 98\%$	97%
G.A.E.	Maschinenbedingte Gesamtanlageneffektivität [%]	$G.A.E_{\text{mb}} = QL_{\text{mb}} * NG_{\text{mb}} * LG$	mindestens vierstündiger Produktionslauf	$G.A.E_{\text{mb}} = \frac{m_{\text{gut}} + m_{\text{anmb}}}{(T_B - T_O) * M_{\text{plan}}} * 100\%$	$> 80\%$	83%
	Gesamtanlageneffektivität [%]	$G.A.E = QL * NG * LG$	mindestens achtstündiger Produktionslauf	$G.A.E = \frac{m_{\text{gut}}}{T_B * M_{\text{plan}}} * 100\%$	$> 75\%$	77%

Die Zusammenfassung zur Systemfähigkeit zeigt ein gutes Ergebnis mit überschaubarem Handlungsbedarf bei der Verfügbarkeit und der Qualitätsleistung. Verbesserungspotenzial liegen in der Beseitigung der maschinenbedingten Störungen (siehe Tabelle 7-14) sowie in der Verbesserung der Qualität und Sauberkeit der zugeführten Einzelteile. Nach der Umsetzung dieser Verbesserungsvorschläge ist ein international konkurrenzfähiger Montage- und Prüfprozess mit dem AMPS gegeben.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird ein neuartiger Algorithmus für die Planung und Realisierung fehlersicherer automatisierter Montage- und Prüfsysteme (AMPS) vorgestellt. Durch die bedarfsgerechte Kombination verschiedener Methoden der Fehlererkennung können die Qualitätsleistung und gleichzeitig die Verfügbarkeit von AMPS verbessert werden.

Die Notwendigkeit der Steigerung der qualitativen und quantitativen Ausbringungsmenge investitionsintensiver automatisierter Montage- und Prüfsysteme wird in Kapitel eins erläutert. Zum einen sind dies die verschärften internationalen Haftungsbedingungen (Produkthaftungsgesetz) und zum anderen die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens.

Im Stand der Technik (Kapitel zwei) werden die Qualitätsmerkmale von AMPS zusammengefasst. Kenngrößen hierfür sind die Qualitätsfähigkeit von Messmitteln, Maschinen und Prozessen; weiterhin das Verfügbarkeitsverhalten bzw. die Zuverlässigkeit des Systems und letztlich die Leistungsfähigkeit als Ausdruck für die Geschwindigkeit des Ausbringungsprozesses. Als Ergänzung zum Stand der Technik wird eine Differenzierung zwischen maschinenbedingten, z. B. technischen Störungen, und nicht maschinenbedingten Einflussgrößen, z. B. organisatorischen Störungen, vorgenommen. Dies schafft zusätzliche Transparenz im Spannungsfeld zwischen Anlagenhersteller und Anlagenbetreiber. Weiteres Verbesserungspotenzial wird durch die neue Definition der Qualitätsleistung realisiert. Während nach bisheriger Berechnung Schlechteile in der Menge der Gutteile eine nur unwesentliche Verschlechterung der Qualitätsleistung ergaben, ist die Berechnung nun so ausgelegt, dass schon ein Schlechteil in der Menge der Gutteile die Qualitätsleistung auf Null sinken lässt. Die Zusammenfassung der Qualitätsmerkmale von AMPS ergibt die Systemfähigkeit und wird tabellarisch dargestellt. Diese Zusammenfassung eignet sich als Grundlage für Analyse- und Entscheidungsprozesse.

Das Fehlerpotenzial von AMPS wird im dritten Kapitel analysiert. Dazu werden die AMPS in die Funktionsebenen Messkette, Station, Prozess und manueller Eingriff strukturiert. Ergebnis ist die Reduktion der vielfältigen Fehlermöglichkeiten auf wenige, aber signifikante finale Fehler.

Die Systematisierung von bekannten und die Entwicklung von neuen Methoden der Fehlererkennung zur Vermeidung der finalen Fehler ist Schwerpunkt des vierten Kapitels. Die Methoden gliedern sich in Redundanzkonzepte, Selbsttests und Plausibilitätskriterien. Das Konzept der Hardwareredundanz ist aus anderen Bereichen der Technik (z. B. Flugzeugbau) bereits bekannt und wird in dieser Arbeit erstmalig für die gezielte Anwendung in AMPS untersucht.

Das gleiche gilt für die analytische Redundanz. Dieses junge Forschungsgebiet der Technik greift auf Informationen zurück, die bereits im Prozess vorhanden sind und leitet daraus Überwachungsinformationen ab. In dieser Arbeit wird die analytische Kombinatorik für die gegenseitige Überwachung paralleler baugleicher Messstationen genutzt. Durch den Vergleich der gleitenden Mittelwerte aus beiden Messstationen werden auftretende Fehler umgehend erkannt. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung der sensorischen Eigenschaften von Servomotoren. Diese, bereits im Werkzeugbau genutzte Eigenschaft, wird für die Nutzung in AMPS herausgearbeitet. Über das Proportionalitätsverhalten zwischen Stromaufnahme und Drehmoment eines Servomotors wird ein Messwert für das abgegebene Drehmoment erzeugt. Dieser wird zur Überwachung mit dem Messwert eines weiteren Aufnehmers verglichen.

Die Methoden der Selbsttests bestehen darin, dass einzelne Komponenten von AMPS ihre Funktionsfähigkeit selbstständig überwachen. Für Wheatstone'sche Messbrücken wird die automatische Durchführung des Nullpunkttests entwickelt. Neuartig ist die Weiterentwicklung des Kalibrierwerttests. Dieser macht sich eine elektrische Schaltung zu Nutze, die der Sensorhersteller für andere Zwecke, z. B. für die manuelle Kalibrierung und Justage des Messverstärkers, benötigt. Durch die Kombination des Nullpunkt- und des Kalibrierwerttests kann der Selbsttest auf die Spannungsversorgung, den Messverstärker und auf die Auswerteeinheit, d. h. auf die gesamte Messkette, ausgedehnt werden.

Plausibilitätskriterien dienen der Abschätzung der Richtigkeit und Stimmigkeit von Ergebnissen in AMPS. Die beschriebenen Methoden, wie z. B. die Kalibrierüberwachung, die Teilerückverfolgbarkeit und die Handhabung von Schlechteilen sind weitgehend bekannt. Der Beitrag zur Erweiterung des bestehenden Wissen besteht darin, dass die für AMPS relevanten Methoden ergänzt, optimiert und systematisch beschrieben werden.

Im fünften Kapitel erfolgt die Zuordnung der Methoden der Fehlererkennung zu den möglichen finalen Fehlern. Dazu wird ein Standard-Absicherungs-Algorithmus definiert, der alle Methoden enthält, die als Basis für eine gute Qualitätsleistung in jedem AMPS integriert sein müssen. Weiterhin wird ein Erweiterter-Absicherungs-Algorithmus vorgestellt, der die bedarfs- und risikogerechte Erweiterung des Standards ermöglicht. Ein hierfür entwickeltes Computerprogramm erleichtert die Analyse der Fehlermöglichkeiten und die Zuordnung der Methoden der Fehlererkennung zu den finalen Fehlern.

Der Beitrag der Absicherungs-Algorithmen zur Steigerung der Verfügbarkeit von AMPS besteht in der zeitlichen Verkürzung und der Reduktion der Häufigkeit manueller Überwachungsmaßnahmen. Voraussetzung hierfür ist die Fehlersicherheit von AMPS, die durch den gezielten Einsatz der Methoden der Fehlererkennung erreicht wird. Fehlersicherheit beschreibt die Fähigkeit eines AMPS, Fehler sofort nach ihrem Auftreten oder in einem kurzen zeitlichen Abstand da-

nach selbstständig zu erkennen. Der damit erzielte Verfügbarkeitsgewinn liegt bei den untersuchten Komponenten (Längenmesssystem, Pressen und Schrauber) zwischen drei und acht Prozent. Der Verfügbarkeitsverlust durch das Ausfallverhalten zusätzlicher Bauelemente bei Anwendung von Redundanzkonzepten ist dagegen vernachlässigbar klein.

Die theoretischen Erkenntnisse werden im siebten Kapitel am Beispiel eines AMPS für Nockenwellenverstellsysteme praktisch erprobt. Es zeigt sich, dass der Aufwand bei der Analyse der Fehlermöglichkeiten in einem AMPS durch den Einsatz des Computerprogramms deutlich reduziert werden kann. Die kritischen finalen Fehler können schnell identifiziert und geeignete Abstellmaßnahmen in Form von zusätzlichen Methoden der Fehlererkennung definiert werden. Ergebnisse sind ein beschleunigter Entwicklungsprozess für AMPS sowie eine deutliche Verbesserung der Verfügbarkeit im späteren Betrieb. Im Beispiel konnte die Verfügbarkeit bei gleichzeitig sehr guter Qualitätsleistung um etwa sieben Prozent verbessert werden.

Als weiterführende Arbeit zu diesem Thema könnte das Ergebnisprotokoll der Systemfähigkeit in elektronischer Form im Betriebsdaten-Erfassungssystem (BDE) eines AMPS abgebildet werden. Hierzu ist zwar zusätzlicher Differenzierungsaufwand hinsichtlich der maschinen- und nicht maschinenbedingten Ausfallursachen nötig, jedoch würde die Vergleichbarkeit von AMPS deutlich an Qualität gewinnen. Durch die vorgestellten automatischen Methoden der Fehlererkennung kann zusätzlich der Aufwand für die Störungsdiagnose reduziert und die darauf aufbauende Fernwartung von AMPS verbessert werden.

## 9. Literaturverzeichnis

### [Andreasen 1985]

**Andreasen, Mogens Myrup:** *Montagegerechtes Konstruieren*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag, 1985.

### [auto 2004]

**auto motor sport:** *Heft 4*. Stuttgart: Vereinigte Motor-Verlage GmbH & Co. KG, April 2004.

### [auto 2005]

**auto motor sport:** *Heft 1*. Stuttgart: Vereinigte Motor-Verlage GmbH & Co. KG, Januar 2005.

### [Berndt 1968]

**Berndt, G.; Hultsch, E; Weinhold, H.:** Funktionstoleranz und Meßunsicherheit; *Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden 17*. Dresden: 1968 H.2.

### [Bihler ohne Jahr]

**Bihler:** Otto Bihler Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, *Flexibles Montage-System*. Informationsschrift Halblech: ohne Datum und Verlag.

### [Birolini 2004]

**Birolini, Alessandro:** *Reliability Engineering*. Berlin: Springer Verlag 2004.

### [Bosch 1992]

**Bosch, K.:** *Statistik-Taschenbuch*. München: Oldenbourg Verlag, 1992.

### [Bogner 2004]

**Bogner, Sebastian:** Optimierung und Erprobung eines Verfahrens zur Ermittlung des Fehlerpotenzials automatisierter Montage- und Prüfsysteme. *Praxisbericht über das Praktikum im Bereich Qualitätssicherung Entwicklung Maschinensysteme der INA-Schaeffler KG*. Herzogenaurach: 2004.

### [DGQ 1992]

**Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. (DGQ):** Bearbeiter Franzkowski, Rainer, Block Q2, *Auswertungsverfahren*. Lehrgang der Deutschen Gesellschaft für Qualität e.V., 2. Ausgabe 1992.

### [DGQ 1997]

**Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V.:** Block QM, *Statistische Methoden zur Entscheidungsfindung*, Lehrgang der Deutschen Gesellschaft für Qualität e.V. (DGQ), 2. Ausgabe 1997.

**[Dietrich 1998]**

**Dietrich, E; Schulze, A.:** *Richtlinien zur Beurteilung von Meßsystemen und Prozessen, Abnahme von Fertigungseinrichtungen.* München: Carl Hanser Verlag, 1998.

**[Dietrich 1998a]**

**Dietrich, E; Schulze, A:** *Statistische Verfahren zur Qualifikation von Meßmitteln, Maschinen und Prozessen.* 3. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 1998.

**[Dietrich 2003]**

**Dietrich, E; Schulze, A:** *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation.* 4. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2003.

**[Dietrich 2003a]**

**Dietrich, E; Schulze, A.:** *Eignungsnachweis von Prüfprozessen Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld.* München: Carl Hanser Verlag, 2003.

**[Ding 2005]**

**Ding, Eve; Massel, Thomas:** New Concept for Redundant Monitoring of Lateral Accelerometers. *In: ATZ worldwide 4/2005 Volume 107.* München: Carl Hanser Verlag, 2005.

**[Dornig 2005]**

**Dornig, Sirko:** *Auswirkung von Absicherungsmaßnahmen zur Qualitätssteigerung auf die Verfügbarkeit von automatisierten Montage- und Prüfsystemen.* Diplomarbeit TU Ilmenau, INA-Schaeffler KG. Herzogenaurach: 2005.

**[Ernst & Young 2004]**

**Ernst & Young AG:** Mittelstandsbarometer 2004.  
[www.ey.com/Global/content.nsf/Germany/Presse](http://www.ey.com/Global/content.nsf/Germany/Presse), zuletzt besuch am 04.04.2005.

**[Frenco 2002]**

**Franco GmbH:** *Die Annahme oder Zurückweisung von verzahnten Lehren und Meistern bezüglich Maß- und Formtoleranzen, Dokument OFD 10 vom 07.08.2002.* Altdorf: Eigenverlag Firma Frenco, 2002.

**[Führer 1998]**

**Führer, A.; Heidemann, K.; Nerreter, W.:** *Grundgebiete der Elektrotechnik Band 2. Zeitabhängige Vorgänge.* 6. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 1998.

**[Gebauer 1992]**

**Gebauer, Klaus Peter:** *Fehlerfrüherkennung an CNC Maschinen.* Dissertation, TU Darmstadt, 1992.

**[Hansen 2001]**

**Hansen, Robert C.:** *Overall equipment effectiveness: a powerful production/maintenance tool for increased profits*. 1. ed. New York, NY: Industrial Press, 2001.

**[Hattangadi 2005]**

**Hattangadi, A. A.:** *Plant and machinery failure prevention*. New York, NY: McGraw-Hill Professional, 2005.

**[Heise 2002]**

**Heise Wolfgang:** *Praxisbuch Zuverlässigkeit und Wartungsfreundlichkeit*. München: Carl Hanser Verlag, 2002

**[Herz 2004]**

**Herz, Alexander:** *Analyse der Einflussgrößen und der Komponenten der Messunsicherheit in der automatisierten Fertigungsmesstechnik und Entwicklung eines Verfahrens zu deren Abschätzung*. Diplomarbeit TU Ilmenau und INA-Schaeffler KG: 2004.

**[Hofmann 1986]**

**Hofmann, Dietrich:** *Handbuch Meßtechnik und Qualitätssicherung*. Berlin: VEB Verlag Technik, 1986.

**[Hofmann 1988]**

**Hofmann, Dietrich:** *Rechnergestützte Qualitätssicherung*. Berlin: VEB Verlag Technik, 1988.

**[Hofmann 1990]**

**Hofmann, Peter:** *Fehlerbehandlung in flexiblen Fertigungssystemen : eine Einführung für Hersteller und Anwender*. München, Wien: Oldenbourg Verlag, 1990.

**[INA 2004]**

**INA-Schaeffler KG:** *Gruppenprozedur 173753, Technische Liefervorschrift zur Fehlerabsicherung an Montage- und Prüfautomaten*. Herzogenaurach: 2004.

**[Joa 2004]**

**Joa, Eric:** *Untersuchungen zu Verteilungen und Merkmalen in Fertigungs- und Montageprozessen*. Projektarbeit TU Ilmenau: 2004.

**[Jürgensmeyer 1937]**

**Jürgensmeyer, Wilhelm:** *Die Wälzlager*. Berlin: Springer Verlag, 1937.

**[Kaiser 1999]**

**Kaiser, Birgit; Nowack, H.M.W.:** Nur scheinbar stabil. In: *QZ – Qualität und Zuverlässigkeit*, Nr. 6, S. 761-765, München: Carl Hanser Verlag, 1999.

**[Klages 1994]**

**Klages, U.:** *Struktur und Zuverlässigkeit verketteter Fertigungsanlagen*. Dissertation, Universität Braunschweig, 1994.

**[Köhrmann 2000]**

**Köhrmann, C.:** *Struktur und Zuverlässigkeit verketteter Fertigungsanlagen*. Fortschrittsbericht VDI Reihe 1 Nr. 538, Düsseldorf: VDI Verlag, 2000.

**[Langmann 2003]**

**Langmann, Reinhard:** *Taschenbuch der Automatisierung*. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig, 2003.

**[Leinweber 1954]**

**Leinweber, P.; Berndt, G.; Kienzle, O.:** *Taschenbuch der Längenmeßtechnik*. Berlin: Springer Verlag, 1954

**[Lindermaier 1998]**

**Lindermaier, Robert:** *Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen*. Dissertation TU München: Springer Verlag, 1998.

**[Linß 2002]**

**Linß, Gerhard:** *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. München: Carl Hanser Verlag, 2002.

**[Linß 2003]**

**Linß, Gerhard:** *Training Qualitätsmanagement*. München: Carl Hanser Verlag, 2003.

**[Linß 2005]**

**Linß, Gerhard:** *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. 2. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2005.

**[Linß 2005a]**

**Linß, Gerhard:** *Statistiktraining im Qualitätsmanagement*. München: Carl Hanser Verlag, 2005.

**[Linß 2005b]**

**Linß, G.; Zinner, C.; Dornig, S; Sommer, S.:** Prüfprozesse überprüfen, *QZ Zeitschrift für Qualität und Zuverlässigkeit*. München: Carl Hanser Verlag, Heft 4/2005, S. 43-47.

**[Lotter 1995]**

**Lotter, B.:** Unternehmerische Innovation, eine Alternative zur Verlagerung der Montage in Niedriglohnländer. In: *12. Deutscher Montagekongreß*. München, Landsberg: mi-Verlag 1995, ohne Seitenabgabe.

**[Lotter 1996]**

**Lotter, B.:** Automatische Montage – eine Alternative zum Niedriglohnland. In: Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): *Dezentrale Produktionsstrukturen*. IFA- Kolloquium, Hannover: 1996.

**[McKinsey 2005]**

**McKinsey&Company:** *McKinsey sieht Perspektiven für den Standort Deutschland*. Pressemitteilung vom 16. Februar 2005, in: [www.mckinsey.de/presse](http://www.mckinsey.de/presse), zuletzt besucht am 04.04.2005.

**[Mahmoud 2000]**

**Mahmoud, Rachad:** *Sicherheits- und Verfügbarkeitsanalyse komplexer Kfz-Systeme*. Dissertation, UNI-Gesamthochschule Siegen: 2000.

**[Mahmoud 2003]**

**Mahmoud, Mufeed M.:** *Active fault tolerant control systems: stochastic analysis and synthesis*. Berlin: Springer Verlag, 2003.

**[Milberg 1994]**

**Milberg, Joachim:** Unsere Stärken stärken – Der Weg zu Wettbewerbsfähigkeit und Standortsicherung. In: Reinhardt, G.; Milberg, J. (Hrsg.): *Unsere Stärken stärken*. München, Landsberg: mi-Verlag, 1994, S. 13-31.

**[Nakajima 1988]**

**Nakajima, Seiichi:** *Introduction to TPM: total productive maintenance*. Cambridge, Mass.: Productivity Press 1988.

**[Nakajima 1995]**

**Nakajima, Seiichi:** *Management der Produktionseinrichtungen*. Frankfurt a. M., New York: Campus Verlag, 1995.

**[Palmer 2003]**

**Palmer, Tony:** *Efficient redundancy design practices*. Alexandria, Va.: Water Environment Research Foundation, 2003.

**[Pfeifer 1998]**

**Pfeifer, T.:** *Fertigungsmesstechnik*. München: Oldenbourg Verlag, 1998.

**[Ploetz 2004]**

**Ploetz, Nico:** *Beschreibung und Entwicklung von Verfahren und Methoden zur Absicherung von automatisierten Montage- und Prüfprozessen*. Diplomarbeit TU Ilmenau und INA-Schaeffler KG: 2004.

**[Prock 1989]**

**Prock, J.:** *Ein allgemeines Konzept zur online-Meßfehlererkennung in dynamischen Systemen mittels analytischer Redundanz*. Zeitschriftenaufsatz: *Automatisierungstechnik* Band 37 Heft 8, 1989.

**[Quintec 2004]**

**Quintec:** *Poka Yoke Methode – Seminar für Lieferanten*. Schulungsunterlagen Poka Yoke Training: Robert Bosch GmbH, 2004.

**[Reich 2004]**

**Reich, Frank; Starke, Lothar:** *Qual04 – Methoden und Techniken der Qualitätssicherung 1*. Schulungsunterlagen: Studiengemeinschaft Darmstadt GmbH, 2004.

**[Reinhard 1997]**

**Reinhard, Gunther:** *Effiziente Produktentwicklung*, in: *VDI-Z 139 Nr. 4*. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, April 1997.

**[Reiter 1998]**

**Reiter, Robert:** *Integrierte Gestaltung automatisierter Prüfmittel für die flexible Montage.* Fortschrittsbericht VDI Reihe 8 Nr. 720, Düsseldorf: VDI Verlag 1998.

**[Sandau 1998]**

**Sandau, Michael; Wisweh, Lutz:** Viele Weg, ein Ziel; Teil 1, *QZ Zeitschrift für Qualität und Zuverlässigkeit.* München: Carl Hanser Verlag, Heft 10/1998, S. 1246-1249.

**[Sandau 1998a]**

**Sandau, Michael; Wisweh, Lutz:** Viele Weg, ein Ziel; Teil 2. *QZ Zeitschrift für Qualität und Zuverlässigkeit.* München: Carl Hanser Verlag, Heft 11/1998, S. 1376-1380.

**[Sandau 1999]**

**Sandau, Michael:** *Sicherheit der Bestimmung von Meßergebnissen in der Fertigungsmeßtechnik – ein Beitrag zur präventiven Fehlervermeidung in der Produktionstechnik.* Dissertation, Universität Magdeburg: Fakultät für Maschinenbau, 1998.

**[Scharf 1994]**

**Scharf, Peter:** *Die automatisierte Montage mit Schrauben: Anforderungen, alternative Fügeverfahren, Wirtschaftlichkeit.* Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag, 1994.

**[Schmidt 1995]**

**Schmidt, Stefan:** in: Nakajima, Seichi: *Management der Produktionseinrichtung.* Frankfurt a. M., New York: Campus Verlag, 1995.

**[SKF 1989]**

**SKF GmbH:** *Wälzlagerkatalog.* 1989.

**[Spur 1986]**

Spur, G.; Stöferle, T.: *Handbuch der Fertigungstechnik Bd. 5. Fügen, Handhaben und Montieren.* München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1986.

**[Staiger 2003]**

**Dr. Staiger, Mohilo & Co GmbH:** *Bedienungsanleitung für Reaktionsmomentaufnehmer,* Bedienungsanleitung Nr. 1239, Reaktionsmomentaufnehmer 0150 / 0154, Stand 08.09.2003.

**[Strauch 2005]**

**Strauch, Robert:** Maßnahmen zur Fehlerabsicherung an automatisierten Montage- und Prüfsystemen. *Praxisbericht über das Praktikum im Bereich Qualitätssicherung Entwicklung Maschinensysteme der INA-Schaeffler KG.* Herzogenaurach: 2005.

**[VDI 2005]**

**Verband Deutscher Ingenieure:** *VDI nachrichten Nr. 9. Mittelstand greift nach Robotik.* Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005.

**[VDI-Z 2004]**

**Verband Deutscher Ingenieure:** *VDI-Z Integrierte Produktion Nr. 4 146. Jahrgang.* Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, 2004.

**[VDMA 1996]**

**VDMA:** Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbauer: *Montage—Systemfähigkeit.* Forschungsheft Nr. 3, AiF-Vorhaben Nr. 9176. Frankfurt am Main: Maschinenbau Verlag, 1996.

**[VIM 1994]**

**Internationales Wörterbuch der Metrologie (VIM):** 2. Auflage, Berlin: Beuth Verlag, 1994.

**[Weckenmann 1999]**

**Weckenmann, A.; Gawande B.:** *Koordinatenmesstechnik.* München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1999.

**[Wendt 1992]**

**Wendt, Andreas:** *Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen.* Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1992.

**[Wernz 1992]**

**Wernz, Andreas:** *Erkennung und Diagnose von Sensorfehlern an einem Dampferzeuger.* Düsseldorf: VDI Verlag, 1992.

**[Wireman 2004]**

**Wireman, Terry:** *Total productive maintenance.* 2. ed New York, NY: Industrial Press, 2004.

**[Wisweh 1987]**

**Wisweh, Lutz:** *Rechnerunterstützte technologische Prüfvorbereitung bei der Geometrieprüfung in der Teilefertigung.* Dissertation B, TU Magdeburg: 1987.

**[Wünsche 1993]**

**Wünsche, Th.; Heinzl, J.:** *Rückwirkungen bei Aktoren sensorisch nutzen.* F & M 101 (1993) 5, München: Carl Hanser Verlag, 1993.

**[Zinner 2005]**

**Zinner, Carsten:** *Untersuchung zu Verteilungsmodellen und deren Einfluss auf die kostenoptimale Auswahl von Prüfmitteln zur Qualitätssicherung.* Dissertation TU Ilmenau: Fakultät für Maschinenbau, 2005.

**Patentschriften****[DD 276 409 A3]**

**DD 276 409 A3** – *Schaltungsanordnung zur dynamischen Eigenüberwachung von Flammenwächtern.*

**[DE 101 15 267 A1]**

**DE 101 15 267 A1** – *Verfahren zur Überwachung einer Windenergieanlage.*

**[DE 198 35 039 C2]**

**DE 198 35 039 C2** – *Elektrisch betriebenes Warngerät für zu geschlossenen zu haltende Türen.*

**[DE 692 11 782 T2]**

**DE 692 11 782 T2** – *Beschleunigungssensor mit Selbst-Test und dazu gehörige Schaltung.*

**Normen und Richtlinien****[DIN 8402 1995]**

**DIN EN ISO 8402:** *Qualitätsmanagement Begriffe.* Berlin: Beuth Verlag, 1995.

**[DIN 8593 2003]**

**DIN 8593 Teil 0 bis 8:** *Fertigungsverfahren Fügen* Berlin: Beuth-Verlag, 2003.

**[DIN 40041, 1990]**

**DIN 40041:** *Zuverlässigkeit – Begriffe.* Berlin: Beuth-Verlag, 1990.

**[DIN Taschenbuch 303]**

**DIN Taschenbuch 303:** *Längenprüftechnik 1, Grundnormen.* Berlin: Beuth Verlag 2000.

**[DIN Taschenbuch 197]**

**DIN Taschenbuch 197:** *Längenprüftechnik 2, Lehren.* Berlin: Beuth Verlag 2001.

**[DIN 1319-1 bis -4]**

**DIN 1319 Teil 1 bis 4:** *Grundlagen der Messtechnik.* Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag, 1995.

**[DIN V ENV 13005 1999]**

**DIN V ENV 13005:** *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM).* Europäisches Komitee für Normung, Berlin: Beuth Verlag, Mai 1999.

**[DIN EN 13306]**

**DIN EN 13306:** *Begriffe der Instandhaltung.* Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag, September 2001.

**[DIN EN ISO 14253-1 1999]**

**DIN EN ISO 14253-1:** *Geometrische Produktspezifikation (GPS). Prüfung von Werkstücken und Meßgeräten durch messen. Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen.* Berlin: Beuth Verlag, 1999.

**[DIN 55319 2000]**

**DIN 55319:** *Qualitätsfähigkeitskenngrößen*. Berlin: Beuth Verlag, 2000.

**[MSA 2002]**

**A.I.A.G – Chrysler Corp., Ford Motor Co., General Motors Corp.:** *Measurement Systems Analysis (MSA)*. Michigan, USA: A.I.A.G. Verlag, 2002.

**[VDA 5 2003]**

**VDA 5:** *Prüfprozesseignung, Verwendbarkeit von Prüfmitteln, Eignung von Prüfprozessen, Berücksichtigung von Messunsicherheiten*. Frankfurt am Main: Verband der Automobilindustrie e.V., 1. Auflage 2003.

**[VDI 2860 1990]**

**VDI 2860:** *Montage- und Handhabungstechnik, Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*. Verein Deutscher Ingenieure, Berlin: Beuth Verlag, 1990.

**[VDI 3423 2002]**

**VDI 3423:** *Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2002.

**[VDI 4004-2 1986]**

**VDI 4004 Blatt 2:** *Zuverlässigkeitskenngrößen - Überlebenskenngrößen*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1986.

**[VDI 4004-3 1986]**

**VDI 4004 Blatt 3:** *Kenngrößen der Instandhaltbarkeit*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1986.

**[VDI 4004-4 1986]**

**VDI 4004 Blatt 4:** *Zuverlässigkeitskenngrößen - Verfügbarkeitskenngrößen*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1986.

## 10 Abbildungs-, Tabellen- und Abkürzungsverzeichnis

### Abbildungsverzeichnis

<b>Kapitel 1</b>		Seite
1-1	Umsatzentwicklung in der deutschen Automatisierungsbranche	2
1-2	Automatisiertes Montage- und Prüfsystem (AMPS) für Nockenwellenversteller	3
1-3	Einflussgrößen auf das Messergebnis in der Labormesstechnik [Weckenmann 1999] und automatisierten Fertigungsmesstechnik [Herz 2004]	5
<b>Kapitel 2</b>		
2-1	Qualitätsmerkmale des Betriebsverhaltens von AMPS	8
2-2	Kenngrößen der Prüfprozesseignung [MSA 2002; DIN 1319-1 bis 4 1995; Dietrich 1998a; Linß 2005]	11
2-3	Ablauf der statistischen Prozessanalyse [Sandau 1999]	15
2-4	Fähigkeitskennwerte [Dietrich 1998a, S. 14]	16
2-5	Verteilungsfunktionen für nicht normalverteilte Merkmale [Dietrich 2003, S. 129]	18
2-6	Lineare Berücksichtigung der Messunsicherheit an den Toleranzgrenzen [DIN EN ISO 14253-1]	20
2-7	Quadratische Berücksichtigung der Messunsicherheit [Berndt 1968]	21
2-8	Einfluss der Messunsicherheit auf Fehlentscheidungen an den Toleranzgrenzen [Hofmann 1988]	21
2-9	Zweidimensionale Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Prozess- und Messabweichung [Linß 2005]	22
2-10	Unsicherheitsbereich verursacht durch die Messunsicherheit und Prozessverteilung	24
2-11	Wahrscheinlichkeit für eine Fehlentscheidung in Abhängigkeit von Messunsicherheit und Prozessfähigkeit	24
2-12	Berücksichtigung der Messunsicherheit [VDA 5 2003, S. 44]	25
2-13	Verfügbarkeitsarten im Überblick	28
2-14	Zusammenhang zwischen Ausfallrate und Lebensdauer	29
<b>Kapitel 3</b>		
3-1	Funktionen der Montage [DIN 8593 2003, VDI 2860 1990]	39
3-2	Komponenten von AMPS [Bihler ohne Jahr]	40
3-3	Strukturierung von AMPS in Funktionsbereiche	41
3-4	Allgemeine Darstellung der Komponenten der Messebene (Messkette)	41
3-5	Messebene (Messkette) am Beispiel „Stift einpressen“ [Ploetz 2004]	42
3-6	Regelkreis der Steuerung auf Stationsebene [Ploetz 2004]	42
3-7	Beispiel für die Stationsebene [Ploetz 2004]	43
3-8	Prozessebene [Ploetz 2004]	44

3-9	Beispiel für die Prozessebene	44
3-10	Einflussgrößen auf das Betriebsverhalten von AMPS [Köhrmann 2000]	46
3-11	A-posteriori Verteilung des Montage- und Prüfprozesses über die Zeit	57
<b>Kapitel 4</b>		
4-1	Komponenten der Qualitätsleistung	51
4-2	Gliederung der Methoden zur Fehlererkennung	52
4-3	Gliederung der Redundanzkonzepte	53
4-4	Darstellung der Differenz der Messstationen	58
4-5	Einflüsse auf die Differenz der beiden Messungen	58
4-6	Ablauf der Differenzbewertung	59
4-7	Beispiel für den Verlauf der Differenz bei homogener Hardwareredundanz	60
4-8	Gliederung der analytischen Redundanz	61
4-9	Montagestation und parallele baugleiche Messstationen	64
4-10	Vorlauf mit Messabweichung ab Urwert 51	65
4-11	t-Test mit n=6	66
4-12	Glättung der Prüfgröße $t_{\text{prüf}}$ durch größeres n (hier n=20)	66
4-13	Mittlere Warngrenzen anhand des stabilen Vorlaufs sowie Verletzung der unteren Eingriffsgrenze	67
4-14	Stromaufnahme eines Servomotors (oben) und Momentmessung mit einem Drehmomentaufnehmer (unten) über die Zeit	68
4-15	Proportionalitätsbeziehung zwischen Stromaufnahme und Drehmoment	69
4-16	Sensormoment (oben), Motormoment (Mitte) und Differenzbildung zur Fehlererkennung (unten)	70
4-17	Gliederung der Fehlererkennung durch Selbsttests	71
4-18	Wheatstone-Brückenschaltung mit Messkanalverstimmung	72
4-19	Nullpunkttest (links) und Kalibrierwerttest (rechts)	73
4-20	Leerlauf am Beispiel Drehbewegung	76
4-21	Funktionsprinzip der Kalibrierwertregelkarte	77
4-22	Gliederung der Normale	78
4-23	Anwendung der Referenzteile	78
4-24	Beispiel für die Verbausicherung eines Kalibriernormals	79
4-25	Setzkasten zur Vollzähligkeitskontrolle von Gebrauchsnormalen	79
4-26	Automatischer Umlauf von Gebrauchsnormalen	80
4-27	Leertakten nach manuellem Eingriff	81
4-28	Schlechtteil Quittierung, Sortierweichen Bruchkontrolle sowie Umsetzen des Prinzips „Verbot mit Erlaubnisvorbehalt“	82
4-29	Nicht manipulierbare Schlechtteilbehälter und Transportbänder	82
4-30	Variabler Schlechtteil-Speicherplatz	83
4-31	Integrierte Ausschuss- und Nacharbeitszelle	83
4-32	Schwellgrenzen	84
4-33	Möglichkeiten der Teilekennzeichnung	85

4-34	Gliederung der Teilerückverfolgbarkeit	86
4-35	Zwischenkastenprinzip	87
4-36	Kombinierte Bewegungs- und Zeitüberwachung [Ploetz 2004]	87
4-37	Messbereichsüberwachung beim Kalibrieren	88
4-38	Bewegungsüberwachung in der Messkette	88
4-39	Mehrmalige Schlechtbewertung in Folge [Ploetz 2004]	89
4-40	Werkzeugidentifikationssystem	89
4-41	Automatische Programmumstellung bei Typenwechsel	90
<b>Kapitel 5</b>		
5-1	Planungswerkzeug zur bedarfsgerechten Planung des E-Ab-AI	97
<b>Kapitel 6</b>		
6-1	Idealisierter Verfügbarkeitsgewinn durch ein fehlersicheres System (unten) im Vergleich zu einem konventionellen System (oben)	98
6-2	Methoden zur Realisierung von Fehlersicherheit	99
<b>Kapitel 7</b>		
7-1	PKW-Motor mit je einem Nockenwellenversteller für die Ein- und Auslasseite [auto 2005, S. 28]	103
7-2	Geplantes AMPS für Nockenwellenversteller	105
7-3	Kombinierte Prüfstation für Durchmesser und Ölbohrungen	108
7-4	Messprinzip der Spaltmaßprüfung	109
7-5	Zylinderstift einpressen mit Referenzmesssystem	109
7-6	Schraubspindel mit redundantem Messaufnehmer	110
7-7	Doppelte parallele Messstationen zur Funktionsprüfung	111
7-8	Integrierte Ausschuss- und Nacharbeitszelle zur reversiblen Schlechteilkennzeichnung mit Etikett	111

## Tabellenverzeichnis

<b>Kapitel 1</b>		Seite
1-1	Grad der Automatisierung [Spur 1986, S. 594f]	3
1-2	Komponenten von AMPS	7
<b>Kapitel 2</b>		
2-1	Neue Berechnung der Qualitätsleistung (QL) und Mengengerüst	10
2-2	Stand der Technik bei der Prüfprozesseignung [Linß 2005b]	12
2-3	Berechnung für normalverteilte Merkmalswerte [Linß 2002]	17
2-4	Berechnung für nicht normalverteilte Merkmalswerte nach der Prozentanteil-methode [Dietrich 1998a; Linß 2002]	19
2-5	Mindestanforderungen für die Bewertung [Linß 2002, S. 348f]	19
2-6	Verfügbarkeit in Normen und Richtlinien	26
2-7	Zeiterfassung nach [VDI 3423 2002]	26
2-8	Ausfallzeiten, Ausfallursachen, Abhängigkeiten und Verantwortung	27

2-9	Verfügbarkeitsberechnung	28
2-10	Begriffe, Tätigkeiten und Kenngrößen der Instandhaltbarkeit	30
2-11	Berechnung der Kenngrößen der Instandhaltbarkeit	31
2-12	Berechnung der organisatorischen Ausfallzeiten	31
2-13	Berechnung des Leistungsgrades	33
2-14	Mindestanforderungen an die Gesamtanlageneffektivität	34
2-15	Mindestanforderungen an die maschinenbedingte Gesamtanlageneffektivität	35
2-16	Maschinenbedingte Gesamtanlageneffektivität	35
2-17	Gesamtanlageneffektivität	35
2-18	Ablauf der Ermittlung der Systemfähigkeit	36
2-19	Übersicht Systemfähigkeit	37
<b>Kapitel 3</b>		
3-1	Übersicht der Funktionsbereiche und Schnittstellendefinition	45
3-2	Strukturmatrix	46
3-3	Finale Fehler im Funktionsbereich Messebene (Messkette)	48
3-4	Finale Fehler im Funktionsbereich Stationseben	49
3-5	Finale Fehler im Funktionsbereich Prozessebene	49
3-6	Finale Fehler im Funktionsbereich Manuelle Eingriffs-Ebene	50
<b>Kapitel 4</b>		
4-1	Homogenen Hardwareredundanz in einer Montagestation	55
4-2	Diversitäre Hardwareredundanz in einer Montagestation (hier Spindelpresse)	56
4-3	Homogene Hardwareredundanz in einer Längenmessstation	57
4-4	Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der Hardwareredundanz	60
4-5	Wiederholmessung in einer Messstation	62
4-6	Vergleich der beiden Vorgehensweisen	63
4-7	Mathematische Grundlagen des t-Tests	65
<b>Kapitel 5</b>		
5-1	Standard-Absicherungs-Algorithmus für alle AMPS	92
5-2	Bewertungsmaßstab	94
5-3	Funktionsbereich „Messkette“	94
5-4	Funktionsbereich „Station“	94
5-5	Funktionsbereich „Prozess“	95
5-6	Funktionsbereich „Manueller Eingriff“	95
<b>Kapitel 6</b>		
6-1	Verfügbarkeitsgewinn durch Fehlersicherheit an Beispielen	100
6-2	Ausfallraten für Komponenten von AMPS ermittelt aus Angaben für bauähnliche Systeme [Mahmoud 2000]	101
6-3	Berechnung der zusätzlichen mittleren Reparaturzeit (MTTR) aufgrund der eingesetzten Hardwareredundanz im Vollbetriebsjahr (7200h)	102
6-4	Zusätzlicher Aufwand für Hardwareredundanz	102

<b>Kapitel 7</b>		
7-1	Montage- und Prüfvorgänge im AMPS für Nockenwellenversteller	105
7-2	Anwendung des S-Ab-AI als Checkliste	106
7-3	E-Ab-AI für die „Durchmesserprüfung durch Messung am Einzelteil Rotor“ mit einem pneumatischen Düsenmessdorn	107
7-4	E-Ab-AI für die „Attributive Prüfung von fünf Ölbohrungen“ mit einem Lehrdorn	108
7-5	E-Ab-AI für die „Spaltmaßprüfung durch Messung zwischen Rotor und Stator“ mit induktiven Messtastern	108
7-6	E-Ab-AI für den Montagevorgang „Zylinderstift einpressen“ mit einer elektromechanischen Presse mit integrierter Überwachung der Kraft mit einem Dehnungsmessstreifen (DMS) Kraftaufnehmer und inkrementalen Wegmesssystem	109
7-7	E-Ab-AI für den Montagevorgang „Fünf Verschraubungen“ mit fünf elektromechanischen Schraubern mit integrierter Überwachung des Momentes und des Drehwinkels	110
7-8	E-Ab-AI für „Funktionsprüfung Verriegelungsspiel“ mit zwei parallelen Messstationen und inkrementalen Drehwinkelmeßsystem	110
7-9	Ermittlung der vorläufigen Systemfähigkeit	112
7-10	Durchschnittlicher und reduzierter Aufwand für präventive Instandhaltungsmaßnahmen	113
7-11	Ausbringungsmenge des Probelaufs	114
7-12	Ausfallanalyse während des Probelaufs	114
7-13	Analyse der Schlechtheilmenge	115
7-14	Ausfallzeiten während des Probelaufs	115
7-15	Berechnung des Leistungsgrades	117
7-16	Berechnung der maschinenbedingten Gesamtanlageneffektivität	118
7-17	Gesamtanlageneffektivität	118
7-18	Zusammenfassung zur Systemfähigkeit	119

## Abkürzungsverzeichnis

A	Auftretenswahrscheinlichkeit (eines Fehlers)
a	Jahr
AA	Arbeitsausschuss
AL	Ausgangslage (einer Bewegung)
AMPS	Automatisierte Montage- und Prüfsysteme
AT	Antrieb
BW	Bewegung
Cg	Potenzial Messmittelfähigkeit
Cgk	Fähigkeitsindex Messmittelfähigkeit
Cm	Maschinenpotenzial
Cmk	Kritische Maschinenfähigkeit
Cp	Langzeit-Prozesspotenzial

Cpk	Langzeit-Prozessfähigkeit
DIN	Deutsche Industrienorm
DMS	Dehnungsmessstreifen
$d_n$	Tabellenwert für die Ermittlung eines Schätzwertes für die Standardabweichung
E	Entdeckungswahrscheinlichkeit (eines Fehlers)
E-Ab-AI	Erweiterter-Absicherungs-Algorithmus
EL	Endlage (einer Bewegung)
EN	Europannorm
F(t)	Lebensdauerfunktion/Ausfallfunktion
FMT	Fertigungsmesstechnik
f(t)	Dichtefunktion der Ausfalldauer- bzw. Lebensdauerfunktion
G	Gewicht (eines Fehlers)
G.A.E	Gesamtanlageneffektivität
G.A.E <sub>mb</sub>	Maschinenbedingte Gesamtanlageneffektivität
$g_{pp}$	Eignungskennwert Prüfprozess nach [VDA 5 2003]
$G_{pp}$	Empfohlener Grenzwert je nach Toleranzklasse [VDA 5 2003]
GRR	Eignungskennwert Prüfprozess nach [MSA 2002]
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurement
h	Stunde
KRK	Kalibrierwertregelkarte
k	Erweiterungsfaktor
k. A.	keine Angaben
i. O.	in Ordnung
ISO	International Organization for Standardization
L	Mittlere Lebensdauer
LG	Leistungsgrad
LMT	Labormesstechnik
LSL	Lower specification limit (untere Spezifikationsgrenze)
M	Tatsächliche Mengenleistung
MA	Messaufnehmer
ML	Montagelinie
MM	Merkmal
$M_{plan}$	Geplante Mengenleistung
mb	maschinenbedingt
MDT	<b>Mean Down Time</b>
MRDA	<b>Mean Related Administrated Downtime</b>
MRDL	<b>Mean Related Logistic Downtime</b>
MRDP	<b>Mean Related Downtime for Preventive Maintenance-</b>
MTBF	<b>Mean Time Between Failure</b>

MTTR	<b>Mean Time To Repair</b>
$M_{\text{real}}$	Reale Mengenleistung
$M_{\text{theo}}$	Theoretische Mengenleistung
m	Gefertigte Anzahl Teile (gut und schlecht)
$m_a$	Anzahl Schlechteile
$m_{\text{amb}}$	Anzahl Schlechteile maschinenbedingt
$m_{\text{anmb}}$	Anzahl Schlechteile nicht maschinenbedingt
$m_{\text{gut}}$	Anzahl Gutteile
max	Maximum
min	Minuten
NA	Nacharbeit
$NA_{\text{mb}}$	Nacharbeit maschinenbedingt
$NA_{\text{nmb}}$	Nacharbeit nicht maschinenbedingt
n	Anzahl Messungen
$n^*$	Anzahl Messungen zur Ermittlung eines Messwertes im Fertigungsprozess
N.i.O.	Nicht in Ordnung
$N.i.O._G$	Anzahl der Schlechteile in der Menge der Gutteile
$N.i.O._{Gmb}$	Anzahl der Schlechteile in der Menge der Gutteile maschinenbedingt
$N.i.O._{Gnmb}$	Anzahl der Schlechteile in der Menge der Gutteile nicht maschinenbedingt
NG	Nutzungsgrad
nmb	nicht maschinenbedingt
O.E.E.	Overall Equipment Effectiveness
OEG	Obere Eingriffgrenze
OGW	Oberer Grenzwert
OPT	Obere Produktionstoleranz
OT	Obere Toleranz
OWG	Obere Warngrenze
$o_p$	Oberer Prozentpunkt
ppm	Parts per million
$P_{\text{an}}$	Anteil richtig angenommener Gutteile
$P_{\text{an};j}$	Anteil fälschlich angenommener Schlechteile
$P_{\text{ab}}$	Anteil richtig zurückgewiesener Schlechteile
$P_{\text{ab};j}$	Anteil fälschlich abgelehnter Gutteile
$P_p$	Vorläufiges Prozesspotenzial
$P_{pk}$	Kritische vorläufige Prozessfähigkeit
PT	Plausibilitätsteil
QL	Qualitätsleistung / Qualitätsgrad
$QL_{\text{mb}}$	Maschinenbedingte Qualitätsleistung
QRK	Qualitätsregelkarte

$r$	Korrelationskoeffizient
$R_1 - R_4$	Widerstände (hier in Form von Dehnungsmessstreifen)
$R_5$	Kalibrierwiderstand
$\overline{R}_i$	Mittelwert der Spannweite zwischen Bedienern
R&R	Wiederholbarkeit und Nachvollziehbarkeit
RPZ	Risikoprioritätszahl
$R(t)$	Zuverlässigkeitsfunktion
RT	Referenzteil
SA	Scheinausschuss
$SA_{mb}$	Scheinausschuss maschinenbedingt
$SA_{nmb}$	Scheinausschuss nicht maschinenbedingt
S-Ab-AI	Standard-Absicherungs-Algorithmus
$s_g$	Standardabweichung einer Messreihe von Wiederholmessungen
$S_{ges}$	Gesamtstandardabweichung
$s$	Standardabweichung der Stichprobe
$\hat{s}_i$	Schätzwert für die Standardabweichung
$S_1$	Schalter für Kalibriersignal
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
ST	Station
T	Toleranz oder auch Spezifikationsbereich
$T^*$	Übereinstimmungsbereich (um die Messunsicherheit reduzierte Toleranz)
$T_B$	Belegungszeit
$T_{Bereit}$	Bereitschaftszeit
$T_{Bereit\ theo}$	Theoretische Bereitschaftszeit
$T_{Lauf}$	Laufzeit
$T_O$	Organisatorische Ausfallzeit (z.B. administrative und logistische Gründe)
$T_{O\ ad}$	Administrativer Anteil der organisatorischen Ausfallzeit
$T_{O\ log}$	Logistischer Anteil der organisatorischen Ausfallzeit
$T_T$	Reparaturzeit (Technische Ausfallzeit)
$T_W$	Inspektions- und Wartungszeit
$t_{krit}$	Kritische t-verteilte Größe (Verwendung beim t-Test)
$t_{plan}$	geplante Taktzeit
$t_{prüf}$	Prüfgröße des t-Tests
$t_{real}$	realisierte Taktzeit
TPM	Total Productive Maintenance
U	Erweiterte Messunsicherheit
u	Standard Messunsicherheit
$U_A$	Ausgangsspannung (Ausgang des Verstärkers)

UEG	Untere Eingriffgrenze
UGW	Unterer Grenzwert
UT	Untere Toleranz
$U_m$	Messsignal (Ausgang der Brücke)
$u_p$	Unterer Prozentpunkt
USL	Upper specification limit (obere Spezifikationsgrenze)
$U_S$	Brückenspeisespannung
$U_V$	Versorgungsspannung
UWL	Untere Warngrenze
$u_{Zuf}$	Zufälliger Anteil der Messunsicherheit
V	Verfügbarkeit
$V_p$	Praktische Verfügbarkeit
$V_o$	Operationelle Verfügbarkeit
$V_t$	Technische Verfügbarkeit
$V_{theo}$	Theoretische Verfügbarkeit
WT	Werkstückträger
WZ	Werkzeug
$\bar{X}$	Mittelwert der Stichprobe
$\bar{\bar{x}}$	Mittelwert der Stichprobenmittelwerte
$x_{wahr}$	Wahrer Wert einer Messgröße
Y	Messergebnis
$Z_{krit}$	Kritische Fähigkeit
Zk	Zwischenkasten
$Z_{\alpha/2}$	Quantil der Normalverteilung
$\lambda(t)$	Ausfallrate
$\mu(t)$	Reparaturrate
$\hat{\mu}$	Schätzwert für den Prozessmittelwert
$\mu_1$	Mittelwert der Prozessabweichung
$\mu_2$	Mittelwert der Messabweichung
$\hat{\sigma}$	Schätzwert für die Prozess-Standardabweichung
$\varphi_1$	Prozessabweichungen
$\varphi_2$	Messabweichungen
$\Delta_{Max}$	Maximal zulässige Differenz zwischen den Messergebnissen redundanter Messsysteme
$\Delta_{Sys}$	Systematischer Anteil der Messunsicherheit

## 11 Anhang

### Anhang A: Tabellen zur Fehleranalyse [Ploetz 2004]

#### A.1 Messkette

	Fehlerursache	Fehler	Fehlerfolgen	Maßnahmen zur Fehlererkennung / Vermeidung
Messkette	Kabelbruch, Beschädigung durch mechanische oder elektrische Überlastung	Messwertaufnehmer fällt aus	Bauteile werden unvermessen zur nächsten Bearbeitungsstufe transportiert oder als N.i.O. eingestuft	Selbsttest, redundante Messwertaufnehmer, Signalzeitüberwachung <sup>1</sup> , Ruhelagenüberwachung
	Taster oder Teil falsch gespannt/fixiert, in falscher Lage/Position, Teil wird weiter bewegt, obwohl Taster noch auf Teil, Materialermüdung	Tasterbruch	Alles N.i.O. und Erhöhung des internen Ausschusses oder alles i.O. und N.i.O.-Teile werden als i.O. bewertet	Bewertungskriterien für Regelkarten, bei elektrisch leitendem Materialen: wenn Taster antastet, wird Prüfstrom durch Taster und Bauteil geschickt, Ruhelagenüberwachung, Messbereichsüberwachung beim Nullen
	Mechanische Einwirkung, Materialermüdung	Kabelbruch Messsystem	Kein Messsignal	Signalzeitüberwachung
	Taster legt sich zu langsam an / ist schwergängig	Messstart erfolgt vor Anlegen des Tasters	Fehlmessung	Kalibrierregelkarte, Plausibilitätskontrolle im Automatikbetrieb, Bewertungskriterien für Regelkarten
	Taster fest, defekt	Gleichbleibendes Messsignal	Bewertung von AA/NA als i.O.	Signalzeitüberwachung, Ruhelagenüberwachung

<sup>1</sup> Signalzeitüberwachung: Wird ein Vorgang gestartet, in dem eine bestimmte Folge von Signalen zu erwarten ist, kann der nächste Schritt der Abfolge erst erfolgen, wenn das Signal registriert wurde. Wird das Signal innerhalb einer definierten Zeit nicht aufgenommen, bricht die Anlage den Vorgang ab und es wird eine Fehlermeldung ausgegeben.

	Fehlerursache	Fehler	Fehlerfolgen	Maßnahmen zur Fehlererkennung / Vermeidung
Messkette	Test auf Messmittelfähigkeit nicht durchgeführt (z. B. Versäumnisse bei der Abnahme)	Messmittelfähigkeit nicht gegeben	Fehlmessungen, Auslieferung von AA/NA Baugruppen	Plausibilitätskontrolle
	Menschliches Versagen, ungenügende Arbeitsanweisungen	Tasterpolarität vertauscht	Fehlmessungen, Erhöhung des internen Ausschusses, Auslieferung von AA/NA Baugruppen	Plausibilitätskontrolle, Kalibrierregelkarte, Bewertungskriterien für Regelkarten
	Menschliches Versagen, keine Justierhilfe vorhanden, ungenügende Arbeitsanweisungen	Messsystem nicht korrekt justiert	Messsystem außerhalb des linearen Bereichs, Messbereich nicht über gesamten Toleranzbereich	Selbsttest nach Instandhaltung / während der Produktion, ob benötigter Messbereich zur Verfügung steht, Messbereichsüberwachung beim Nullen
	Kabelbruch wird bei zwei redundant sich gegenseitig überwachenden Kraftsensoren nicht erkannt	Es wird nur Differenz zwischen beiden Kraftsensoren überwacht, messen beide das Gleiche, ist Differenz null, bei Kabelbruch jedoch auch	Erhöhung des internen Ausschuss	Einen Kraftsensor mit Offset kalibrieren und i.O. Messung für Differenz entsprechend Offset verändern, Ruhelagenüberwachung
	Messbereich reicht nicht über Toleranzgrenzen hinaus	N.i.O.-Teile als i.O. gemessen	Mögliche AA Teile werden verkauft	Selbsttest nach Instandhaltung / während der Produktion, ob benötigter Messbereich zur Verfügung steht, Plausibilitätskontrolle
	Messsystem beschädigt, Werkzeugbruch	Anzugsmoment / Anzugswinkel von Schraubenverbindung N.i.O.	Schraubenverbindung N.i.O.	Redundante Schraubstationen, Moment- oder Wegaufnehmer, Selbsttest

	Fehlerursache	Fehler	Fehlerfolgen	Maßnahmen zur Fehlererkennung / Vermeidung
Messkette	Verschmutzung, verschlechterte Bauteilqualität, Messobjekt nicht von Umwelt befreit	Messsystem verschleißt / ist beschädigt	Erhöhung der Streuung Erhöhung des internen Ausschusses,	Redundante Messsysteme, Selbsttest, Plausibilitätstest
	Verschmutzung, neue Charge, mechanische Einwirkung auf Messsystem, Warmlaufverhalten	Verschleiß	Verschiebung des Mittelwertes → Drift, Erhöhung des internen Ausschusses, Messung AA/NA als i.O.-Teil	Redundante Messsysteme, Selbsttest, Plausibilitätstest
	Direkte Sonneneinstrahlung, Wechsel Tag/Nacht, Sommer/Winter	Messfehler durch Erwärmung	Messung AA/NA als i.O.-Teil oder Erhöhung des Scheinausschusses	Produktionsbereich klimatisieren, Fenster abschirmen (keine direkte Sonneneinstrahlung zulassen)
	Menschliches Versagen, ungenügende Arbeitsanweisungen	Eingabe falscher Nullungswerte	Messung AA/NA als i.O.-Teil oder Erhöhung des Scheinausschusses	Plausibilitätskontrolle durch vermessenes unabhängiges Bauteil
	Temperaturschwankungen, Sauberkeit, Feuchtigkeit, Schwingungen, Messkraft zu groß/klein, Messobjekt nicht von Umwelt befreit, siehe Fischgrätendiagramm	Messfehler	Auslieferung von AA Teilen, Erhöhung des internen Ausschusses	Redundante Messsysteme, Selbsttest, Plausibilitätstest, Nullung,
	Unachtsamkeit des Bedieners, fehlende Arbeitsanweisungen	Toleranzgrenzen falsch eingegeben	Falsche Zuordnung der Teile	Plausibilitätskontrolle durch Plausibilitätsteile im WT-Umlauf
	Kabelbruch, gelöste Verbindung	Kein Messsignal	Produktion läuft weiter ohne Messung des Teils	Signalzeitüberwachung
	Verschmutzung, Verschleiß Nullungsteile, falsches Nullungsteil, falsche Kalibrierwerte eingetragen, Taster misst auf anderer Messebene als 3D	Fehler beim Kalibrieren/ Nullen	Messungen fehlerhaft, Auslieferung von AA Teilen, Erhöhung des internen Ausschusses	Kalibrierregelkarte + Plausibilitätskontrolle mit unabhängigem vermessenem Bauteil

	Fehlerursache	Fehler	Fehlerfolgen	Maßnahmen zur Fehlererkennung / Vermeidung
Messkette	Falsche theoretische Grundlagen, viele Merkmale miteinander verrechnet	Fehler behaftete Auswertung durch Messrechner	n.i.O Teile werden ausgeliefert, Erhöhung des internen Ausschusses	Plausibilitätskontrolle
	Starke elektromagnetische Felder, keine Abschirmung der elektronischen Geräte	Elektromagnetische Störungen, Messrechner erhält fehlerhaftes Signal	Messrechner bewertet Werkstück nach falschem Signal	Plausibilitätskontrolle, Abschirmung der Kabel, Lichtleiterkabel verwenden, getrennte Spannungsversorgung
	Menschliches Versagen, ungenügende Arbeitsanweisungen, überraschende Inkompatibilität	Falscher Taster eingebaut	Fehlmessungen, Auslieferung von AA/NA Baugruppen	Plausibilitätstest, Referenzteile
	Angrenzende Bearbeitungsmaschinen	Fehler durch Schwingungsverhalten	Erhöhte Streuung, erhöhter interner Ausschuss	Stationen auf Feder - Dämpfer - Systemen lagern
	Ungenaueres Messsystem, Beschädigung des Messaufnehmers	Linearitätsfehler	Fehler behaftete Messungen	Plausibilitätskontrolle mit zwei vermessenen Bauteilen an oberer und unterer Toleranzgrenze
	Falsche Feder verwendet, Druck von Pneumatik / Hydraulik zu groß	Antastkraft zu hoch	Verdrücken des Bauteils, Eindruck in Material → Fehlmessung	Plausibilitätskontrolle
	Taster während Betrieb oder durch Rüsten / Instandhalten anders justiert	Messung auf falscher Messebene	Fehlmessungen	Plausibilitätskontrolle, Kalibrierregelkarte
	Gemeinsame Stromversorgung von mehreren Peripheriekomponenten verursacht Stromschwankungen	Schwankungen im Signal von Messwertaufnehmer	Zufällige Messfehler	Signal von Messwertaufnehmer in Ruhestellung überprüfen
	Verschmutzte zugeführte Werkstücke, geringer Wartungszyklus, unmotivierte Mitarbeiter	Verschmutzung der Messtechnik	Kalibrierfehler, Messfehler, Auslieferung schlechter Endprodukte, erhöhter Scheinausschuss	Kalibrierregelkarte, redundante Messtechnik, analytische Redundanz, Schwellwerte, ...

## A.2 Stationsebene

	Fehlerursache	Fehler	Fehlerfolgen	Maßnahmen zur Fehlererkennung / Vermeidung
Stationsebene	Teil fällt während Montage aus Montagevorrichtung, Fehler bei Instandhaltungsmaßnahmen, unvollständiger Bewegungsablauf	Montage unvollständig / nicht bis zum Ende ausgeführt	Nächster Montageschritt kann nicht / nur fehlerhaft ausgeführt werden, Auslieferung fehlerhafter Baugruppen, Beschädigung der Produktionsanlage	Bewegungsüberwachung, post Prozess Prüfwelle, Überwachung der Geometrie des von der Montage veränderten Bereichs
	Falsche (ähnliche) Teile eingelegt	Falsche (ähnliche) Teile montiert	Erhöhung des internen Ausschusses, nachfolgende Stationen können beschädigt werden, eventuell Auslieferung von AA Teilen	Charakteristische Merkmale der Zuführteile zu 100% prüfen
	Lieferantenproblem, ungeprüfte Teile verbaut, Chargenwechsel	Teile ungenügender Qualität montiert	Funktionsstörung/ -ausfall der Baugruppe	Zuführteile zu 100% prüfen
	Verrutschen während des Transports → keine Transportsicherung	Teile in falscher Lage montiert	Nächster Montageschritt kann nicht / nur fehlerhaft ausgeführt werden, Auslieferung fehlerhafter Baugruppen, Beschädigung der Produktionsanlage	Lage- und Positionsüberwachung
	Periode zum Auswechseln des Werkzeuges zu lang	Werkzeugverschleiß	Produktion von N.i.O.-Teilen	Werkzeugüberwachung mit Lichtschranke oder Kamera, akustische Überwachung
	Periode zum Auswechseln des Werkzeuges zu lang	Werkzeugbruch	Produktion von N.i.O.-Teilen	Werkzeugüberwachung mit Lichtschranke oder Kamera, akustische Überwachung

	Fehlerursache	Fehler	Fehlerfolgen	Maßnahmen zur Fehlererkennung / Vermeidung
Stationsebene	Kontakt zwischen Initiator und Bauteil, menschliches Versagen	Initiator wird verstellt, bleibt aber funktions-tüchtig	Keine Erkennung von Bauteilen mehr möglich, falsche Erkennung von Zuständen	Signalzeitüberwachung
	Kontakt zwischen Initiator und Bauteil, menschliches Versagen	Initiator fällt aus	Keine Erkennung von Zuständen mehr möglich, Anlage bildet Zustände im internen Modell falsch ab	Selbsttest des Initiators
	Verschmutzung, unebene Auflageflächen, Fixierungsproblem durch Werkstück	Fehlerhafte Fixierung der Werkstücke	Fehlmessungen, Beschädigung Produktionsanlage	Positions- und Lageüberwachung
	Verschmutzung, Werkzeugbruch, beschädigtes Positioniersystem	Fehlerhafte Positionierung der Werkstücke	Beschädigung der Produktionsanlage, keine oder fehlerhafte Montage/Messung	Positions- und Lageüberwachung
	Beschädigter Antrieb, schwergängige Lager, Stromversorgung Antrieb unterbrochen (Kabelbruch, Wackelkontakt)	Endlagen von Bewegungen nicht erreicht	Folgende Aktion wird ausgeführt, obwohl Endlage nicht erreicht, Beschädigung der Produktionsanlage / des Werkstücks	Bewegungsüberwachung
	Falsche Einspannung der Bauteile, unvollständige Montage, Rüstvorgänge, Instandhaltungsmaßnahmen → menschliches Versagen	Initiator wird beschädigt	Initiator fällt aus	Selbsttest des Initiators
	Kabelbruch / Wackelkontakt der Stromversorgung, Druckluftabfall, beschädigter Antrieb	Antriebseinheit bewegt sich nicht  Antriebseinheit beschädigt	Endlagen nicht erreicht	Bewegungsüberwachung, Leistungsaufnahme Antrieb abfragen

	Fehlerursache	Fehler	Fehlerfolgen	Maßnahmen zur Fehlererkennung / Vermeidung
Stationsebene	Antrieb wird nicht abgeschaltet	Einheit fährt über Endlage hinaus	Beschädigung der Montageanlage, des Werkstücks	Endlagenschalter, Not Stopp Schalter, mechanische Beschädigungssicherung (Sollbruchstelle)
	Kabelbruch, Wackelkontakt, mechanische Einwirkung	Endlagenschalter defekt	Antrieb wird nicht abgeschaltet	Selbsttest, Modul zur eigenständigen Überwachung von Tastern oder Initiatoren
	Mechanische Einwirkung, kein Druckaufbau durch Kompressor, Ventil beschädigt, Verbindung locker, Druckluftschwankungen	Hydraulik / Pneumatik beschädigt	Bewegungen werden nicht ausgeführt	Bewegungsüberwachung, Signalzeitüberwachung
	Antrieb beschädigt	Vorgang nicht ausgeführt	Unvollständige Montage	Bewegungsüberwachung
	Menschliches Versagen, Materialermüdung, Konstruktionsfehler,	Montagesystem nicht korrekt justiert	Beschädigung des Werkstücks, Werkzeugs, unvollständige Montage,	Rüst- und Instandhaltungsprozeduren
	Menschliches Versagen	Nullungsteil wird verbaut	Funktionsstörung des Endprodukts	Verbausicherung
	Werkzeugbruch	Einpressung trotz Wegüberwachung nicht tief genug	Einzupressendes Teil nicht tief genug eingepresst	Werkzeugbruchüberwachung, Überwachung Einpresstiefe ex post
	Keine Abfrage, ob vorher notwendige Bewegungen schon ausgeführt wurden	Bewegung aus beliebiger Lage in Ausgangslage führt zu Crash	Beschädigung der Montageanlage	Bewegungsüberwachung und Sperrung von Bewegungen

	Fehlerursache	Fehler	Fehlerfolgen	Maßnahmen zur Fehlererkennung / Vermeidung
Stationsebene	Beschädigte Fixierung, Vibrationen durch angrenzende Anlagen / durch Produktionsanlage, Konstruktionsfehler, Fehler in Werkstückgeometrie	Teil löst sich bei Montagevorgang aus Fixierung und fällt herunter	Teil befindet sich ohne Zuordnung in Station, Teil wird i.O.-Teilen zugeordnet	Existenzüberwachung, ist Teil bei nächster Station nicht mehr vorhanden Stopp und Fehlermeldung, Arbeitsanweisung, dass alle Teile ohne Zuordnung aus Station unverzüglich entfernt werden müssen
	Menschliches Versagen, Materialermüdung, Vibrationen von angrenzenden Anlagen, Vibrationen durch Produktionsanlage	Gelockerte Befestigungen des Montagesystems	Position von Montage-, Mess-, Fixierungs- oder Positionierungseinrichtungen nicht mehr i.O.	Positions- und Lageüberwachung, In Prozess Überwachung von Montagevorgängen
	Fehlerhafte Positionierung	Beschädigung der Fixierungsvorrichtung	Beschädigung der Produktionsanlage, keine oder fehlerhafte Montage/Messung	Positions- und Lageüberwachung, In Prozess Überwachung von Montagevorgängen
	Menschliches Versagen	Fremdkörper (Schutzbrillen, Handschuhe, Schraubenschlüssel, ...) verbleiben nach Rüsten/ Instandhalten in Station	Beschädigung der Produktionsanlage, der Werkstücke	Mit Prozeduren und Checklisten absichern, dass alles, was in der Anlage benutzt wurde, auch wieder herausgenommen wird (wie bei der Operation im Krankenhaus)
	Fremdkörper im Prozess	Beschädigte Weichen	Werkstück wird falsch einsortiert und eventuell AA als i.O. verkauft	Überwachen, ob Weichen tatsächlich geschaltet haben
	Verschmutzte zugeführte Werkstücke, geringer Wartungszyklus, unmotivierte Mitarbeiter	Verschmutzung der Montage-technik	Fehlerhaft montierte Baugruppen, erhöhter Ausschuss	Duckluftdüse, Staubsauger, Bürsten

### A.3 Prozessebene

	Fehlerursache	Fehler	Fehlerfolgen	Maßnahmen zur Fehlererkennung / Vermeidung
Prozessebene	Teil fällt herunter und wird einfach wieder dem Prozess zugeführt	Bauteile zweimal bearbeitet	Funktionsstörung der Baugruppe	Teile-Zuordnung gewährleisten
	Schieberegister wird verschoben, Teil wird unbefugt aus Prozess entnommen, im Prozess vertauscht, fällt herunter	Teilezuordnung geht verloren, Synchronisation Material zu Datenfluss gestört	Kennzeichnungsfehler, Montage falscher Paarungen	Sensor auf WT anbringen, der erkennt, ob Teil vorhanden oder nicht
	Elektrische, magnetische Felder	Datenfluss gestört	Werkstücken werden falsche/ unvollständige Daten zugeordnet, ja/nein Abfragen (z. B. Initiator) geben nur noch ja oder nein aus	Plausibilitätstest, Paritätsbits,
	Weiche defekt, falsche Klasseneinteilung	Teilesortierung (i.O., Schlecht NA, AA, Setup, Warmlauf, Nullungsteile) fehlerhaft	Erhöhung des internen Ausschusses, Auslieferung von AA-, Setup-, Nullungsteilen, ... an Kunden	Ausschussgegenkontrolle (Überwachung, ob AA wirklich den Ausschussbereich erreicht hat)
	Bei manueller Entnahme: Fehler in Personalplanung, Bediener nicht am Platz; bei automatischer Entnahme: Defekt von Entnahmevorrichtung	Entnahme erfolgt nicht	Stau an Entnahmeband, Behinderung der Produktion, Bauteile werden auf Entnahmeband platziert, obwohl dieses schon voll ist	Auslastung der Entnahmestation überwachen

	Fehlerursache	Fehler	Fehlerfolgen	Maßnahmen zur Fehlererkennung / Vermeidung
Prozessebene	Antrieb Transporteinheit beschädigt, Bediener nicht am Platz	Teile werden nicht abtransportiert	Stau auf/vor Transportband, Stop der Linie durch Rückstau	Werkstücküberwachung auf Transporteinrichtung
	Geöffnete Abdeckung der Transportvorrichtung, menschliches Versagen	Teile werden aus dem Prozess unbefugt entnommen	Teilezuordnung geht verloren	Bänder abdecken, Ausschussgegenkontrolle, sicherer Ausschusskasten
	Zuordnung Daten zu Teil geht verloren	Schieberegister fehlerhaft	N.i.O. wird i.O. bewertet	Maschinenabnahme
	Beschriftungsanlage defekt	Prüfzeichen an Bauteil fehlt; allg. Vorgang nicht ausgeführt	Teilezuordnung nach Entnahme aus Prozess nicht mehr möglich	Bilderkennung, die Vorhandensein der Beschriftung überprüft
	Menschliches Versagen	Keine Beschriftung der Ausschussbänder	AA wird NA, keine Nacharbeit, da jetzt AA	Maschinenabnahme
	Speicherfehler, unbefugter Zugriff	Daten gelöscht	Rückverfolgbarkeit nicht mehr gegeben, keine Zuordnung zu i.O oder N.i.O.	redundante Datenspeicherung, Passwortabfrage gegen unbefugten Zugriff
	Teilezuordnung nicht gewährleistet	Kennzeichnungsfehler	Keine Rückverfolgbarkeit möglich, Verkauf von AA als i.O.	Überwachung, ob Kennzeichnung ausgeführt wurde, automatisches Einlesen der Kennzeichnung und Abgleich mit Sollkennzeichnung

## A.5 Rüstebene

	Fehlerursache	Fehler	Fehlerfolgen	Maßnahmen zur Fehlererkennung / Vermeidung
Rüstebene	Unachtsamkeit Bediener, komplexer Rüstvorgang, ungenügende Arbeitsanweisungen, menschliches Versagen	Falsches Handlingsystem gerüstet	Bauteile fallen herunter, Zuordnung geht verloren	Identifikationssystem für Rüstvorgang installieren
	Mensch ist in Prozess eingebunden	Unachtsamkeit, fehlende Motivation / Qualifikation des Bediener, menschliches Versagen	Jeder denkbare und undenkbbare Fehler	Rüstvorgang so aufbauen, dass nur eine einzige Abfolge, sowie Art und Weise des Rüstens möglich ist, Identifikationssystem für Rüstvorgang installieren
	Menschliches Versagen	Auf falsche Type gerüstet	Beschädigung der Anlage, Auslieferung fehlerhafter Teile, Erhöhung des internen Ausschusses	Teile von Type 1 dürfen nicht in Vorrichtungen von Type 2 einlegbar sein → Poka Yoke Lösung
	Unachtsamkeit Bediener, komplexer Rüstvorgang, ungenügende Arbeitsanweisungen	Falsches Montagewerkzeug wird gerüstet	Produktion von Ausschuss, Beschädigung der Produktionseinheit, Stillstand der Produktionseinheit	Arbeitsanweisungen, Rüsthilfen, der Mensch sollte beim Rüstern nur noch Handlungsaufgaben übernehmen
	Menschliches Versagen	Falsches Messsystem / Messaufnehmer wird gerüstet	Fehlmessungen	Identifikationssystem für Rüstvorgang installieren
	Unachtsamkeit Bediener, komplexer Rüstvorgang, ungenügende Arbeitsanweisungen	Falsches Programm wird in Messrechner geladen	Produktion von Ausschuss, Beschädigung der Produktionseinheit, Stillstand der Produktionseinheit	Checklisten

## A.6 Ebenenübergreifende Fehler

	Fehlerursache	Fehler	Fehlerfolgen	Maßnahmen zur Fehlererkennung / Vermeidung
Ebenen übergreifende Fehler	Menschliches Versagen	Menschliches Versagen	Beschädigung der Anlage, Verkauf von NA, AA, ...	Prozeduren, Arbeitsanweisung, Checklisten
	Menschliches Versagen	Einrichtteile, Nullungsteile, AA, NA verkauft, obwohl die Zuordnung korrekt war	Kundenreklamationen	Einrichtteile vor Einrichten deutlich kennzeichnen, Verbausicherung Nullungsteile, AA-Teile kennzeichnen / zerstören, NA in integriertem Sperrlager neu Prozess zuführen
	Menschliches Versagen	Fehlende Prozeduren / Arbeitsanweisungen	Erhöhtes Fehlerpotential	Abnahmechecklisten
	Menschliches Versagen	Instandhaltung findet nicht statt	Verschleiß, Verschmutzung	Prozeduren und Arbeitsanweisungen
	Ungenauere Positionierung, Fixierung, ungenaues Greifen	Bauteil wird bei Montage zerstört und In-Prozess - Überwachung merkt dies nicht	Funktionsstörung /- Ausfall Baugruppe	Ex post Kontrolle
	Stillstand der Montagelinie	Lagerung in Puffer läßt Teile „schlecht“ werden (z. B. Rost)	Erhöhung des internen Ausschusses, Kundenreklamation	System zur Erkennung von Rost, ...
	Menschliches Versagen	Verpackungsfehler	Beschädigung während des Transports	Wiegen der einzelnen Verpackungsschritte
	Nullungsteile nicht eindeutig als solche gekennzeichnet	Nullungsteile bearbeitet	Beschädigung an der Montage- und Prüfanlage, Beschädigung der Nullungsteile	Bearbeitungssicherung
		Konstruktionsfehler		Soll nicht Gegenstand der Arbeit sein

**Anhang B:**

## Befragungsergebnisse in Werken der Schaeffler Gruppe

Anwendung	Kalibrierzyklus	Kalibrierzeit	Kalibrierintervall (Zyklen)	Nächste Wartung
Induktive Taster	42,8% 1x pro Schicht 38% mehrmals pro Schicht 14,2% 1x pro Tag	50% bis 5 min 35,8 % 5-10 min 7,1 % 10-20 min 7,1% k. A.	50% 5000-10000 35,8% 1000-5000 7,1% alle 500 7,1 % mehr als 10000	35,7% 0,5-1 Jahr 21,4% keine Angabe 21,4% bis 3 Monate 7,2% wenn defekt 7,2% unterschiedlich 7,2% bis 2 Jahre
Inkrementelle Taster	35,7% 1x pro Schicht 28,5% mehrmals pro Schicht 28,5% k. A. 7,14% 1x pro Woche	50% bis 5 min 28,5% k. A. 14,2% 5-10 min	33,3% bis 1000 33,3% 5000-10000 33,3% k. A.	42,8% k. A. 28,5% 2 Jahre 14,28% 0,5-1 Jahr 7,1% 5-10 Jahre 7,1% wenn defekt
Pneumatische Taster	44,4% 1x Schicht 27,7% mehrmals pro Schicht 27,7% k. A.	40% 10 min 33,3% k. A. 20% 5 min 6,6% 10-20 min	40% 5-10 min 31,25% k. A. 18,75% 5 min 6,2% 10-10 min	50% k. A. 21,4% 0,5-1Jahr 21,4% 3 Monate 7,1% wenn defekt 7,1% 2 Jahre
Pressen	31,25% 1x Schicht 18,75% 1x Woche 18,75% mehrmals pro Schicht 12,5% Wz.-Wechsel 12,5% k. A. 6,25% 1x Tag	64,28% 5-10 min 21,4% bis 5 min 7,1% 10-20 7,1% k. A.	53,3% bis 10000 20% 10000-100000 13,3% k. A. 6,6% bis 1 Million. 6,6% Wz.-Wechsel	53,8% bis 1 Jahr 38,46% k. A. 15,38% k. A. 7,6% bis 3 Monate
Schraubsysteme	50% k. A. 28,5% 1 x Jahr 7,1% 1x Woche 7,1% 1x Schicht	61,5% k. A. 23% 10-20 min 7,6% demontiert 7,6% 5-10 min	50% k. A. 28,5% 10000-100000 14,2% bis 10000 7,1% 1 Million.	64,28 k. A. 28,5% bis 1Jahr 7,1% 2-3 Jahre

Legende: Wz...Werkzeug, k. A....keine Angaben

**Anhang C:**

Ermittlung des zufälligen Anteils der maximal zulässigen Differenz zwischen den Messergebnissen redundanter Messstationen:

Bestehende Verfahren z. B. MSA 2002	VDA Band 5	GUM
<p>Für Messsystem 1:  <math>s_{g1}</math> und <math>\bar{R}_1</math></p> $s_{ges1} = \sqrt{s_{g1}^2 + \hat{s}_1^2}$ <p>Für Messsystem 2:  <math>s_{g2}</math> und <math>\bar{R}_2</math></p> $s_{ges2} = \sqrt{s_{g2}^2 + \hat{s}_2^2}$ <p>mit <math>\hat{s}_i = \frac{\bar{R}_i}{d_n}</math></p> <p>z. B.: <math>d_n = 3,08</math> für <math>n = 10</math>  <math>d_n = 3,93</math> für <math>n = 25</math>  <math>d_n = 4,50</math> für <math>n = 50</math></p>	<p>Für Messsystem 1:  <math>u_1 =</math></p> $\sqrt{u_{A/B1}^2 + u_{Auf1}^2 + u_{temp1}^2 + u_{Bed1}^2 + u_{Obj1}^2 + u_{Kali1}^2}$ <p>Für Messsystem 2:  <math>u_2 =</math></p> $\sqrt{u_{A/B2}^2 + u_{Auf2}^2 + u_{temp2}^2 + u_{Bed2}^2 + u_{Obj2}^2 + u_{Kali2}^2}$	<p>wie  VDA Band 5</p>
<p>Die Differenz der Messergebnisse (<math>Y_1 - Y_2</math>) ist normalverteilt mit der Varianz:</p> $\text{Var}(Y_1 - Y_2) = \text{Var}(Y_1) + \text{Var}(Y_2) - 2 * \text{Cov}(Y_1, Y_2)$		
<p>Für die Unabhängigkeit der Messergebnisse (d. h. Korrelationskoeffizient <math>r = 0</math>) wird die Kovarianz Null. Hieraus ergibt sich:</p>		
Bei MSA und VDA 5 ist immer $r = 0$		für $r \neq 0$
$u_{Zuf} = \sqrt{s_{ges1}^2 + s_{ges2}^2}$	$u_{Zuf} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$	$u_{Zuf} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 - 2 * r * u_1 * u_2}$
<p>Folgende Null- bzw. Alternativhypothese wird betrachtet:</p> $H_0: Y_1 = Y_2 \quad H_1: Y_1 \neq Y_2$		
Unter $H_0$ hat $Y_1 - Y_2$ den Erwartungswert Null:	$Y_1 - Y_2 \sim N(0, u_{Zuf})$	
Durch Normierung auf die Standardnormalverteilung ergibt sich:	$\frac{Y_1 - Y_2}{u_{Zuf}} \sim N(0, 1)$	
$H_0$ ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha$ abzulehnen, wenn:	$\frac{Y_1 - Y_2}{u_{Zuf}} > z_{\alpha/2}$	
<p>Die Messungen unterscheiden sich hinsichtlich ihres zufälligen Anteils signifikant, wenn: <math> Y_1 - Y_2  &gt; z_{\alpha/2} * u_{Zuf}</math></p>		

**Herleitung des Wurzel n\*-Gesetzes:**

Die Messunsicherheit der zwei Messstationen ( $u_1; u_2$ ) wird wie folgt dargestellt:

$$u_1 = \sqrt{\text{Var}(x_{St,1})} \text{ und } u_2 = \sqrt{\text{Var}(x_{St,2})} \quad (1)$$

Die Unsicherheit des Mittelwertes zwischen den beiden Messstationen ist:

$$u_m = \sqrt{\text{Var}(X_m)} \quad (2)$$

Der Mittelwert berechnet sich aus:  $x_m = \frac{x_{St,1} + x_{St,2}}{2}$  (3)

Somit folgt:  $u_m = \sqrt{\text{Var}\left(\frac{x_{St,1} + x_{St,2}}{2}\right)}$  (4)

Da gilt:  $\text{Var}(a * X) = a^2 * \text{Var}(X)$  [Bosch 1992, S.308] (5)

Folgt:  $u_m = \sqrt{\frac{1}{4} \text{Var}(x_{St,1} + x_{St,2})} = \frac{1}{2} \sqrt{\text{Var}(x_{St,1} + x_{St,2})}$  (6)

Da gilt:  $\text{Var}(X + Y) = \text{Var}(X) + \text{Var}(Y) + 2 * \text{Cov}(X, Y)$  (8)

Folgt:  $u_m = \frac{1}{2} \sqrt{\text{Var}(x_{St,1}) + \text{Var}(x_{St,2}) + 2 * \text{Cov}(x_{St,1}, x_{St,2})}$  (9)

Wenn die beiden Messstationen unabhängig sind, wird die Kovarianz Null.

Somit folgt:  $u_m = \frac{1}{2} \sqrt{\text{Var}(x_{St,1}) + \text{Var}(x_{St,2})}$  (10)

Unter Berücksichtigung von (1) ergibt sich:  $u_m = \frac{1}{2} \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$  (11)

Wenn die Messunsicherheit der beiden Messstationen gleich ist ( $u_1 = u_2$ ) gilt:

$$u_m = \frac{1}{2} \sqrt{2 * u_1^2}$$

Die Messunsicherheit ( $u_m$ ) bei der Mittelwertbildung der Messungen beider Messstationen berechnet sich aus den Messunsicherheiten der einzelnen

Messstationen durch:  $u_m = \frac{1}{2} \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \frac{1}{2} \sqrt{2 * u_1^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{u_1^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} * u_1$

Herleitung des Wurzel n\* Gesetzes am Beispiel n\*=2.



## FMEA für automatische Montage- und Prüfsysteme

Merkmal: Rotordurchmesser u. Ölbohrungen

Erstellt durch:  
Stephan Sommer

Datum: 12.04.2005

500 < RPZ < 1000  
300 < RPZ < 500  
0 < RPZ < 300

Überarbeitet durch:  
Stephan Sommer

Datum: 12.04.2005

Teil-Nummer:

Genehmigt durch:

Datum:

Teil- Bezeichnung:  
Rotor

	Finale Fehler	Ursache	Folge	Istzustand				Verbesserter Zustand				Kosten (in 1000€)	Anzahl Type		
				Absicherungs- maßnahme	Auftreten	Gewicht	Entdeckung RPZ	zusätzliche Absicherungs- Maßnahme	Auftreten	Gewicht	Entdeckung RPZ				
1 Messkette	Messwert liegt knapp außerhalb der Produktions-toleranz	Messunsicherheit an Toleranzgrenzen, Messsystem nicht korrekt justiert, Kalibrierfehler	Teil wird in AA / NA sortiert	S-Ab-AI	7	3	3	63	Wiederholmessung bei Schlechtbewertung						
					7	5	3	105							
2 Messkette	Messwert liegt außerhalb der Funktionstoleranz	grober Messfehler durch grobe Störfaktoren (z. B. Verschmutzung, Werkzeugbruch)	Teil wird in AA / NA einsortiert	S-Ab-AI	7	3	5	105	KRK PC-gestützt mit ZK (bei Diff. Messung nicht mögl.) (5; 0,5/MM) Bemerkung zu Auswahl 1: Wird ind Station 7 mitgeprüft. Maßnahme ist ausreichend	7	10	5	350	0,5	1
					7	10	10	700							
3 Messkette	Messsystem verschleißt oder ist beschädigt	Umwelteinfluss auf Messung, Gebrauchsspuren; Verschleiß, Überlast	Messunsicherheit steigt, z. B. Erhöhung der Streuung, Drift, AA / NA - Anteil steigt	S-Ab-AI	7	7	8	392	Min, max, mittel Referenzteil mit ZK (7; 1,5/MM) Bemerkung zu Auswahl 2: Maßnahme ist ausreichend	7	7	7	343	1,5	1
4 Messkette	Messwertaufnehmer fällt aus, kein Messsignal	Taster fest, Kabel, Taster defekt	alles N.i.O.	S-Ab-AI	7	10	3	210	leer Bemerkung zu Auswahl 3: Fehler wird durch S-Ab-AI bemerkt.	7	10	0		0	1
			N.i.O. wird gut oder andere Gutgruppe		7	10	5	350							
5 Messkette	Sehr hohe Messunsicherheit	Grobe Umwelteinflüsse, elektromagnet. Einflüsse, falscher Taster	Gut wird N.i.O.	S-Ab-AI	4	8	4	128	leer Bemerkung zu Auswahl 4: Fehler wird durch S-Ab-AI bemerkt.	6	10	0		0,0	1
			N.i.O. wird gut		6	10	8	480							
6 Messkette								leer Bemerkung zu Auswahl 5:							

### Anhang D: Ausführliches Planungswerkzeug E-Ab-AI

7	Station	Antriebsinheit beschädigt,	Stromversorgung unterbrochen, Druckluftabfall	Endlage wird nicht erreicht, unvollständige Montage	S-Ab-AI	8	8	2	128								
		Antrieb wird nicht abgeschaltet				Antrieb fährt über Endlage hinaus	8	8	5	320	leer	Bemerkung zu Auswahl 6:	8	8	0		0,0
8	Station	Werkzeugbruch, Werkzeugverschleiß	Werkzeugwechselperiode zu lang	Gut wird N.i.O.	S-Ab-AI	5	8	5	200								
				N.i.O. wird Gut		8	10	7	560	Werkzeugüberwachung durch Lichtschranke (nur Bruch) (4; 1/WZ)	Bemerkung zu Auswahl 7: Maßnahme ist ausreichend, da Verschleiß nicht zu erwarten ist (gehärteter Lehrdom).	8	10	4	320	1,0	1
9	Station	Initiator sendet falsches Signal	Initiator wird verstellt oder beschädigt, elektromagnetische Störungen	Keine Erkennung von Zuständen oder Bauteilen mehr möglich	S-Ab-AI	5	8	8	320	Doppelbelegung Initiatoren prüfen (Wackler, Preller) (4; 0,5/BW)	Bemerkung zu Auswahl 8:	5	8	4	160	0,5	1
10	Station	falsche Teile montiert, fehlerhafte Fixierung bzw. Positionierung	keine sichere Handhabung der Teile, unebene Auflageflächen z.B. durch Verschmutzung	nächster Montageschritt kann nicht / nur fehlerhaft ausgeführt werden	S-Ab-AI	5	10	3	150		Bemerkung: Absicherung durch S-Ab-AI auf Stationsebene (Existenz, Position Werkstück prüfen).	5	10				
11	Station	AA / NA -Teil wird als Gutteil in Folgeteil verbaut	Fehler wurde vor Weiterbearbeitung nicht erkannt, weil nicht geprüft	Folgeteil fehlerhaft	Fehler wird in Folgeprüfung erkannt	5	5	5	125	Fehler wird in Folgeprüfung erkannt.		5	5				
					Fehler wird nicht in Folgeprüfung erkannt	5	10	10	500	leer	Bemerkung zu Auswahl 9:	5	10	0		0,0	1
12	Station									leer	Bemerkung zu Auswahl 10:						
13	Prozess	Teil durch Prüfsystem richtig bewertet, aber SPS oder Mechanik/Roboter sortiert falsch	Zuordnung Teile-Daten in SPS falsch oder Sortiermechanik beschädigt bzw. falsch justiert	N.i.O. wird gut	S-Ab-AI	5	10	7	350	Chargengebundene Teilerückverfolgbarkeit (7; 1/ML)	Bemerkung zu Auswahl 11: Maßnahme ist ausreichend.	5	10	7	350	1,0	1
14	Prozess	AA / NA -Teil landet in Gutteile	Fehler im Ablauf oder Sonstiges	Teil wird an internen Kunden geliefert	S-Ab-AI	5	7	10	350	Je N.i.O. Merkmal ein N.i.O. Speicherplatz (7; 1/MM)	Bemerkung zu Auswahl 12:	5	7	7	245	1,0	1
				Teil wird an externen Kunden geliefert - Reklamation		5	10	10	500	leer	Bemerkung zu Auswahl 13: Nicht zutreffend	5	10	0		0,0	1

15	Prozess	zu viele N.i.O. Teile	Fehlerhafte Einzelteile oder Montage	Häufung von N.i.O., N.i.O.-Speicher läuft über	S-Ab-AI	7	8	8	448	Ausreichend große N.i.O.-Speicher vorsehen (5; 0,5/MM) Bemerkung zu Auswahl 14:	7	8	5	280	0,5	1
		Unbekannter N.i.O.-Grund	N.i.O. Ursache nicht zuordenbar	Fehlerursachen schwierig zu finden	S-Ab-AI	6	7	8	336	leer Bemerkung zu Auswahl 15: Fehler wird mit N.i.O-Speicher abgesichert.	6	7	0		0,0	1
17	Prozess								leer Bemerkung zu Auswahl 16:							
18	Prozess								leer Bemerkung zu Auswahl 17:							
19	Man. Eingriff	Falsche Komponenten Steuer- oder Mess-Programm gerüstet	Menschliches Versagen, ungenügende Arbeitsanweisung, komplexer Rüstvorgang,	Produktion läuft mit falschem Prüfprogramm	S-Ab-AI	5	10	8	400	automatische Programmumstellung bei Typenwechsel (3; 1/ML) Bemerkung zu Auswahl 18:	5	10	3	150	1,0	1
		Bauteile fallen herunter oder werden entnommen	manueller Eingriff, Fehler im automatischen Ablauf	ungeprüfte oder halbfertige Teile verseuchen Gutteile	S-Ab-AI	7	10	9	630	Verbausicherung Referenzteile (4; 0,5/RT) Bemerkung zu Auswahl 19: Zusätzlich zum Leertakten nach manuellem Eingriff.	7	10	4	280	0,5	1
21	Man.	Referenzteile verbleiben im Arbeitsbereich	Unachtsamkeit, Überlastung	Referenzteile werden verbaut	S-Ab-AI	7	10	7	490	leer Bemerkung zu Auswahl 20: Fehler wird durch die Verbausicherung vermieden (siehe oben).	7	10	0		0,0	1
									leer Bemerkung zu Auswahl 21:							
23	Man. Eingriff								leer Bemerkung zu Auswahl 22:							
		Geschätzte Kosten für zusätzliche Absicherungsmaßnahmen														<b>9,5 T€</b>

# Thesen

Zur Dissertation von Dipl.-Wirtsch.-Ing. Stephan Sommer

Thema:

Algorithmen zur Steigerung der Qualitätsleistung und Verfügbarkeit automatisierter Montage- und Prüfsysteme

## **Einleitung:**

1. Das Qualitätsniveau von Lieferungen in der Automobilindustrie strebt eine Fehlerquote von 0 parts per million (ppm) an.
2. Automatisierte Montage- und Prüfsysteme (AMPS) leisten einen wesentlichen Beitrag zur Null-Fehler Produktion.
3. Der große Investitionsaufwand zur Beschaffung von AMPS muss durch eine hohe qualitative Ausbringungsmenge (Qualitätsleistung) und durch eine hohe Verfügbarkeit möglichst schnell kompensiert werden.

## **I Stand der Technik:**

4. Qualitätsmerkmale des Betriebsverhaltens von AMPS sind die Qualitätstauglichkeit von Messmitteln, Maschinen und Prozessen; weiterhin das Verfügbarkeitsverhalten und letztlich die Leistungsfähigkeit als Ausdruck für die Geschwindigkeit des Ausbringungsprozesses.
5. Als Ergänzung des Standes der Technik sollte zusätzlich zwischen maschinenbedingten und nicht maschinenbedingten Störungen unterschieden werden.
6. Ein Schlechtteil in der Menge der Gutteile sollte die Qualitätsleistung auf Null sinken lassen.
7. Die Qualitätsmerkmale des Betriebsverhaltens von AMPS lassen sich zur Systemfähigkeit zusammenfassen.

## **II Theoretische Untersuchungen:**

8. Durch die Strukturierung von AMPS in die Funktionsbereiche Messkette, Station, Prozess und manueller Eingriff wird die Analyse der Fehlermöglichkeiten vereinfacht.
9. Die Vielzahl der Fehlermöglichkeiten in AMPS lassen sich auf wenige signifikante Fehler, den sogenannten finalen Fehlern, reduzieren.
10. Um die finalen Fehler frühzeitig zu erkennen sind Methoden der Fehlererkennung notwendig.
11. Die Systematisierung bekannter und die Entwicklung neuer Methoden der Fehlererkennung ist die Voraussetzung zur Erkennung der finalen Fehler.

12. Die Methoden der Fehlererkennung gliedern sich in Redundanzkonzepte, Selbsttests und Plausibilitätskriterien.
13. Die bedarfs- und risikogerechte Kombination verschiedener Methoden der Fehlererkennung wird mithilfe von Absicherungs-Algorithmen durchgeführt.
14. Der Standard-Absicherungs-Algorithmus gilt für alle AMPS und wird bei der Planung als Checkliste eingesetzt.
15. Der Erweiterte-Absicherungs-Algorithmus ist für jedes AMPS individuell planbar und berücksichtigt spezifische Risiken.
16. Ein neues Computerprogramm unterstützt die Erarbeitung des Erweiterten-Absicherungs-Algorithmus.
17. Durch die Anwendung der Absicherungs-Algorithmen können AMPS fehlersicher gestaltet werden.
18. Fehlersicherheit bedeutet, dass das AMPS Fehler unmittelbar nach deren Auftreten selbstständig erkennt.
19. Durch fehlersichere AMPS kann sowohl die Qualitätsleistung als auch die Verfügbarkeit gesteigert werden.
20. Der Beitrag zur Steigerung der Qualitätsleistung besteht in der Minimierung der Produktion von Schlechtteilen.
21. Der Beitrag zur Steigerung der Verfügbarkeit besteht in der zeitlichen Verkürzung und der Reduktion der Häufigkeit manueller Überwachungsmaßnahmen.

### **III Praktische Umsetzung:**

22. Die praktische Umsetzung erfolgt an einem AMPS für Nockenwellenverstellungssysteme.
23. Die Anwendung der Absicherungs-Algorithmen erfolgt in Gruppenarbeit.
24. Ergebnisse der Absicherungs-Algorithmen sind die Methoden der Fehlererkennung, die in das AMPS eingebaut werden müssen.
25. Als Nebenprodukt der Planung können die voraussichtlichen Kosten für die Umsetzung der Methoden der Fehlererkennung abgeschätzt werden.
26. Ein achtstündiger Probelauf stellt eine repräsentative Stichprobe zur vorläufigen Bestimmung der Systemfähigkeit dar.
27. Zur Bestimmung der Anzahl der Schlechtteile in der Menge der Gutteile müssen die Gutteile einer einmaligen zusätzlichen Kontrolle unterzogen werden.
28. Der realisierbare Verfügbarkeitsgewinn in diesem Beispiel lag bei ca. sieben Prozent bei gleichzeitiger sehr guter Qualitätsleistung.

Lebenslauf		
Persönliche Daten	<b>Anschrift:</b> Stephan Sommer Karl-Bröger-Str. 6 91074 Herzogenaurach Telefon: 09132 / 60198 E-Mail: stephan.sommer.herzo@t-online.de <b>Geburtsdatum:</b> 14.12.1967 <b>Geburtsort:</b> Gerolzhofen, Bayern	
Schul- aus- bildung	<b>Grundschule</b> 1974 – 1978 Grundschule Gerolzhofen <b>Gymnasium</b> 1978 – 1984 Gymnasium Gerolzhofen 1984 – 1987 Gymnasium Wiesentheid Abiturabschluss Mai 1987	
Wehr- dienst	Juli 1987 – September 1988 Wehrpflichtiger im Panzergrenadierbataillon Ebern	
Studium und Promo- tion	<b>1. Allgemeiner Maschinenbau an der Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt</b> <b>Zeitraum:</b> Oktober 1988 – März 1993 <b>Schwerpunkte:</b> Konstruktion, Kraftfahrzeugtechnik, Qualitätsmanagement <b>Praktika:</b> 1. Siemens AG, Würzburg, (10/89 - 3/90) 2. Siemens NAMO ltd., Ontario, Kanada, (4/91-9/91) <b>Diplomarbeit:</b> Fertigungsprozessverbesserung mithilfe der Versuchsmethodik	
	<b>2. Wirtschaftsingenieurwesen an der Technischen Universität Ilmenau</b> <b>Zeitraum:</b> April 1993 – März 1996 <b>Schwerpunkte:</b> Qualitätsmanagement, Produktionsmanagement, Controlling, Wirtschaftsrecht, Arbeitsrecht <b>Diplomarbeit:</b> Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung	
	<b>Promotion an der Technischen Universität Ilmenau</b> <b>Zeitraum:</b> Oktober 2002 bis Juni 2006 (berufsbegleitend) <b>Doktorvater:</b> Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß <b>Thema:</b> Algorithmen zur Steigerung der Qualitätsleistung und Verfügbarkeit automatisierter Montage- und Prüfsysteme	
	<b>1. AAT Systemverfahrenstechnik GmbH, Suhl, (2/96-1/97)</b> Ingenieurbüro und Unternehmensberatung: Kundenbetreuung in den Bereichen Öko-Audit und Projektplanung für F&E Vorhaben.	
	<b>2. Ledermann-Kunath &amp; Partner GmbH, Meiningen, (4/96-1/97)</b> Lehrtätigkeit als freier Mitarbeiter in der Erwachsenenbildung	
	<b>3. Dozent für Englisch an der Volkshochschule (Wintersemester 96/97)</b>	
	<b>4. INA-Schaeffler KG Herzogenaurach</b> <b>01.02.97 – 31.01.98:</b> Ingenieur in der zentralen Qualitätssicherung. Durchlauf eines einjährigen Einarbeitungsprogramms. <b>01.02.98 - 31.12.2000:</b> Aufbau des Qualitätsmanagements im Zentralbereich Entwicklung Maschinensysteme. <b>01.01.2001 bis 31.10.2005:</b> Leiter Qualitätssicherung Entwicklung Maschinensysteme <b>01.11.2005 bis heute:</b> Leiter Qualitätsmanagement und Dokumentation Entwicklung Maschinensysteme	
Berufserfahrung		

Herzogenaurach, im Juni 2006

