

Michael Steber

Prozeßoptimierter Betrieb
flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage

Michael Steber

*Prozeßoptimierter Betrieb
flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage*

Herausgegeben von

Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,

Lehrstuhl für

Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

FAPS



Meisenbach Verlag Bamberg

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	25. Juni 1997
Tag der Promotion:	13. Oktober 1997
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. G. Herold
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Steber, Michael:

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der
automatisierten Montage / Michael Steber. Hrsg. Von Klaus
Feldmann. - Bamberg : Meisenbach, 1997
(Fertigungstechnik - Erlangen ; 71)
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1997
ISBN 3-87525-096-6 ISSN 1431-6226

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 1997
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf
Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik, danke ich für die engagierte Förderung meiner Arbeit sowie für den Freiraum, den er mir zur Bearbeitung dieses praxisorientierten Aufgabenfeldes zuteil werden ließ.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm, dem Leiter des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik am Institut für Fertigungstechnik, danke ich für die Übernahme des Koreferates.

Weiterhin danke ich meinen Kollegen, ohne deren fachliche und persönliche Unterstützung eine erfolgreiche Bearbeitung dieser interdisziplinären Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Insbesondere gilt mein Dank den Mitarbeitern der Gruppe für Handhabungs- und Montagetechnik für die ständige Gesprächs- und Hilfsbereitschaft und die hervorragende Zusammenarbeit in den Jahren am Lehrstuhl sowie meinem langjährigen Kollegen Stefan Krug für seine fundierten Anregungen und den intensiven und konstruktiven Gedankenaustausch. Ferner gilt mein Dank allen Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, besonders Herrn Stefan Slama, die mich beim Erstellen dieser Arbeit unterstützt haben.

Die vorliegende Dissertation entstand auf Basis zahlreicher Kooperationsprojekte. Allen industriellen Kooperationspartnern, insbesondere den Mitarbeitern des Arbeitskreises SIS, sei hiermit herzlich gedankt.

Ein besonderer Dank gebührt jedoch meinen Eltern, die mich in meiner Arbeit bestärkt haben, und meiner Frau Petra für das nötige Verständnis und das ausgleichende Umfeld, das letztendlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Michael Steber

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage

– Inhaltsverzeichnis –

1	Einleitung	1
2	Aufbau von Schraubsystemen und Steuerung der Prozeßabläufe .	4
2.1	Analyse der Einsatzfelder für intelligente Schraubtechnik	4
2.2	Steuerung und Überwachung des Schraubvorganges	5
2.2.1	Strukturierung des Schraubablaufs und grundlegende Begriffsbestimmung	5
2.2.2	Steuerung des Prozesses durch direkte und indirekte Anzugsverfahren	7
2.2.3	Prozeßsicherheit durch Überwachung des Schraubablaufs	13
2.3	Grundsätzlicher Aufbau von Systemen zum automatisierten Verschrauben	20
2.3.1	Mechanische Grundkomponenten eines Schraubsystems	20
2.3.2	Antriebs- und Steuerungskomponenten von Schraubwerkzeugen ...	21
2.3.3	Ausprägung der Funktionalität von Steuerungen in Schraubsystemen	23
3	Definition eines Standards für Schraubersteuerungen bezüglich Funktionsumfang und Schnittstellenanbindung	28
3.1	Differenzierte Analyse der Steuerungen	28
3.1.1	Systemfunktionen einer Schraubersteuerung	28
3.1.2	Alternativen der System- und Prozeßprogrammierung	30
3.1.3	Archivierung der Prozeßdaten	30
3.1.4	Austausch von Steuersignalen	31
3.1.5	Signifikante Defizite der analysierten Schraubersteuerungen	32
3.1.6	Ziele und Einflußkriterien der Standardisierung	34

3.2	Leistungsprofil standardisierter Schraubsysteme	36
3.2.1	Klassifizierungssystematik	37
3.2.2	Spezifikation der Klassen	37
3.3	Ausprägungen der funktionalen Kriterien – Technologische Anforderungen an das Standardsystem	40
3.3.1	Anforderungen an das Steuerungssystem für handgehaltene Schraubspindeln	40
3.3.2	Auswirkungen auf automatisierte Schraubsysteme	42
3.4	Standardisierung der Datenstrecke	45
3.4.1	Vernetzte Schraubstationen	45
3.4.2	Differenzierte Betrachtung der standardisierten Schnittstellen	48
4	Adaptierbares Prozeßdatenerfassungs- und Analysesystem	51
4.1	Systembeschreibung von PRODIAG	52
4.2	Konfiguration der angeschlossenen Schraubtechnik	53
4.2.1	Alternativen der Prozeßankopplung	54
4.2.2	Datenflußkonzept	55
4.2.3	Konfiguration der Schnittstellen und Datenfilter	57
4.2.4	Parametrieren der Meßkanäle	59
4.2.5	Datensimulations- und Testschnittstelle	59
4.3	Datenerfassung und Trendanalyse der Prozeßdaten	60
4.3.1	Statistische Prozeßregelung in der Schraubtechnik	60
4.3.2	Elektronische Qualitätsregelkarte in PRODIAG	61
4.4	Langzeitauswertung und Datenpflege	62
4.4.1	Seriendatenauswertung und Schraubverlaufskurven	63
4.4.2	Kenndatenberechnung	64

5	Aufbau von Regelkreisstrukturen für das automatisierte Verschrauben	66
5.1	Prozeßnahe und bereichsübergreifende Regelkeise	66
5.2	Prozeß- und Systemanalyse	68
5.2.1	Interne und externe Störungseinflüsse bei der Schraubmontage	68
5.2.2	Akquisition und Repräsentation von typischen Verschraubungsfehlern am Beispiel der Endmontage von Automobilen	70
5.3	Erfassung der Prozeßwerte und Peripheriesignale	72
5.4	Aufbau eines Diagnosesystems zur Analyse von Verschraubungsfehlern	72
5.5	Alternative Analysestrukturen zur Ermittlung von Verschraubungsfehlern auf Prozeßebene	76
5.5.1	Punktuelle Verfahren zur Schraubfehleranalyse	77
5.5.2	Bereichs- und Verlauforientierte Verfahren	82
5.6	Eignung der Analysestrukturen für die Schraubfehlerdiagnose	88
5.7	Ableitung von Fehlerreaktionen in Abhängigkeit vom eingesetzten Schraubsystem	92
5.8	Realisierung eines rechnergestützten Schraubprozeßregelkreises	97
6	System zur Steuerung von automatisierten, flexiblen Schraubzellen	101
6.1	Untergliederung der Schraubaufgabe in Teilprozesse	102
6.2	Systemkonzept zur Steuerung einer flexiblen Schraubzelle	103
6.2.1	Funktionshierarchien des Softwaresystems	103
6.2.2	Universelles Konzept eines rechnergestützten Steuerungssystems	103
6.3	Hardwarekomponenten zur Systemintegration auf Prozeßebene	106
6.3.1	Flexible Montagezelle für die Schraubmontage	106
6.3.2	Unterlagerte Prozeßsteuerung auf Basis des VME-Bus	109
6.4	Systemstart und Auswahl der Betriebsart	111
6.5	Inbetriebnahme des Handhabungsgerätes	113
6.6	Handbetrieb der Montagezelle	113

6.7	Programmierung der Handhabungssysteme	113
6.7.1	Entwickelter Befehlssatz für Positioniersteuerung	116
6.7.2	Teachen von Verfahrenprogrammen	122
6.8	Programmierung der Schraubsteuerung	124
6.9	Generieren von Montageabläufen	125
6.10	Automatikbetrieb	127
7	CAD/CAM-Prozeßkette für die automatisierte Schraubmontage ...	130
7.1	Anforderungen an das CAD/CAM-Konzept	130
7.2	Struktur des Konstruktionssystems mfk	131
7.2.1	Grundkonzept	132
7.2.2	Erzeugen von Schraubverbindungen	137
7.3	Kopplung von Konstruktionssystem und Planungssystem	139
7.4	Rechnergestützte Hilfsmittel für die Technologieplanung	140
7.4.1	Generierung von Verfahrenprogrammen für automatisierte Systeme	142
7.4.2	Prozeßoptimierende und -absichernde Maßnahmen	145
8	Zusammenfassung	148
	Literatur	150

1 Einleitung

Der Erfolg eines Unternehmens, sich gegenüber der Konkurrenz zu behaupten, ist durch die drei entscheidenden Wettbewerbsfaktoren Kosten, Zeit und Qualität geprägt [96]. Ein zeitlicher Vorsprung vor den Mitbewerbern auf dem Absatzmarkt bei gleichzeitig qualitativ hochwertigen Produkten sichert dem Anbieter wichtige Marktanteile [61]. Im Zusammenhang mit der Verkürzung der Durchlaufzeit gewinnt die Montage, und damit die Schraubtechnik als häufigste Verbindungstechnik, als Rationalisierungspotential zunehmend an Bedeutung [5].

Vergleicht man verschiedene Montagetechnologien, so sind Verschraubungen in der Montage nicht zuletzt aufgrund ihrer vielfältigen Einsatzmöglichkeiten weit verbreitet [29]. Dies bestätigt eine Umfrage in der Schlüsselbranche 'Automobilindustrie' mit ihrem sehr hohen Anteil an Montagetätigkeiten. Die herausragende Eigenschaft der Schraubverbindung ist die einfache und zerstörungsfreie Lösbarkeit. Gerade im Zeitalter des Produktrecycling und der Wiederverwertung von Rohstoffen gewinnt die Demontierbarkeit von Produkten, die sich aus unterschiedlichen Materialien zusammensetzen, an Bedeutung [115]. Auch das Auswechseln verschleißbehafteter Bestandteile eines Produktes macht sogenannte lösbare Verbindungen erforderlich. Überall da, wo qualitativ hochwertige und lösbare Verbindungen gefordert werden, ist die Schraubtechnik nach wie vor die bevorzugteste Fügetechnik [17]. In einer Umfrage bei Anwendern zeichnet sich für die Technologie 'Schrauben' sogar eine noch steigende Tendenz ab [16], [60].

Der Nachteil der Schraubverbindung ist der kostenintensive Montagevorgang. Wegen dieser hohen Kosten wird oftmals versucht, dieses Fügeverfahren durch andere Verbindungstechniken wie z. B. Kleben oder Klipsen zu ersetzen. Da diese Verbindungen nur für einfache Aufgaben anwendbar sind, werden hochbelastete und sicherheitskritische Verbindungen weiterhin geschraubt [39].

Auf dem Gebiet der Schraubmontage bietet sich daher die Chance, durch gezielte Innovationen Vorteile in Bezug auf Zeit und Qualität zu erzielen und dabei auch die Montagekosten zu reduzieren. Gerade die Montage mit ihrem hohen Planungsaufwand für spezialisierte Montageanlagen, dem immer noch relativ niedrigen Automatisierungsgrad und der wirtschaftlich besonders relevanten Position als letztes Glied der Wertschöpfungskette, ist ein prädestinierter Bereich für die Optimierung der Produktionsabläufe. Ziel muß es daher sein, nicht nur prozeßnahe Potentiale auszuschöpfen, sondern auch die planenden Bereiche in eine Systemoptimierung mit einzubeziehen

Vor allem im Bereich von sicherheitstechnischen Verschraubungen spielt die Prozeßqualität eine wesentliche Rolle. Grundlage für die Verbesserung der Schraubqualität ist die Erkennung von Schraubfehlern und die gezielte Analyse der Ursachen dieser Fehler. Dazu wird eine eingehende Untersuchung von Schraubdaten aus der laufenden Montage eines Automobilwerks durchgeführt. Die typischen Schraubfehler werden klassifiziert und im Hinblick auf die Ursache analysiert.

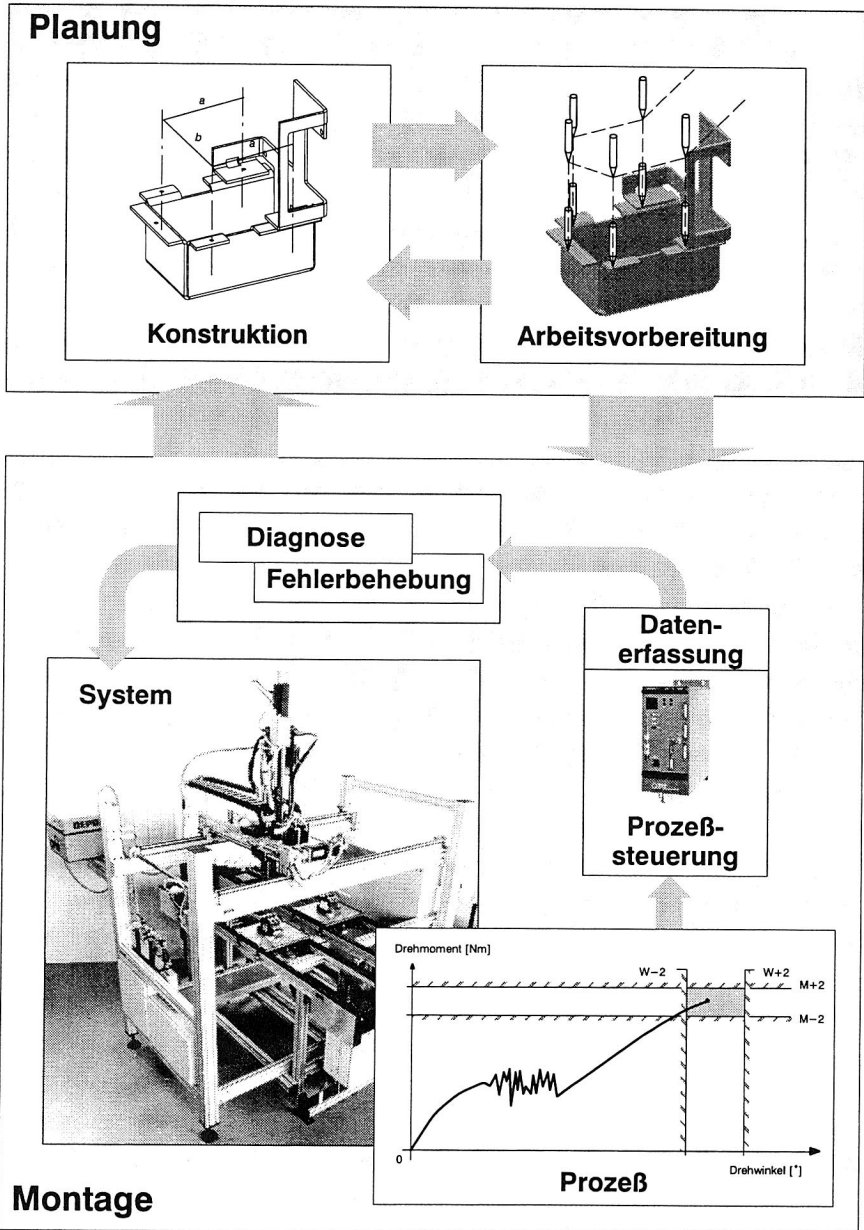


Bild 1-1: Kernaufgaben zur Umsetzung des prozeßoptimierten Betriebs flexibler Schraubstationen in der Montageautomatisierung

Ausgehend von diesen Ergebnissen wird ein Konzept für ein Online-Diagnosesystem zur Schraubfehlererkennung erarbeitet. Das Diagnosesystem bildet damit den integralen Bestandteil eines rechnergestützten Steuerungssystems für eine hochautomatisierte, flexible Schraubstation.

Trotz Ansätzen zur Flexibilisierung in der Schraubtechnik, werden bisher bei der automatisierten Schraubmontage hauptsächlich starre Montagestationen eingesetzt, die nahezu keine Varianten- und Nachfolgeflexibilität ermöglichen. Bei der Automatisierung des Schraubprozesses ist es jedoch notwendig, die Prozeßparameter beim Zusammensetzen unterschiedlicher Produktkomponenten variabel und beeinflussbar zu halten, um so eine rasche Umstellung auf die Fertigung von neuen Produkten zu ermöglichen.

Um flexibel auf die von der Prozeßkontrolle erkannten Störungen reagieren zu können, wird ein fertigungsnaher Prozeßregelkreis realisiert. Hierüber werden automatische Entstöungsstrategien angestoßen bzw. dem Anlagenbediener gezielt Information über Fehlerquelle und -beseitigung bereitgestellt, falls keine automatische Fehlerbehebung erfolgen kann [21]. Außerdem werden Anlagenstörungen durch präventive Eingriffe reduziert. Dies alles führt letztendlich aufgrund der erhöhten Ausbringung des Montage-systems zu einer Reduktion von Montagekosten.

Zur Steuerung einer flexiblen Schraubstation wird ein offenes Steuerungskonzept entwickelt. Dieses ermöglicht eine einfache Anbindung der Prozeßebene an die planenden Bereiche und unterstützt hierdurch den Aufbau einer durchgängigen rechnergestützten Verfahrenskette für die Montagetechnologie Schrauben. Bereits bei der Produktkonstruktion stehen die für die Montage notwendigen Geometrieinformationen zur Verfügung. Auch Technologieparameter, wie z. B. Drehmoment und Nachspannwinkel für die jeweilige Schraubstelle, werden bereits vom Konstrukteur festgelegt. Nach Beendigung der Produktkonstruktion wird aus den Modelldaten über einen Programmgenerator ein bezüglich der Abarbeitungsreihenfolge optimiertes Verfahsprogramm für das Handhabungssystem der Montagezelle erzeugt. Erst die nach kinematischen und technologischen Kriterien optimierten Programme werden an die Prozeßebene übertragen. Durch die realisierte Planungsmethode lassen sich die Planungs- und Inbetriebnahmezeiten verkürzen.

2 *Aufbau von Schraubsystemen und Steuerung der Prozeßabläufe*

In diesem Kapitel soll ein Überblick über den derzeitigen Stand der Schraubtechnik sowie deren zukünftigen Entwicklungstrends gegeben werden. Im Mittelpunkt steht dabei die Prozeßsteuerung, die letztendlich die Zielgröße des Verschraubungsvorgangs – die tatsächlich erreichte Vorspannkraft der Schraube – direkt beeinflusst.

2.1 *Analyse der Einsatzfelder für intelligente Schraubtechnik*

Die in der Einleitung aufgezeigte Notwendigkeit, die Qualitätssicherung besonders auch auf die Schraubtechnik auszudehnen, muß aufgrund des daraus resultierenden Montageaufwandes differenziert betrachtet werden. Nicht für jede Schraubstelle ist es aus wirtschaftlichen und Produkt- sowie die Prozeßqualität betreffenden Gesichtspunkten sinnvoll, eine mit großem Aufwand verbundene hochgenaue Verschraubung zu erstellen. Der Aufwand für Konstruktion und Labortests sowie die Auswahl der geeigneten Schraubverfahren und Qualitätssicherungsmaßnahmen für die eigentliche Montage muß vielmehr in Abhängigkeit vom Anwendungsfall gesehen werden. Sehr deutlich läßt sich dies am Beispiel der Fahrzeugmontage zeigen. Die folgenden Risikoklassen werden in der Automobilindustrie unterschieden [121]:

- sicherheitskritisch,
- funktionsrelevant,
- untergeordnet.

Zu den sicherheitskritischen Verschraubungen zählen alle, deren Versagen mittelbare oder unmittelbare Gefahr für die Gesundheit oder das Leben von Personen bedeutet. Etwa 10 % der Verschraubungen am Fahrzeug gelten als sicherheitskritisch [97]. Diese Kategorie unterteilt man weiter in solche mit aktiver und solche mit passiver Sicherheitsrelevanz. Zu den aktiv sicherheitsrelevanten Verschraubungen zählen beispielsweise Fügstellen an Bremsen und Lenkung. Ein Versagen dieser Schraubstellen führt unmittelbar zu einem Unfall. Eine Verschraubung des Sicherheitsgurts läßt sich dagegen zu den passiv sicherheitsrelevanten rechnen; diese dürfen bei einem Unfall nicht versagen. Die Dokumentation von Verschraubungen betrifft im wesentlichen die Kategorie der sicherheitsrelevanten Schraubstellen.

Die zweite Gruppe der 'kritischen' Verschraubungen muß die Funktionserfüllung von Baugruppen oder Gesamtsystemen gewährleisten. Dazu zählen z. B. die Verschraubungen von Türen und Klappen eines Fahrzeugs. Die untergeordneten Schraubfälle betreffen einfache technische Einrichtungen, die Einfluß auf die Optik oder Akustik des Fahrzeugs haben. Hierzu gehören beispielsweise die Verschraubungen von Zier- und Verkleidungsteilen.

Vergleicht man die drei Anwendungsfälle hinsichtlich Qualitätsabsicherung und Optimierung der Schraubprozesse, so werden künftig insbesondere die sicherheits- und

funktionsrelevanten Verschraubungen durch intelligente Schraubtechnik montiert werden müssen. Allerdings ist es hierzu notwendig, die bestehenden Systeme und Technologien gezielt weiter zu entwickeln (siehe hierzu Kap. 3.2).

2.2 Steuerung und Überwachung des Schraubvorganges

Im Bereich der automatisierten Schraubtechnik sind bisher keine allgemeingültigen oder gar genormten Begriffsdefinitionen festgelegt. In diesem Kapitel sind schraubtechnische Grundlagen zusammengestellt, die für das weitere Verständnis der Arbeit notwendig sind. Hierbei fließen insbesondere die Ergebnisse eines Arbeitskreises [104] mit ein, der sich u. a. die Standardisierung von schraubtechnischen Begriffen, die in eine entsprechende DIN-Norm eingearbeitet werden sollen, zum Ziel gesetzt hat.

2.2.1 Strukturierung des Schraubablaufs und grundlegende Begriffsbestimmung

Zur Steuerung sowie zur detaillierten Beurteilung und Veranschaulichung eines kompletten Schraubablaufs – vom Startsignal an den Schraubkanal bis zur Meldung 'Schrauber wieder startbereit' – ist es notwendig, den Gesamt Ablauf in Teilabschnitte zu untergliedern. Bild 2-1 zeigt ein schematisches Beispiel für eine Schraubverlaufskurve mit den zugehörigen Parametern [78]. Zur logischen Untergliederung des gesamten Schraubablaufs unterscheidet man die Schraubphasen

- Finden,
- Einschrauben,
- Festschrauben,
- Lösen und
- Hilfsstufe.

Kleinste Einheit bildet die Schraubstufe, die durch ein Schraubverfahren oder ein Hilfsverfahren beschrieben wird. Das Schraubverfahren einer Stufe ist gekennzeichnet durch mindestens eine Zielfunktion und deren Überwachungsfunktion/en. Hierdurch soll ein Finden, Einschrauben, Festschrauben oder auch Lösen des Schraubverbundes realisiert werden. Den einzelnen Funktionen sind entsprechende Parameter zugewiesen. Dagegen sind einem Hilfsverfahren alle Funktionen zugeordnet, die nicht unmittelbar zum Schraubverfahren gehören. Hierzu zählt beispielsweise die Wartezeit. Zudem treten systembedingte Zeiten durch Aktionen auf, die für den Schraubablauf notwendig sind, aber nicht durch Schraubstufen definiert werden können, wie z. B. Systemtest, Datenübertragung oder grafische Ausgabe.

Als Zielfunktion bezeichnet man die innerhalb einer Schraubstufe relevante Steuerungsfunktion. Sie ist gekennzeichnet durch den signifikanten Zielparameter (Bild 2-2). Wird dieser erreicht, so führt dies zum Beenden der Schraubstufe. Einer Zielfunktion kann eine beliebige Anzahl von Überwachungsfunktionen zugeordnet sein. Allerdings führt

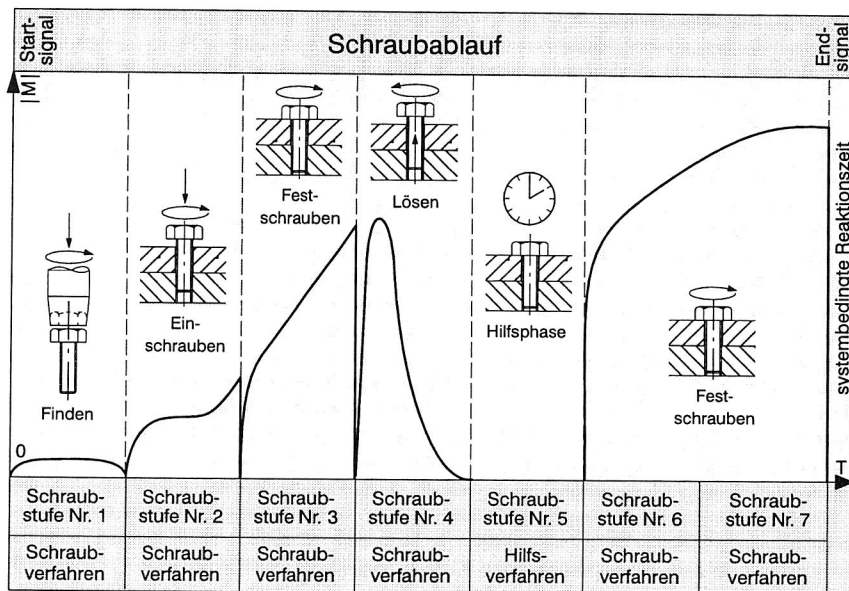


Bild 2-1: Schematische Darstellung eines mehrstufigen Schraubablaufs mit Momentenerfassung und dessen Unterteilung in Schraubphase und -stufe

ein Überschreiten eines Überwachungsparameters nicht unbedingt zum Abbruch des Schraubablaufs. Neben den Ziel- und Überwachungsparametern unterscheidet man noch Systemparameter (z. B. Kalibrierungsfaktor) und Zusatzparameter (z. B. Schwellmoment, Sollmoment, Solldrehzahl).

Im Bild 2-1 sind eine Einschraub-, zwei Festschraub- und eine Lösephase dargestellt. Dem eigentlichen Schraubprozeß vorgelagert ist die Findephase, in der der Abtrieb des Schraubwerkzeugs in den Schraubenkopf greift. In der Einschraubphase wird die Schraube bis zur Kopfanlage gebracht. Dieser Punkt des Ablaufs ist durch den Zielparame-ter der zweiten Stufe, dem Abschaltmoment M_P , definiert. In der sich anschließenden ersten Festschraubphase wird die Verbindung bis zu einem definierten Abschalt- punkt festgezogen. Dies geschieht mit verringerter Geschwindigkeit, um die Einflüsse durch die Massenträgheit der Schraubspindeln möglichst gering zu halten. Um beim Endanzug konstante Reibungsverhältnisse zu erreichen wird der Schraubenverbund noch- mals gelöst. Zur Synchronisation von mehrspindeligen Schraubsystemen kann es er- forderlich sein, eine Hilfsstufe in den Schraubablauf zu integrieren, bevor der eigentliche Endanzug gestartet wird. Da sich innerhalb einer Stufe keine Sollparameter verändern dürfen, ist es bei der dargestellten Ablaufstruktur erforderlich, die zweite Festschraub- phase in zwei Stufen zu unterteilen.

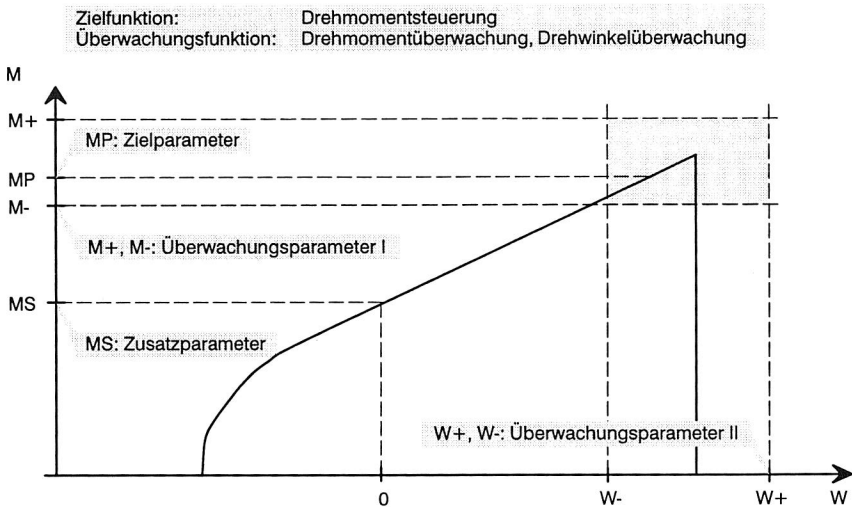


Bild 2-2: Definierte Parameter am Beispiel eines drehmomentgesteuerten Schraubverfahrens

Bei der Analyse der Anzugsverfahren ist eine klare Unterscheidung der Begriffe **Steuerung** und **Überwachung** wichtig (Bild 2-2). Die Steuerung respektive Regelung des Prozesses ist ein aktiver und dynamischer Vorgang. Die Stellgröße wird während des Schraubvorgangs erfaßt und in den Prozeßregelkreis zurückgeführt. Sobald der Sollwert erreicht ist, löst die Steuerung die Abschaltung der Prozeßstufe aus.

Zusätzlich kann der Schraubvorgang zur Absicherung des Prozesses passiv überwacht werden. Hierbei werden die Werte der Überwachungsgröße (z. B. Weiterdrehwinkel) während des Verschraubungsvorgangs aufgenommen. Die detaillierte Auswertung erfolgt aber in der Regel erst nach Beendigung der Verschraubung oder einer Schraubstufe; es wird überprüft, ob der Überwachungsparameter innerhalb bestimmter vorgegebener Grenzen liegt. Hält der gemessene Wert die vorgeschriebenen Toleranzen ein, wird die Verschraubung als 'in Ordnung' (IO) freigegeben, andernfalls wird sie mit 'nicht in Ordnung' (NIO) bewertet.

2.2.2 Steuerung des Prozesses durch direkte und indirekte Anzugsverfahren

Zur Aufbringung der Klemmkraft auf den Schraubenverbund werden Verfahren mit direkter und indirekter Vorspannkraftmessung eingesetzt (Bild 2-3). Die direkten Meßmethoden nutzen die Vorspannkraft selbst als Prozeßgröße aus. Hierzu zählen die Kraftmeßring-Methode [7], das hydraulische Anziehen [133] und das Verfahren, das mit Hilfe

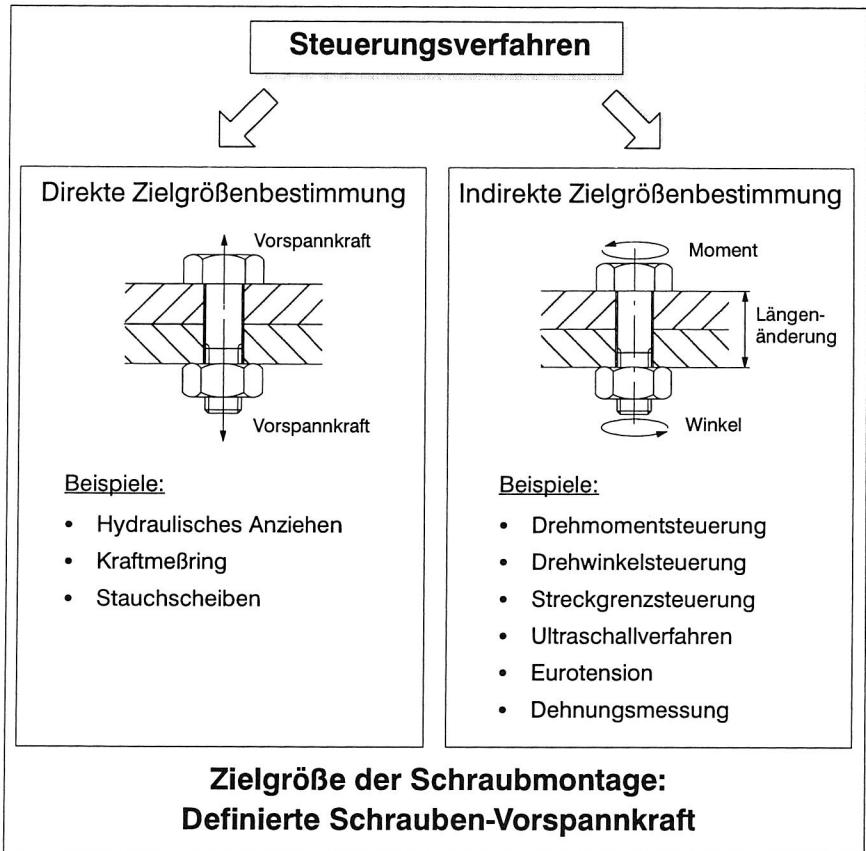


Bild 2-3: Systematik der Steuerungsverfahren beim Verschrauben in Abhängigkeit der direkten und indirekten Vorspannkraftmessung

von Stauchscheiben die Vorspannkraft bestimmt [7]. Der Vorteil dieser drei Verfahren liegt in der sehr hohen Genauigkeit der Klemmkraftbestimmung. Gleichzeitig sind diese aber so aufwendig, daß sie für den Mittel- und Großserieneinsatz nicht oder nur bedingt geeignet sind.

Da sich die Vorspannkraft nur mit großem Aufwand direkt messen läßt, haben sich eine Reihe von Verfahren durchgesetzt, die verschiedene Hilfsgrößen zur indirekten Bestimmung der Montagevorspannkraft heranziehen (Bild 2-3). Die wichtigsten Größen sind:

- Drehmoment,
- Drehwinkel,
- Streckgrenze,
- Längenänderung,
- Einschraubzeit,
- Einschraubtiefe und
- Motorstromaufnahme.

Jedes auf die einzelnen Hilfsgrößen aufbauende Steuerungsverfahren ermöglicht, bedingt durch sein Meßprinzip und seine besonderen Eigenschaften, eine bestimmte Genauigkeit hinsichtlich des Verschraubungsergebnisses und damit der Zielgröße Vorspannkraft. Nicht jede Steuerungsfunktion ist in allen Schraubphasen einsetzbar. Das Bild 2-4 zeigt eine systematische Zusammenstellung der gängigen Zielfunktionen bezogen auf die jeweilige Verschraubungsphase. In der Festschraubphase sind das drehmoment- und das drehwinkelgesteuerte Verfahren zur Zeit die für die Serienproduktion praktisch einzig relevanten. Wie bei einer durch den Verfasser durchgeführten Analyse festgestellt wurde, erfolgen beispielsweise in der Kraftfahrzeugindustrie weit über 80% der hochfesten Verschraubungen drehmomentgesteuert. Weniger als 15% werden nach dem Verfahren der Drehwinkelsteuerung angezogen. Und nur bei 1% wird die Streckgrenze als Steuerungsgröße herangezogen. Die übrigen Verfahren sind in der derzeitigen Form für einen großangelegten Einsatz in der Serie eher unbedeutend. Dieses Ergebnis wird auch von [129] bestätigt.

Im folgenden werden die wichtigsten indirekten Steuerungsverfahren für die Festschraubphase sowie deren Einsatzbereiche spezifiziert. Außerdem werden einige zukunftsweisende bzw. neue Technologien kurz erläutert.

Das vom Werkzeug auf die Schraube oder Mutter aufgebrachte Drehmoment ist die am einfachsten und damit am kostengünstigsten meßbare Größe beim Schraubvorgang. Deshalb wird das **drehmomentgesteuerte** Anziehen vor allem wegen seiner Wirtschaftlichkeit in den weitaus meisten Anwendungsfällen zur Prozeßführung eingesetzt. Allerdings ist die Drehmomentsteuerung diejenige mit den ungenauesten Prozeßergebnissen [7].

Bei der Drehmomentsteuerung wird die Schraubstufe bei Erreichen eines voreingestellten Drehmoments beendet. Die Abschaltung erfolgt je nach Antriebs- und Steuerungsprinzip des eingesetzten Werkzeugs elektrisch bzw. elektronisch oder bei einfachen Schraubspindeln rein mechanisch.

Die Abweichungen der erreichten Vorspannkraft vom Sollwert können sehr groß sein. Das ist zum einen durch den großen Einfluß der Reibung bedingt, zum anderen unterliegt die Abschaltgenauigkeit bei dem geforderten Sollmoment ebenfalls einer gewissen Streuung. Für das Zielmoment sollte deshalb ein Toleranzfenster angegeben werden, innerhalb dessen der gemessene Spitzenwert der Drehmomentkurve liegen soll (s. a. Kap. 2.2.3).

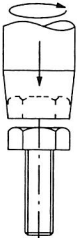
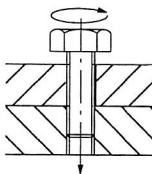
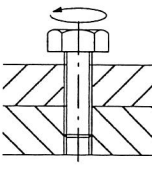
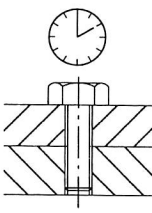
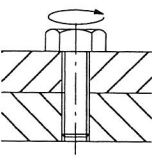
Zielfunktionen für die Schraubphasen				
				
Drehmoment Drehwinkel Signal Zeit	Drehmoment Drehwinkel Längung Signal Fügegradient	Drehmoment Drehwinkel Signal Zeit	Zeit Signal	Drehmoment Drehwinkel Längung Streckgrenze Vorspannkraft
Finden	Einschrauben	Lösen	Hilfsstufe	Festschrauben

Bild 2-4: Systematische Zuordnung der Zielfunktionen in Abhängigkeit von der Schraubphase

Eine Erweiterung des drehmomentgesteuerten Anziehens ist das Pulsen. Dabei wird die Schraube zunächst wie oben beschrieben auf ein bestimmtes Drehmoment angezogen. Nach beendeter Festschraubphase wird die Verschraubung mehrmals in kurzen Pulsen mit einem Drehmoment beaufschlagt. Dieses Verfahren soll das Setzen bei weichen z. B. aus mehreren Lagen von Blechteilen bestehenden Schraubstellen vermindern.

Das momentengesteuerte Verfahren zum Anziehen von Schrauben kommt in der Automobilindustrie bei vielen sicherheits- und funktionsrelevanten Verschraubungen zum Einsatz. Gegenwärtig gilt die Überprüfung des Anziehmomentes mittels eines Drehmomentschlüssels als sichere Maßnahme zur Gewährleistung der Qualität einer Verschraubung. Da dieses Werkzeug nach dem Prinzip der reinen Drehmomentsteuerung - mit allen Unzulänglichkeiten - arbeitet, kann dies zumindest für kritische Verschraubungen nicht die Lösung sein [8].

Eine weniger aufwendige und vor allem preisgünstige Alternative zur Steuerung des Schraubvorgangs ist das **stromgesteuerte** Anzugsverfahren. Bei den EC-Motoren ist es möglich, den drehmomentproportionalen Strom als Meß- und Steuergröße heranzuziehen. Hierdurch verringern sich die Kosten für die Sensortechnik und die Signalverarbeitung in der Steuerung erheblich. Allerdings ist bei diesem Steuerungsverfahren eine

rückführbare Kalibrierung auf ein Normal nicht möglich, da die Zielgröße Drehmoment über die indirekte Steuergröße Motorstrom gesteuert wird.

Beim **drehwinkelgesteuerten** Anziehverfahren wird die Schraube zunächst momentengesteuert bis zu einem Schwellmoment angezogen. Von hier ab startet die Winkelzählung und die Schraube wird winkelgesteuert um einen festgelegten Sollwinkel weitergedreht. Die endgültige Abschaltung erfolgt bei Erreichen des Solldrehwinkels.

Der Einfluß der Reibung ist bei dieser Steuerungstechnik geringer als beim drehmomentgesteuerten Verfahren. Das Weiterdrehen um einen vorgegebenen Winkel erzeugt eine berechen- und reproduzierbare Verlängerung der Schraube; diese läßt sich in eine definierte Spannung im Schraubenbolzen umrechnen und man erhält damit eine relativ genaue Klemmkraftbestimmung. Die geringe Restabhängigkeit von der Reibung bleibt durch die Drehmomentabhängigkeit des Triggerpunktes für die Winkelzählung [39] bestehen.

Mit Hilfe des drehwinkelgesteuerten Verfahrens werden Schrauben in der Regel bis in den Streckgrenzbereich oder sogar bis in den plastischen Verformungsbereich angezogen. Dadurch ergibt sich eine zusätzliche Verbesserung der Genauigkeit des Verfahrens, da sich die Schraubverlaufskurve im plastischen Bereich einer horizontalen Tangente annähert. Abweichungen des tatsächlich erreichten Drehwinkels vom Sollwert wirken sich nur noch gering auf die Vorspannkraft aus. Neben der besseren Genauigkeit aufgrund der größeren Unempfindlichkeit gegen Reibungseinflüsse spricht für dieses Verfahren außerdem eine bessere Werkstoffausnutzung durch den Anzug der Schrauben bis in den plastischen Bereich.

Der Nachteil dieses Verfahrens ist im hohen Aufwand zur Bestimmung des Drehmomentanstiegs sowie der Streckgrenze und damit letztlich des erforderlichen Anzugswinkels zu sehen. Eingesetzt wird dieses Verfahren beispielsweise für die Verschraubung von dynamisch hochbelasteten Verbindungen (z. B. Verschraubung der Kurbelwelle) [79].

Das **streckgrenzgesteuerte** Verfahren ist gewissermaßen eine Kombination aus den beiden vorhergehenden. Während des Festziehens der Schraube wird ständig der Differenzquotient aus Drehmoment und Drehwinkel rechnerisch ermittelt. Der Anstieg des Anzugsmomentes je Winkleinheit ist konstant, solange die Schraube elastisch gedehnt wird. Wird die Streckgrenze des Schraubenwerkstoffes überschritten, die Schraube also plastisch gedehnt, so flacht der Momentenanstieg bezogen auf den Drehwinkel ab. Steuerungsintern wird dieser Effekt zur Schaltsteuerung genutzt. Bei diesem Verfahren wird im Gegensatz zum Drehwinkel-Verfahren nur bis an den Rand des plastischen Bereichs angezogen.

Für die Streckgrenzsteuerung ist ein hoher Meß- und Elektronikaufwand erforderlich. Der Vorteil bei diesem Verfahren ist die höhere Genauigkeit in Bezug auf die Zielgröße Vorspannkraft, sowie die bessere Ausnutzung des Werkstoffpotentials. Typischerweise findet das streckgrenzgesteuerte Verfahren in der Automobilindustrie seinen Einsatz bei der Verschraubung von Zylinderköpfen [39], [88].

In [122] wird ein Verfahren zum **divergenzgesteuerten** Anzug von Schraubenverbindungen beschrieben. Auch hierbei wird das Drehmoment als Funktion des Drehwinkels während des Schraubvorgangs aufgezeichnet. Die Lineardivergenz [122] ist die Differenz aus dem Formänderungs- und dem Ergänzungsintegral. Diese zeigt das charakteristische Verhalten negativer Werte in der Einschraubphase, Null im linearen Bereich und positiver Werte im nichtlinaren Bereich. Aufgrund der mathematischen Definition dieser Größe als Differenz zweier Integrale zeigt dieses Verfahren sehr große Unempfindlichkeit gegenüber oszillierenden Drehmomentwerten auf. Dabei sind von der Steuerung keine höheren Rechenleistungen zu verlangen, so daß das Verfahren ausreichend schnell arbeitet. Im Vergleich mit der Streckgrenzsteuerung zeigt dieses Verfahren wesentlich weniger Fehlabschaltungen, die durch stark wechselnde Meßwerte verursacht werden. Eine Anwendung in einer Schraubanlage oder gar in der Serienproduktion ist bei [122] nicht beschrieben.

Zu den eher aufwendigen Verfahren zur Steuerung einer Verschraubung zählt die **Dehnungsmessung** bei der die Schraube mit einer Bohrung versehen wird. Über eine Meßuhr mit Stift wird die Schraubendehnung exakt gemessen und mittels Werkstoffkennwerten direkt in die Vorspannkraft umgerechnet [7]. Für die Serienproduktion hat dieses Verfahren praktisch keine Bedeutung.

Das **Ultraschallverfahren** arbeitet nach dem Echolot Prinzip. Ein von einem piezoelektrischen Impulsgeber erzeugter und in die Schraube eingekoppelter Ultraschallimpuls liefert über die Änderung seiner Laufzeit im Medium eine Aussage über den Spannungszustand des Schraubenbolzens (Bild 2-5). Für die Laufzeitänderung sind die Längung der Schraube und der sog. akustoelastische Effekt verantwortlich. Dieser Effekt beschreibt den Einfluß des in der Schraube herrschenden uniaxialen Spannungszustands auf die Schallgeschwindigkeit. Vorgespannte Schrauben erlauben eine geringere Schallgeschwindigkeit für longitudinale Schallwellen. Die Messung kann durch aufsetzbare Ultraschallprüfköpfe oder durch Sensorschichten, die bleibend auf jede Schraube aufgebracht sind, vorgenommen werden. Für den Einsatz von Prüfköpfen ist ein Koppelmedium erforderlich. Das kombinierte Verfahren mit einer longitudinalen und einer transversalen Schwingung ermöglicht es, den Spannungszustand der Schraube ohne eine Referenzmessung zu ermitteln. Auch die spätere Ermittlung der Vorspannkraft im Betrieb des Bauteils ist möglich. Der Temperatureinfluß kann bei der Ultraschallmessung aufgrund seiner Linearität rechnerisch eliminiert werden [123].

Dieses Verfahren, für das eine erreichbare Genauigkeit von $\pm 5\%$ (im 3σ -Bereich) bzgl. der Vorspannkraft angegeben wird, wird bisher nur in Meßgeräten angewandt und ist für den Einsatz in Schraubanlagen in Vorbereitung. Der für die Serienproduktion zu große Aufwand hat die Anwendung dieses Verfahrens in größerem Umfang bisher verhindert [10]. Der Industrieinsatz verzögert sich zuletzt deshalb, da bis dato kein Schraubenhersteller gefunden werden konnte, der bereit ist, die hohen Investitionen zu tragen, die für eine großtechnische Anlage zum Aufdampfen der Sensorbeschichtung auf den Schraubenkopf erforderlich sind [7], [51].

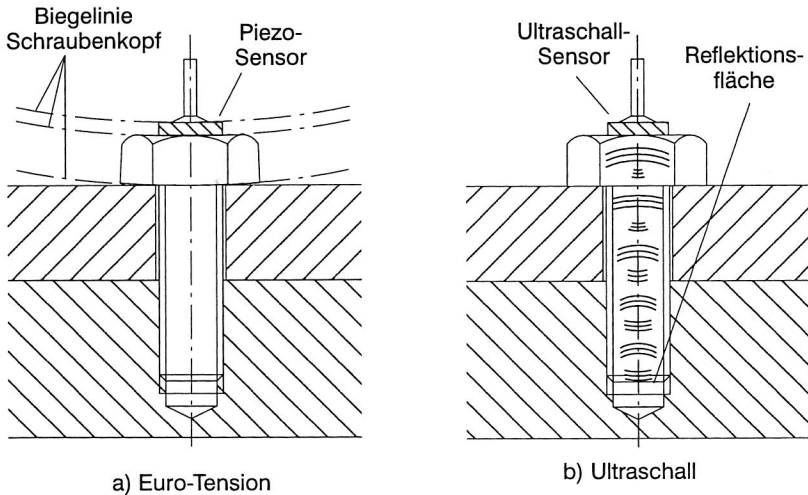


Bild 2-5: Steuerungsverfahren mittels Dehnungsmessung durch Ultraschalllaufzeitanalyse bzw. Messung der Durchbiegung des Schraubenkopfes

Die französische Firma Georg Renault hat sich ein Verfahren zur Klemmkraftbestimmung patentieren lassen, das sich **Eurotension** nennt. Das zugrunde liegende Meßprinzip nutzt die durch die Vorspannkraft hervorgerufene Durchbiegung des Schraubenkopfes aus. Ein in den Schraubenkopf eingearbeiteter Piezowiderstand, der in einem Keramikgehäuse sitzt, ändert seinen elektrischen Widerstandswert, der durch die Verformung des Schraubenkopfes hervorgerufen wird (Bild 2-5). Obwohl der Kopf einer Schraube nur eine sehr kleine Verformung im μ -Bereich erfährt, wird ein maximaler Fehler von 8 % der Anzugsspannung garantiert. Da es sich um ein sehr neues Verfahren handelt, ist ein Einsatz außerhalb des Labors bisher noch nicht beschrieben [80]. Auch bei diesem Verfahren dürfte die großtechnische Herstellung der Spezialschrauben zu Problemen führen.

2.2.3 Prozeßsicherheit durch Überwachung des Schraubablaufs

Wie in Kapitel 2.2.2 aufgezeigt, muß eine Überwachungsfunktion immer in Kombination mit der zugehörigen Steuerungsfunktion betrachtet werden. Zur Realisierung der Überwachungsfunktionen können prinzipiell die Haupt- aber auch zusätzliche Kontrollgrößen des Schraubvorgangs, wie z. B. Einschraubtiefe, Stromaufnahme des Antriebs oder die Einschraubzeit, genutzt werden. Bild 2-6 zeigt die systematische Zuordnung der möglichen Überwachungsfunktionen zu den einzelnen Schraubphasen. Durch einen gezielten Einsatz der Überwachungsverfahren kann der Verlauf der Verschraubung in den einzelnen Schraubphasen kontrolliert werden. Die wichtigsten Methoden werden

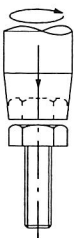
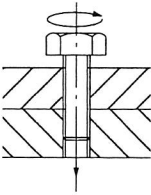
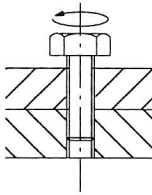
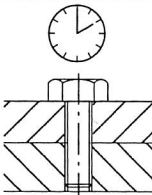
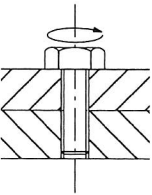
Überwachungsfunktionen für die Schraubphasen				
				
Drehmoment Drehwinkel	Drehmoment Drehwinkel Zeit Signal Einschraubkanal Rückblendung Mismatch Stick-Slip (Motorstrom)	Drehmoment Drehwinkel Zeit Signal Tor (Motorstrom)	Zeit	Drehmoment Drehwinkel Zeit Streckgrenzpunkt Anstieg Gradientenverl. Stick-Slip (Motorstrom)
Finden	Einschrauben	Lösen	Hilfsstufe	Festschrauben

Bild 2-6: Strukturierung der Überwachungsfunktionen in Abhängigkeit von der Schraubphase

im folgenden anhand eines grundlegenden Modells eines Schraubablaufs detailliert erläutert.

Findephase und Einschraubphase

Beim Positionieren von Schraube und Bauteil zueinander und beim Einkuppeln des Schraubwerkzeuges auf den Schraubenkopf können sogenannte Findefehler auftreten. Fehlende Schraubelemente, fehlende Gewinde oder der Leerlauf des Schraubwerkzeugs erzeugen ebenso wie diese Findefehler leicht oszillierende Schraubverläufe bei gleichzeitig niedrigem Drehmoment. Beschädigte oder durch Rückstände verunreinigte Bauteil- oder Schraubengewinde führen dagegen ebenso wie die klassischen "Gewindefresser" zu oszillierenden, stark ansteigenden Kurvenverläufen. Einen noch

extremem Anstieg weist die Schraubverlaufskurve auf, wenn bereits angezogene Schrauben nochmals verschraubt werden.

Für die Erkennung der oben genannten Fehler, insbesondere Gewindebeschädigungen, eignet sich die **Einschraubüberwachung**. Dazu kontrolliert die Steuerung, ob die Schraubverlaufskurve innerhalb eines Toleranzfensters liegt. Die Größe dieses Fensters wird durch die Drehmomentparameter 'maximales und minimales Eindrehmoment' ($M-E$, $M+E$) sowie die Drehwinkelparameter 'maximaler und minimaler Überwachungswinkel' ($W-E$, $W+E$) festgelegt (Bild 2-7). Die Lage des Toleranzfensters wird sinnvollerweise absolut über die beiden Winkelwerte angegeben. Dies setzt allerdings einen definierten Startpunkt zur absoluten Winkelzählung voraus. Hierbei gibt es zwei Alternativen zur Winkeltriggerung. Zum einen kann die Winkelzählung mit dem Startsignal der Schraubspindel erfolgen, zum anderen über ein festgelegtes Schwellmoment. Die Triggerung der Winkelzählung bei Spindelstart ist jedoch sehr ungenau, da alle Bewegungen auch vor dem eigentlichen Schraubbeginn mitgezählt werden. Auch die Vorgabe eines Schwellmoments ist in der Einschraubphase schwierig zu bestimmen.

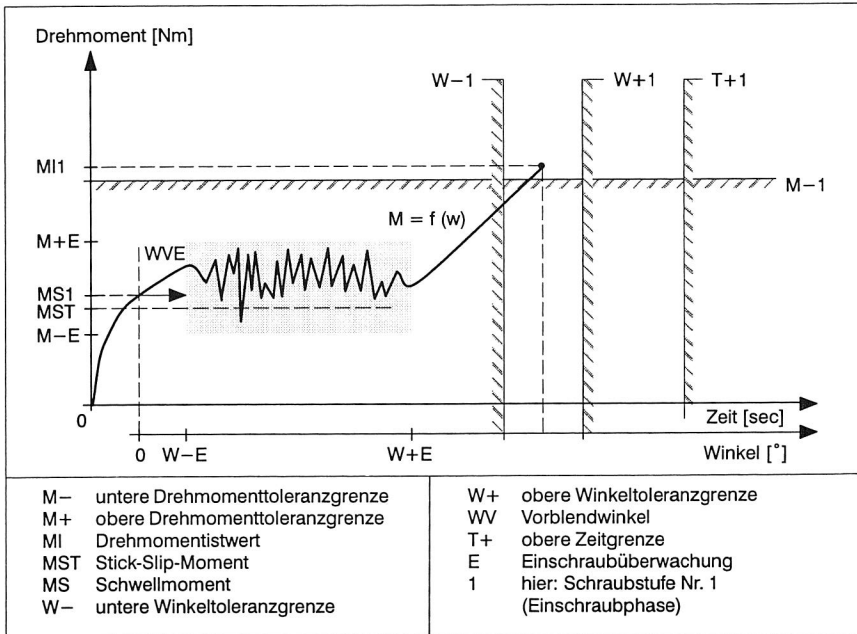


Bild 2-7: Kombination von Einschraub-, Stick-Slip-, Zeit- und Endwertüberwachung zur Fehlererkennung in der Einschraubphase bei einer Rückbetrachtung des Schraubverlaufs

Sinnvoll wäre ein Zählstart unmittelbar vor dem Einschrauben des ersten Gewindengangs. Eine Drehung der Schraube vor dem Schraubvorgang gegen die Schraubrichtung bei gleichzeitigem axialen Druck führt zum Einrasten der Schraube in das Bauteilgewinde. Dieses Einrasten der Schraube sollte von einem Sensor registriert werden, um einen definierten und reproduzierbaren Startpunkt für die absolute Winkelzählung für den Vorblendwinkel (WVE) zu schaffen.

Derzeit ist diese definierte absolute Winkelzählung noch nicht realisiert. Deshalb wird nach wie vor zur Festlegung der Lage des Winkelfensters auf einen Rückblendwinkel (WRE) zurückgegriffen. Von großem Nachteil ist, daß dieses Überwachungsverfahren erst nach beendeter Einschraubphase greifen kann (siehe Bild 2-8). Eine Fehlverschraubung wird letztendlich zwar erkannt, aber es kann nicht verhindert werden, daß z. B. ein Gewinfresser entsteht und hierdurch eine aufwendige Entstörung oder Nacharbeit verursacht wird.

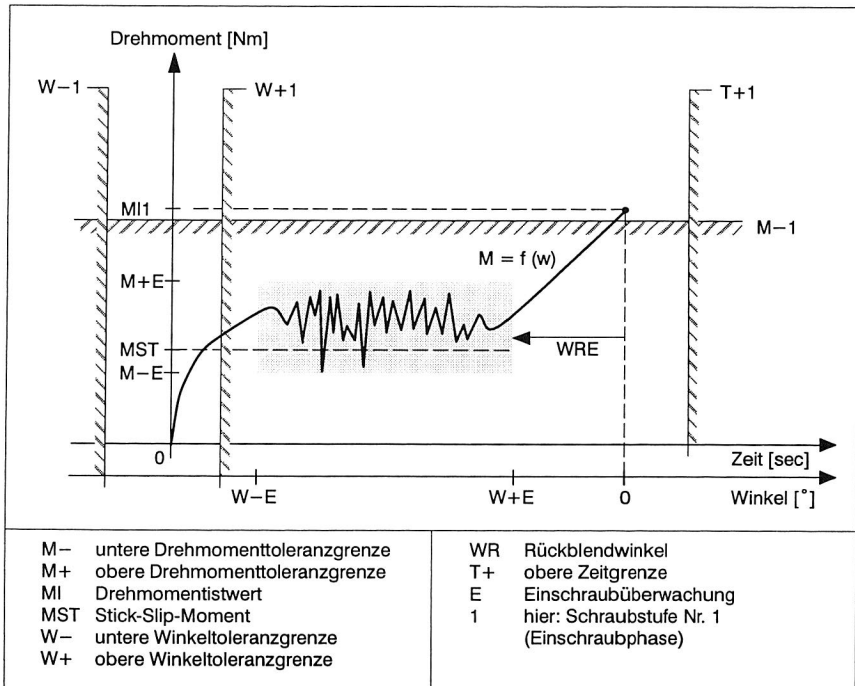


Bild 2-8: Schwellmomentbezogene Einschraub-, Stick-Slip-, Zeit- und Endwertüberwachung zur Fehlererkennung in der Einschraubphase

Ein großes Problem stellen sogenannte bei Stick-Slip-Effekte sowohl beim Einschrauben als auch beim Festschrauben dar. Gerade raue oder lackierte Oberflächen, Schneidschrauben oder selbstsichernde Muttern äußern sich in stark oszillierenden Drehmomentverläufen (Bild 2-7 und Bild 2-8). Diese Oszillation des Drehmoments ist nicht als Fehler sondern vielmehr als unvermeidliche Begleiterscheinung dieser Verschraubung zu betrachten, verursacht durch einen ständigen Wechsel zwischen Haft- und Gleitreibung. Zur **Stick-Slip-Überwachung** dieses Kurvenverlaufs kann wiederum auf den Einschraubkorridor zurückgegriffen werden. Die Amplitude der Oszillation muß sich allerdings innerhalb dieser Toleranzgrenzen bewegen. Da aber schon ein einzelner Peak dieser Verschraubung durch die Verletzung der vorgegebenen Grenzen sofort zur NIO-Bewertung des kompletten Schraubverlaufs führen würde, müßte der Korridor so breit gewählt werden, daß diese Überwachungsfunktion nicht mehr aussagefähig wäre. Um dies zu vermeiden, wird zusätzlich ein Stick-Slip-Moment (MST) definiert. Die Anzahl der erlaubten Unter- und Überschreitungen wird festgelegt. Erst eine zu starke Oszillation des Kurvenverlaufs führt zu einer gezielten Fehlermeldung.

Ein weiteres Überwachungsverfahren ist die **Mismatchkontrolle**. Diese überprüft, ob bis zum Erreichen des sogenannten Mismatchmoments MM eine Mindestanzahl an Winkeln gefahren wurde. Mit dieser Funktion lassen sich z. B. Freßerscheinungen bei Leichtmetallschrauben erkennen. Auch der Zweitanzug einer bereits festen Schraube wird hierdurch vermieden, weil bei der bereits festen Schraube der Drehmomentverlauf erheblich steiler ausfällt und deshalb das Mismatchmoment MM bereits wesentlich früher erreicht wird.

Bei der Überwachung des Einschraubvorgangs kann zusätzlich überprüft werden, ob der Zielwert der Einschraubphase MI1 die untere **Drehmomenttoleranzgrenze** $M-1$ überschritten hat, der **Drehwinkelendwert** zwischen $W-1$ und $W+1$ liegt und ob die obere **Zeitgrenze** $T+$ nicht überschritten wurde. Erst wenn keine der genannten Überwachungsfunktionen angesprochen hat, kann die Finde- und Einschraubphase mit IO bewertet werden und in die nächste Stufe weitergeschaltet werden.

Festschraubphase

Auch für die Festschraubphase stehen eine Reihe von Methoden für die Überwachung zur Verfügung, die gute Auswertemöglichkeiten hinsichtlich der Fehlerursachen bieten (Bild 2-9). In der Regel wird bei einer elektronischen Schraubersteuerung zu einem Zielparameter zumindest dessen Überwachungsgrenzen festgelegt; beispielsweise wird bei einer Momentsteuerung zumindest eine untere und obere Drehmomenttoleranzgrenze festgelegt. Um die Fehlersicherheit des Verfahrens zu verbessern, nimmt man zur Prozeßüberwachung ab einem bestimmten Schwellmoments MS den Drehwinkelverlauf mit auf, den die Schraube bis zum definierten Abschaltpunkt zurücklegt hat. Man spricht hierbei von einem drehmomentgesteuerten und **drehwinkelüberwachten** Verfahren. Nach Beendigung des Schraubvorgangs wird überprüft, ob der Endanzugswinkel innerhalb eines festgelegten Toleranzbandes liegt. Durch diese Überwachungsmaß-

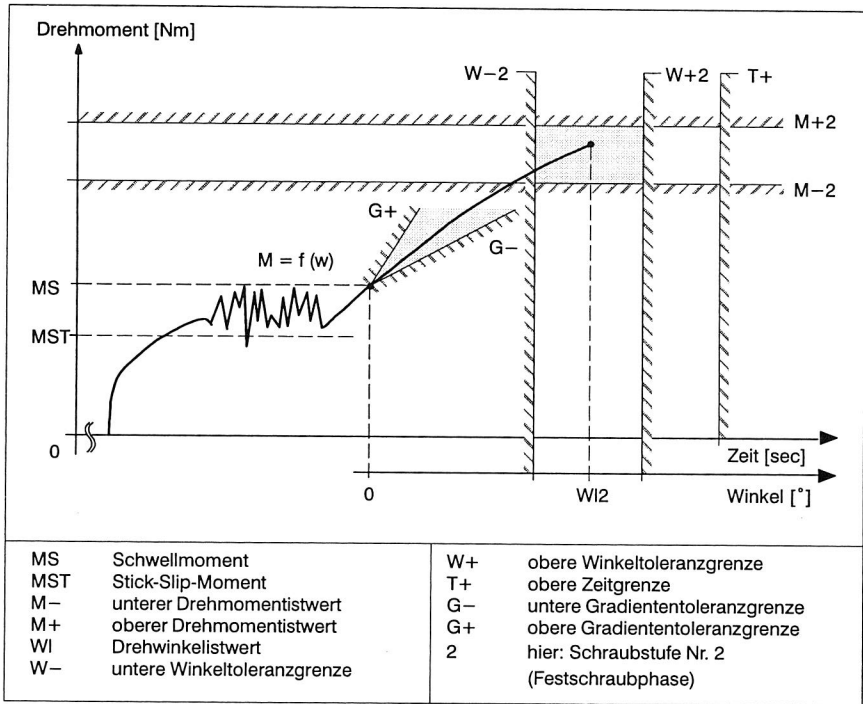


Bild 2-9: Überwachungsfunktionen der Festschraubphase mit Kontrolle von Prozeßzeit und Gradientenverlauf am Schwellpunkt (MS) sowie Betrachtung des Endwertes von Drehmoment und Drehwinkel

nahme lassen sich Fehler, wie zum Beispiel Schweißspritzer, der zum vorzeitigen Erreichen des Abschaltmoments führt, erkennen.

Beim winkelgesteuerten Verfahren wird umgekehrt das Drehmoment zur Überwachung des Schraubablaufs genutzt. Entsprechend wird dieses Steuerungsverfahren als drehwinkelgesteuert und **drehmomentüberwacht** bezeichnet. Eine genau Analyse und detaillierte Fehlerbewertung der beiden Schraubverfahren wird im Zusammenhang mit dem Aufbau von Analysestrukturen für ein Diagnosesystem (Kap. 5.4) gegeben.

Das **Schwellmoment** MS, das für alle Verschraubungen mit Winkelüberwachung bzw. -steuerung definiert werden muß, kann ebenfalls als Überwachungsparameter genutzt werden. Die Analyse, ob bei einer Verschraubung das Schwellmoment nicht erreicht oder überschritten hat, ist für die Festlegung der Nacharbeit von Bedeutung. Das Nichterreichen des Schwellmoments bedeutet, daß die Fügevorgänge in den Bauteilen nicht abgeschlossen wurden. Diese Verschraubung muß in jedem Fall demontiert werden,

da der extrem weiche Verlauf auf ungünstige Bauteileinflüsse oder schlechtes Schraubenmaterial schließen läßt. Liegt der Istwert dagegen oberhalb von MS , kann nach einer nachgeschalteten Lösestufe ein nochmaliges Anziehen der Schraube sinnvoll erscheinen. Außerdem kann mit der exakten Auswertung des Schwellmoments nachgewiesen werden, auf welchen Punkt der Schraubverlaufskurve sich der gemessene Winkelwert tatsächlich bezieht. Dies kann gerade bei harten Schraubfällen aufgrund der geringen Winkelzahl von Relevanz sein.

Die **Anstiegsüberwachung** mißt die Steigung einer Drehmomentkurve und überwacht, ob diese innerhalb der vorgegebenen Grenzen $G-$ und $G+$ (Bild 2-9) verläuft. Hiermit kann beispielsweise die Änderung des Schraubfalls von weich nach hart aufgrund eines falschen Schraubenwerkstoffs festgestellt werden.

Lösephase und Hilfsphase

Das Lösen von Schrauben ist besonders wichtig im Zusammenhang mit einem Wiederanzug z. B. als Maßnahme der Nacharbeit. Die Überwachung dieses Schraubvorgangs ist daher wichtig, um zusätzliche Fehler beim Lösen zu vermeiden und hierdurch die Verbindung möglicherweise für eine Nacharbeit unbrauchbar zu machen.

Der Lösevorgang unterliegt wie die Anziehvorgänge einer Steuerung mittels einer Zielfunktion und der Überwachung durch entsprechende Überwachungsfunktionen. Gesteuert werden kann das Lösen durch den **Drehwinkel** oder das **Drehmoment**. Auch die Steuerung über ein **Signal**, wie z. B. die Einschraubtiefe, ist denkbar.

Beim Lösen muß zunächst die Haftreibung im Gewinde und unter dem Schraubenkopf überwunden werden, so daß es zu einem kurzen Anstieg des Drehmomentverlaufs kommt. Dieser Anstieg läßt sich durch ein maximal zulässiges Losreißmoment MR überwachen. Wird dieser Wert überschritten, so wird der Lösevorgang abgebrochen, um beispielsweise einen drohenden Abriß des Kopfes einer festsitzenden Schraube zu verhindern und die damit verbundene aufwendige Nacharbeit zu vermeiden (Bild 2-10).

Die Überwachung des Lösevorgangs ist insbesondere wichtig, wenn eine NIO-Verschraubung kontrolliert gelöst und im Anschluß daran wieder verschraubt werden soll. Die beschriebenen Parameter sind ausreichend, um ein kontrolliertes Lösen zu gewährleisten. Muß eine Verschraubung dagegen vollständig demontiert werden, um beispielsweise die Schraube zu wechseln, so ist die exakte Überwachung des kompletten Vorgangs sicherlich nicht erforderlich.

Auch auf eine gesonderte Überwachung der Hilfsphase kann verzichtet werden. Die Steuerung erfolgt meist über die Zeit oder durch eine Signalsynchronisation, die eine zusätzliche Überwachung normalerweise nicht notwendig macht.

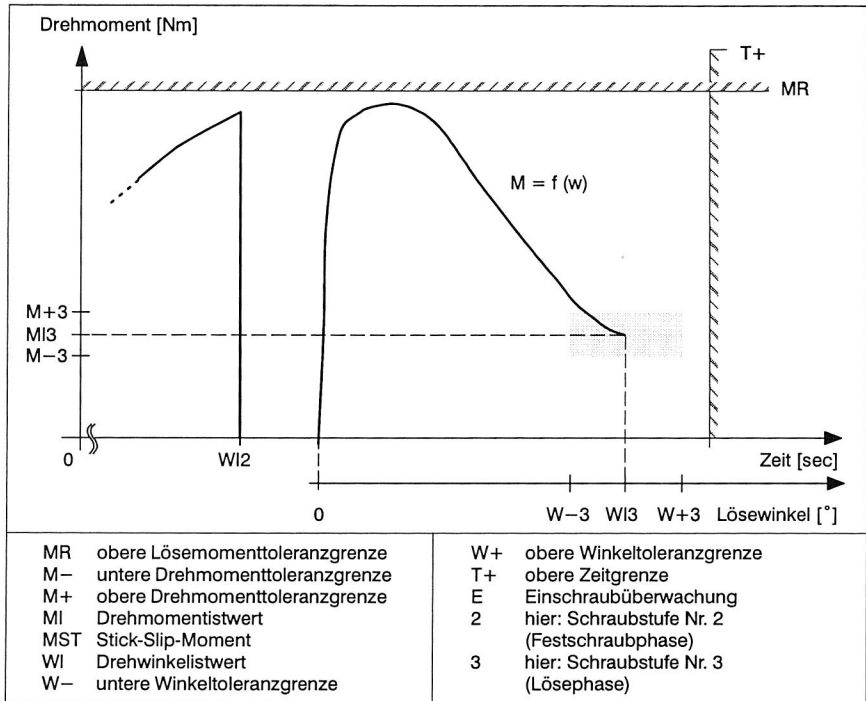


Bild 2-10: Gezielte Überwachung des Lösevorgangs zur Vermeidung von aufwendigen Nacharbeitsvorgängen

2.3 Grundsätzlicher Aufbau von Systemen zum automatisierten Verschrauben

2.3.1 Mechanische Grundkomponenten eines Schraubsystems

Zu einem Schraubsystem gehört nicht nur das eigentliche Schraubwerkzeug, sondern auch die Steuerungs- und Handhabungstechnik, sowie der komplette Materialfluß. In Bild 2-11 sind die Teilsysteme einer automatischen Schraubanlage dargestellt, wie sie für die Serienmontage typisch ist. Die Stationssteuerung ist meist in Form einer speicherprogrammierbaren Steuerung ausgeführt [107]. Die eigentliche Schraubersteuerung kann als Einschubkarte für diese SPS realisiert sein. Bei elektrisch angetriebenen Werkzeugen werden die Motoren der Schraubspindeln über spezielle Leistungsteile betrieben.

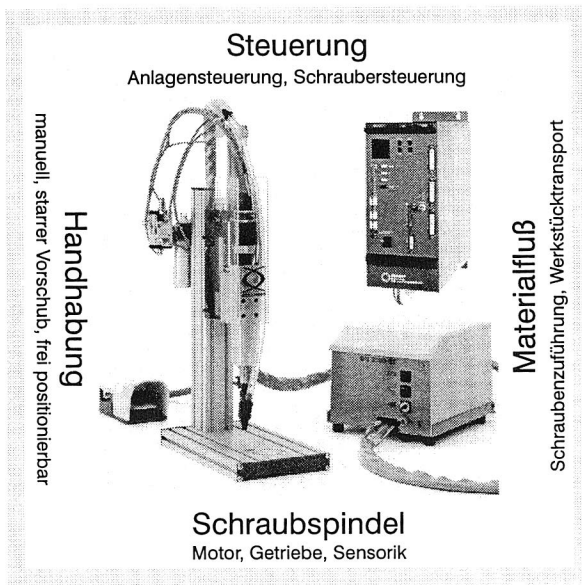


Bild 2-11: Wesentliche Teilsysteme von teil- und vollautomatisierten Schraubstationen

Der Materialfluß teilt sich auf in die automatische Schraubenzuführung, wie sie beispielsweise mittels Vibrationswendelförderer erfolgen kann und der automatischen Zuführung der Werkstücke über Transportsysteme. Die Handhabung der Schraubspindel erfolgt häufig, wie im Bild dargestellt, über eine pneumatische Vorschubeinheit. Dieser Aufbau ist als typisch zu betrachten, wenngleich die Zuführung der Schrauben und Werkstücke sehr häufig auch manuell bewerkstelligt wird.

2.3.2 Antriebs- und Steuerungskomponenten von Schraubwerkzeugen

Im Zusammenhang mit der Steuerungstechnik müssen insbesondere die Antriebstechnik und die eingesetzten Steuerungsprinzipien von Schraubspindeln gemeinsam betrachtet werden, da sich die Merkmale beliebig kombinieren lassen.

Angetrieben werden Schraubwerkzeuge in der Regel

- ☐ pneumatisch oder
- ☐ elektrisch.

In Ausnahmefällen, wenn extrem hohe Montagemomente gefordert werden, kommen hydraulische Schrauber zum Einsatz.

Von den Steuerungsprinzipien ist zu unterscheiden, ob das Schraubwerkzeug

- mechanisch abgeschaltet wird,
- mit einer elektronischen Ansteuerung ausgestattet ist,
- oder überhaupt keine Abschaltung möglich ist.

Aufgrund des geringen Preises kommt den rein mechanisch abschaltenden Druckluftschraubern in der Industrie vor allem bei der Erstellung von unkontrollierten Verbindungen mit Handschraubern eine große Bedeutung zu. Eine Vielzahl von Bauarten und Ausführungsformen kommen zum Einsatz [74]. Nachteilig gegenüber den geregelten Werkzeugen ist vor allem die geringe erreichbare Drehmomentgenauigkeit und die eingeschränkte Prozeßsteuerung und -kontrolle.

Die Elektroschrauber haben durch Entwicklungen bei den elektromotorischen Antrieben gegenüber den Druckluftwerkzeugen an Bedeutung gewonnen [25]. Vor allem die Entwicklung des elektronisch kommutierten Gleichstrommotors (EC-Motor) hat den Elektromotoren große Vorteile gebracht [7].

Für die Erstellung von sicherheitsrelevanten Verschraubungen in der Montage sind Werkzeuge nötig, die zum einen hohe Ergonomie aufweisen und zum anderen sehr gut regelbar sind. Außerdem muß der Schraubvorgang durch zusätzliche Elektronik überwachbar sein. Hierzu müssen die Werkzeuge mit eingebauten Drehmoment- und Drehwinkelsensoren ausgerüstet sein. Notwendig sind **intelligente Werkzeuge**, die die Durchführung der Verschraubung und die Überwachung des Prozesses in einem ergonomischen Gerät vereinigen. Die gute Regelbarkeit in Verbindung mit der inzwischen als Standard anzusehenden Integration der Sensorik verschafft den Elektrowerkzeugen unter diesem Gesichtspunkt für die Montage von kritischen Verschraubungen einen Vorsprung.

Bei den Druckluftwerkzeugen ist die Entwicklung solcher intelligenter Werkzeuge vor allem mit dem Steuerungsprinzip des Impulsschraubers möglich [67]. Zwar ist auch bei Abwürge- und Schlagschraubern der Einbau von Sensortechnik möglich, diese Werkzeuge erfüllen aber nicht mehr die heute erforderlichen ergonomischen Voraussetzungen. Die Entwicklung eines intelligenten Druckluft-Werkzeugs auf der Basis eines Impulsschraubers beschreibt [129]. Die elektronische Überwachung des Schraubvorgangs wird hier durch die Erfassung und Auswertung der Impulse, die von dem hydraulischen Impulswerkzeug erzeugt werden, mit einem Sensor gewährleistet.

Nur die mit den intelligenten Werkzeugen mögliche Steuerung bzw. Regelung der Schraubprozesse kann die Anforderungen erfüllen, die an die sicherheits- und funktionskritischen Verschraubungen in Bezug auf die Verschraubungsqualität gestellt werden [88], [129].

2.3.3 Ausprägung der Funktionalität von Steuerungen in Schraubsystemen

Für die Integration von Schraubaufgaben in eine automatisierte Umgebung sind elektronische Schraubersteuerungen von wesentlicher Bedeutung. Sie nehmen eine wichtige Position zwischen der Prozeßebene und übergeordneten Steuerungskomponenten ein. Schraubersteuerungen organisieren nicht nur den technologischen Ablauf des Schraubens, sondern ermöglichen auch den automatisierten Ablauf des Gesamtprozesses.

Je nach Aufgabenstellung haben sich verschiedene Systemkonfigurationen in der Praxis durchgesetzt. Gerade die unterschiedliche Integration der Funktion 'Ablaufsteuerung' hat zu diversen Ausprägungen der Steuerungskonzepte von Schraubsystemen geführt:

- Übergeordnete Ablaufsteuerung,
- in Schraubsteuerung integrierte Ablaufsteuerung,
- in Ablaufsteuerung integrierte Schraubersteuerung.

Einkanal- und Mehrkanal-Schraubersteuerungen

Ein wesentliches Leistungsmerkmal einer Schraubersteuerung äußert sich in der Anzahl der Spindeln, die mit dieser angesteuert werden können. Grundsätzlich kann zwischen Einkanal- und Mehrkanal-Schraubersteuerungen unterschieden werden.

Einkanal-Schraubersteuerungen werden vermehrt beim Einsatz von Handschraubern eingesetzt. Sie sind meist in Kompaktbauweise ausgeführt; d. h. eine Modularität der einzelnen Komponenten der Schraubersteuerung ist nicht vorgesehen. Das Anpassen an verschiedene Systemumgebungen ist deshalb mit großem Aufwand verbunden.

Dagegen eignen sich Mehrkanalsteuerungen insbesondere für Schraubstationen mit einer Vielzahl von Schraubspindeln. Zumeist werden die einzelnen Steuer- und Meßkarten in ein Rack eingebaut. Die Hauptkomponenten für Stromversorgung, interne und externe Kommunikation, aber auch die Schnittstellen für Programmierung und Prozeßvisualisierung können für alle Kanäle gleichermaßen genutzt werden. Die modulare Bauweise unterstützt die Flexibilität bezüglich unterschiedlicher Systemumgebungen. Auch eine Systemanpassung kann relativ einfach durch den Austausch entsprechender Steckkarten erreicht werden. Die Kanalzahl ist herstellerabhängig und liegt im Bereich von 2 bis über 100 Spindeln durch eine hierarchische Anordnung von Haupt- und Spindelsteuergeräten [27].

Bild 2-12 zeigt prinzipielle Ausführungsformen von Einkanal- und Mehrkanal-Schraubersteuerungen. Diese Systemkonfiguration eignet sich sowohl bei einer Ansteuerung durch eine übergeordnete Ablaufsteuerung als auch bei Stand-Alone-Lösungen.

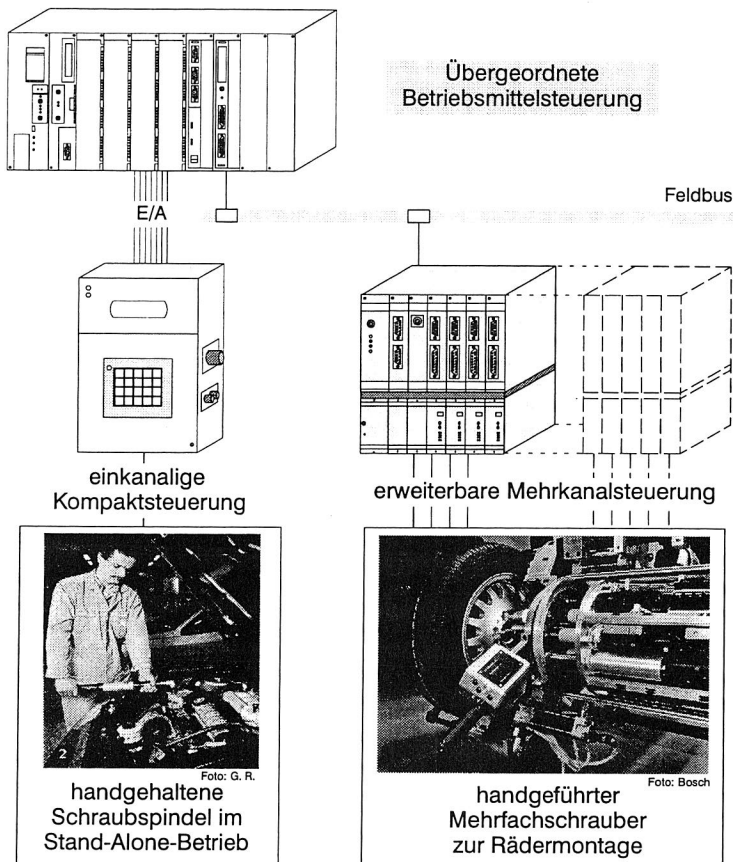


Bild 2-12: Steuerung des Prozeßablaufs durch externe, übergeordnete Betriebsmittelsteuerung bei ein- und mehrkanaligen Schraubsystemen

Um den steigenden Anforderungen der Anwender nach

- Geschwindigkeit,
- Genauigkeit und
- Zuverlässigkeit

Rechnung zu tragen, sind die Schraubsteuerungen meist als Mehrprozessorsystem ausgeführt. Die Aufgaben der Meßdatenverarbeitung, der Steuerungsfunktionen und der Kommunikation verteilen sich auf eigene Prozessoren.

Integrierte Ablaufsteuerung bei Schraubsystemen im Stand-Alone Betrieb

Bei manuellem Handling von elektronisch gesteuerten Schraubspindeln arbeiten die Schraubersteuerungen häufig völlig autark; d.h. die Steuerungen sind nicht gekoppelt mit übergeordneten Systemen, die zentral die Aufgaben der Anlagensteuerung, Programmierung, Prozeßvisualisierung oder gar Qualitätssicherung übernehmen. Bei Beibehaltung der hohen Anforderungen an ein Schraubsystem müssen diese Funktionen folglich direkt vor Ort an der Schraubstation realisiert werden.

In neuerer Zeit sind hier Entwicklungen vorangetrieben worden, eine 'kleine' speicherprogrammierbare Steuerung direkt in die Schraubersteuerung zu integrieren, die die komplette Ablaufsteuerung einer Schraubstation übernimmt und damit wird in einfachen Anwendungsfällen die stationseigene SPS für diese Aufgabenstellung ersetzt. In die Steuerung wird hierzu ein kleines E/A-Modul, das die Kommunikation über einfache Signale mit den Schraubsystemkomponenten ermöglicht, und ein Logikbaustein, der die Eingangssignale verarbeitet und programmgemäß die Ausgänge setzt, integriert.

Kontrolliert und gesteuert werden können mit einer derartigen Schraubersteuerung neben dem eigentlichen Prozeßablauf typische Funktionen einer Montagezelle zum automatisierten Verschrauben wie

- Werkstücktransport
 - Fördersystem für Paletten
 - Stopper im Fördersystem
 - Zentrier- und Aushebestationen
- Schraubenzuführung
 - Vereinzelung
 - Zuschießen der Schrauben
- Werkzeughandhabung
 - Spindelzustellung
 - Wechsel der Schraubspindel

Eine derartige Schraubersteuerung kann auch für den geordneten Ablauf einer manuellen Schraubenmontage eingesetzt werden, wenn z. B. mehrere Schraubstellen oder verschiedene Schraubengrößen zu montieren sind. Über die Ansteuerung von Zusatzkomponenten, wie z. B. einem intelligenten Stecknußkasten, wird je nach aufgenommenem Stecknuß eine automatische Parametrierung der Steuerung vorgenommen. Mit diesem System lassen sich oftmals Kosten sparen, da eine einzelne Schraubspindel für mehrere Schraubfälle eingesetzt werden kann. Ein weiterer Vorteil liegt darin, daß der Werker dazu gezwungen werden kann, die Schrauben in der richtigen Reihenfolge anzuziehen. Schraubersteuerungen mit integrierten Ablaufsteuerungsfunktionen haben sich deshalb bereits in zahlreichen Einsatzfällen bewährt [8].

Als nachteilig erweist sich bei dem Betrieb von 'stand alone' Lösungen der erhöhte personelle Aufwand, da Eingriffe bzw. Kontrollen immer vor Ort durchgeführt werden müs-

sen. Auch die ausgewerteten Schraubdaten und Statistiken können nur isoliert betrachtet werden. Eine übergreifende Qualitätssicherung wird hierdurch erheblich erschwert. Die Zusatzgeräte für Programmierung, Dokumentation oder Visualisierung sind für jede Station vorzusehen und können so sicher nicht optimal ausgenutzt werden. Jedoch entfallen bei Stand-Alone-Konzepten die teils erheblichen Kosten für eine leistungsfähige Vernetzung über Kommunikationssysteme.

Integrierte Schraubersteuerung

Eine Sonderstellung nehmen integrierte Schraubersteuerungen ein. Zu diesen werden alle Schraubersteuerungen gezählt, die physikalisch und logisch eng in das Mastersteuerungssystem, in der Regel eine SPS, integriert sind (Bild 2-13). Die Schrauber-

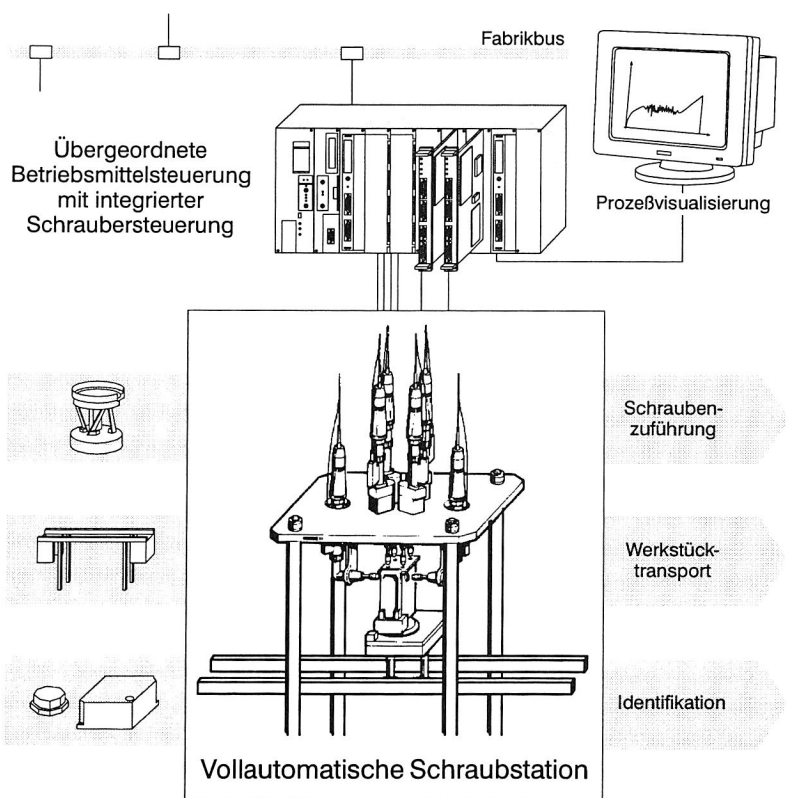


Bild 2-13: Die Integrationslösung ermöglicht das Steuern von Materialfluß und Schrauberhandhabung sowie die Regelung der Schraubwerkzeuge

steuerung ist in diesem Fall als Einsteckmodul eines modularen Baukastensystems ausgeführt und sitzt direkt auf dem internen Steuerungsbus. Die Schnittstellenanbindung der Schraubersteuerung zu übergeordneten oder beigestellten Komponenten wird bei dieser Systemkonfiguration durch die Kommunikations- und Signalkarten der Ablaufsteuerung realisiert; sie ist letztendlich nur von der Leistungsfähigkeit der eingesetzten SPS abhängig.

Vorteil dieser Konfiguration ist die einfache Systemzusammenstellung, da alle Schnittstellen und Funktionen aufeinander abgestimmt sind. Auch die stationsinterne Kommunikation wird hierdurch meist zufriedenstellend abgedeckt. Der Anwender ist allerdings gezwungen, Komplettlösungen abzunehmen.

3 *Definition eines Standards für Schraubersteuerungen bezüglich Funktionsumfang und Schnittstellenanbindung*

Der Aspekt der Qualitätssicherung hat in den letzten Jahren neue Anforderungen an die Produktionsprozesse und deren Prozeßsteuerungen gestellt. Im Hinblick auf die Produkthaftung fällt damit gerade den Schraubsteuerungen in teil- und vollautomatisierten Montagesystemen eine wesentliche Bedeutung zu [3],[4],[6]. Prozeßsteuerung, -überwachung und -dokumentation beim Verschrauben erfordern eine vielfältige Funktionspalette. Zudem muß ein Schraubsystem eingebunden in den Fabrikverbund gesehen werden. Insbesondere die Kommunikationsanbindung spielt hier eine entscheidende Rolle. Um für die Schraubtechnik ein durchgängiges und zukunftsweisendes Qualitätssicherungskonzept aufbauen zu können, sind definierte Schnittstellen bezüglich Datenmanagement und Prozeßregelung zu schaffen.

3.1 *Differenzierte Analyse der Steuerungen*

In einer vom Verfasser durchgeführten Studie wurden die wesentlichen Schraubersteuerungen europäischer Hersteller unter Berücksichtigung technologischer und kommunikativer Kriterien differenziert analysiert (Bild 3-1). Hierbei wird erkenntlich, daß das Steuerungssystem eine Vielzahl von Systemfunktionen zu erfüllen hat.

3.1.1 *Systemfunktionen einer Schraubersteuerung*

Die in die Steuer- und Meßelektronik implizierten Ziel- und Überwachungsfunktionen zur Steuerung des Schraubprozesses bilden die Basis der Systemfunktionen. Die Meßelektronik verarbeitet die Signale der Meßwertgeber, übernimmt die Ansteuerung der Leistungsteile und regelt die Motoren der Schraubwerkzeuge. Die Schraubersteuerung bewertet die Meßkurve in Form einer IO- oder NIO-Zuordnung und gibt das Ergebnis aus. Diese Prozeßinformation wird je nach Steuerungstyp an einem Bildschirm, Lampentableau oder über LED's am Schraubwerkzeug angezeigt bzw. an die Anlagensteuerung weitergegeben. Der optionale Anschluß eines Druckers zur Visualisierung und Dokumentation der Ergebnisse ist als Stand der Technik zu betrachten.

In der Steuerung müssen zumindest die Parametersätze für die Ziel- und Überwachungsfunktionen hinterlegt sein. Zusätzlich können auch Prozeßergebnisse oder komplette Schraubverlaufskurven abgespeichert sein. Durch die Integration von Zusatzfunktionen (Bild 3-1) lassen sich organisatorische Aufgaben wie Paßwortverwaltung, elektronisches Logbuch, etc. aber auch aufwendige Steuerungsfunktionen wie die Integration einer Ablaufsteuerung, dem Systemtest oder eine redundante Meßwertverarbeitung realisieren.

Für eine übergeordnete Qualitätssicherung ist eine leistungsfähige Schnittstellenanbindung von besonderem Interesse. Sie muß die Kommunikation mit den verschiedenen

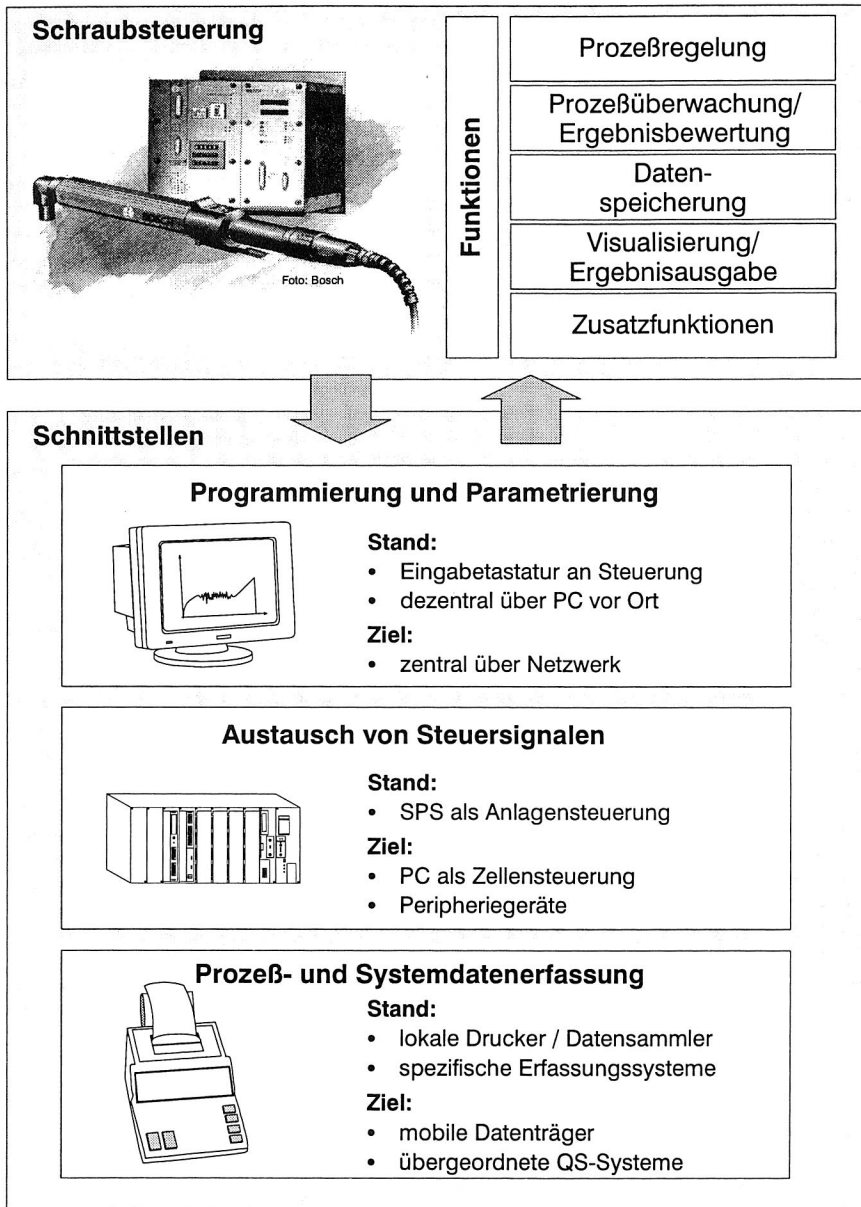


Bild 3-1: Funktionen einer Schraubersteuerung und Schnittstellenanbindung zur Systemumgebung

Systemkomponenten ermöglichen. Hierbei ist eine nicht unerhebliche Übertragungsleistung erbringen, wenn z. B. eine Verschraubungskurve, die einige hundert Wertepaare umfaßt, innerhalb eines Verschraubungstaktes im Sekundenbereich übermittelt werden muß. Je nach angebundener Systemumgebung werden serielle und parallele Schnittstellen, in neuerer Zeit sogar Busankoppelungen angeboten. Die Kosten für derartige Schnittstellenanbindungen können relativ hoch sein. Deshalb ist ein auf den jeweiligen Einsatzfall abgestimmtes Kommunikationskonzept für die Schraubersteuerung zu erstellen, das in Kapitel 3.4. erläutert wird. Hierbei werden die drei im Bild 3-1 aufgeführten Schnittstellenbereiche bezüglich der Datenstrecke und Dateninhalte differenziert.

3.1.2 Alternativen der System- und Prozeßprogrammierung

Die Programmierung von Schraubsteuerungen ist auf diverse Arten möglich. Bei einfachen Systemen werden die Steuergrößen direkt an der Steuerung über Dezimalschalter und Potentiometer eingestellt. Umfangreichere Möglichkeiten bietet eine Programmierung über Tastatur mit LCD-Anzeige oder einem integrierten Bildschirm. Speziell beim Einsatz mehrerer Schraubersteuerungen ist jedoch die externe Programmierung über ein Programmiergerät sinnvoll. Hierfür werden tragbare Geräte eingesetzt, die vor Ort an die Schraubersteuerung angeschlossen werden, oder stationäre Programmierkomponenten, die über ein Kommunikationsnetz mehrere Schraubersteuerungen ansprechen. Die Schraubersteuerung muß in beiden Fällen über leistungsfähige Schnittstellen verfügen. Die Programmierung kann dabei speziell bei vernetzten Systemen sowohl online als auch offline erfolgen.

Speziell bei der manuellen Schrauberhandhabung muß eine möglichst benutzerfreundliche Programmierung vor Ort an der Schraubersteuerung vorgesehen werden. Dadurch kann qualifiziertes Einstellerpersonal die Programmierung selbst vornehmen. Jedoch muß gewährleistet sein, daß nur autorisiertes Personal Prozeßparameter verändern kann.

Beim Einsatz von mehrkanaligen Schraubersteuerungen ist eine externe Programmierung mittels tragbarer Programmiergeräte vorzuziehen. Auch die zentrale Parametrierung über vernetzte Strukturen bietet eine zukunftsweisende Alternative. Als Programmiergerät sollten übliche Industrierechner, und nicht speziell konzipierte Mikrorechner eingesetzt werden. Durch die weite Verbreitung der Standardrechner ist eine große Vielfalt an Standard-Hard- als auch Software verfügbar, mit denen sich kostengünstige Lösungen aufbauen lassen. Ein zukünftiges Ziel muß es auch sein, die Programmiersoftware so zu gestalten, daß über eine standardisierte Software die Schraubersteuerungen verschiedener Hersteller programmiert werden können.

3.1.3 Archivierung der Prozeßdaten

Die einfachste Variante der Erfassung der Prozeßdaten ist deren Ausgabe über einen lokalen Drucker direkt an der Steuerung. Von großem Nachteil ist dabei, daß diese Da-

ten nicht mehr elektronisch aufbereitet oder ausgewertet werden können. Deshalb werden für die Dokumentation der Schraubdaten an Stelle von Druckern teilweise auch sogenannte Datensammler eingesetzt, die direkt mit der Schraubsteuerung verbunden sind. Diese sind als Miniaturrechner mit gepufferten RAM aufgebaut und können über einen bestimmten Zeitraum – meist ein Arbeitstag – automatisch alle Daten aufnehmen. Zum Auslesen der Schraubdaten muß der Datensammler von der Steuerung getrennt und an einen Auswerterechner mit spezieller Software angebunden werden. Diese Lösung bedingt einen hohen personellen und organisatorischen Aufwand.

Zukunftsweisend ist die Erfassung der Prozeßdaten über Rechnersysteme. Hierbei ist zwischen den beiden Lösungen zu unterscheiden, je Montagezelle einen Dokumentationsrechner einzusetzen oder ein übergeordnetes Rechnerkonzept aufzubauen, wie es in Kapitel 3.4 oder in [63] beschrieben wird.

Bei einem autonomen Rechnersystem kommuniziert dieser direkt mit der Steuerung, zeichnet die Daten auf eigenen Massenspeichern auf und wertet diese lokal mit entsprechenden Auswertungsprogrammen aus. Im Bedarfsfall können die Daten auf transferierbare Massenspeicher (Streamer, Diskette, Wechselfestplatte etc.) übertragen werden, um auch mit dieser Lösung eine zentrale Datenspeicherung zu ermöglichen.

Für die Kopplung der Schraubsteuerung mit dem Rechnersystem gibt es eine Vielzahl von Lösungen, die in der Regel auf serielle und parallele Anbindung basieren. Sind innerhalb der Montagezelle die Prozeßdaten von mehreren Schraubkanälen über einen einzigen PC zu erfassen, so sind hardwareseitig die folgenden Alternativen denkbar:

- Mehrfach-Serial-Card
- Schnittstellenumschalter
- Datenpuffer (Spooler)
- Spezialnetzwerk der Steuerung

Auch mobile Datenträger sind prinzipiell zur Aufnahme der Schraubdaten geeignet. Da die Schreib-/Lesestationen meist nicht direkt an die Schraubsteuerung angebunden sind, müssen bei diesem Konzept die Daten an die Anlagensteuerung übertragen werden und von dieser auf den Datenträger geschrieben werden. Die Prozeßdaten stehen allerdings erst am Montagebandende zur Verfügung. Dort werden sie ausgelesen und der zentralen Datenauswertung zugeführt.

3.1.4 Austausch von Steuersignalen

Besonders wichtig für die Automatisierung von Schraubprozessen sind Systemzustandsinformationen, die dazu dienen, den Ablauf des Schraubprozesses zu steuern, die verschiedenen Komponenten eines Schraubsystems zu synchronisieren oder die Kommunikation zwischen den Teilsystemen zu koordinieren. Hierzu zählen für den Bereich der automatisierten Schraubsysteme beispielsweise folgende Steuersignale:

- Zur Verschraubung bereit,
- Verschraubung abgeschlossen,

- Schraubprogramm anwählen,
- Quittierung des Schraubprogramms,
- Störungsmeldung,
- Schraube vorhanden bzw. fehlt.

Der Umfang der Steuerdaten ist in entscheidendem Maße abhängig von der Komplexität des Schraubsystemes und der eingesetzten Schraubtechnologie.

3.1.5 Signifikante Defizite der analysierten Schraubersteuerungen

Bei den untersuchten Steuerungen zeigte sich, daß insbesondere der Funktionsumfang der Prozeßsteuerungen und die Schnittstellenanbindung sehr spezifisch auf den jeweiligen Einsatzfall zugeschnitten wird und daß die Steuerungskonzepte für die Vielzahl der Anwendungsfälle einfach zu starr ausgelegt sind. Nahezu jeder Schraubersteuerungshersteller gestaltet seine Systemkomponenten – insbesondere die Steuerungseinheiten – derart, daß sie nur in einer herstellerspezifischen Umgebung problemlos einzusetzen sind.

Wird vom Anwender eine Ankopplung an bestehende Automatisierungskomponenten oder der Einsatz von Komponenten verschiedener Hersteller verlangt, kann dies meist nur eingeschränkt oder mit erheblichem Anpassungsaufwand, der sich mittelbar auf die Gesamtwirtschaftlichkeit des Montagesystems auswirkt, realisiert werden. In Bild 3-2 sind die wesentlichen Defizite der analysierten Schraubersteuerungen zusammengestellt.

Im einzelnen hat die Auswertung der funktionalen Leistungsmerkmale gezeigt, daß bei einigen Schraubersteuerungen entschieden zu wenige Schraubstufen verfügbar sind, um technologisch angepaßt und optimal verschrauben zu können. Ebenso sind ein Teil leistungsfähiger Prozeßsteuerungen nicht flexibel einsetzbar, da steuerungsintern zu wenige Schraubprogramme abgespeichert werden können. Müssen neue Verschraubungsparameter programmiert oder von einer übergeordneten Einheit in die Schraubersteuerung geladen werden, ist dies oft mit einem nicht unerheblichen Zeitaufwand verbunden. Eine gewisse Variantenflexibilität und kurze Reaktionszeiten auf Verschraubungsfehler sind bei leistungsfähigen Schraubersteuerungen unbedingt erforderlich.

Bei einigen Schraubersteuerungen sind sogar Defizite in der Schraubtechnologie festzustellen. Wie bereits in Kapitel 2 gezeigt wurde, kann in vielen Fällen alleine durch die Kontrolle des Drehmomentes oder des Drehwinkels eine optimale Verschraubung nicht gewährleistet werden. Wichtige Überwachungsparameter wie beispielsweise Einschraubtiefe oder Gradient zur effizienten Überwachung des Schraubprozesses sind in vielen Steuerungen nicht vorhanden.

Bei der Programmierung haben sich bezüglich der Hard- und Software unterschiedlichste Konzepte durchgesetzt. Hat der Anwender mehrere Schraubstationen mit Prozeßsteuerungen diverser Hersteller im Einsatz, so ist er daran interessiert, zumindest von der Hardwareseite eine einheitliche Plattform zum Programmieren seiner Schrauber-

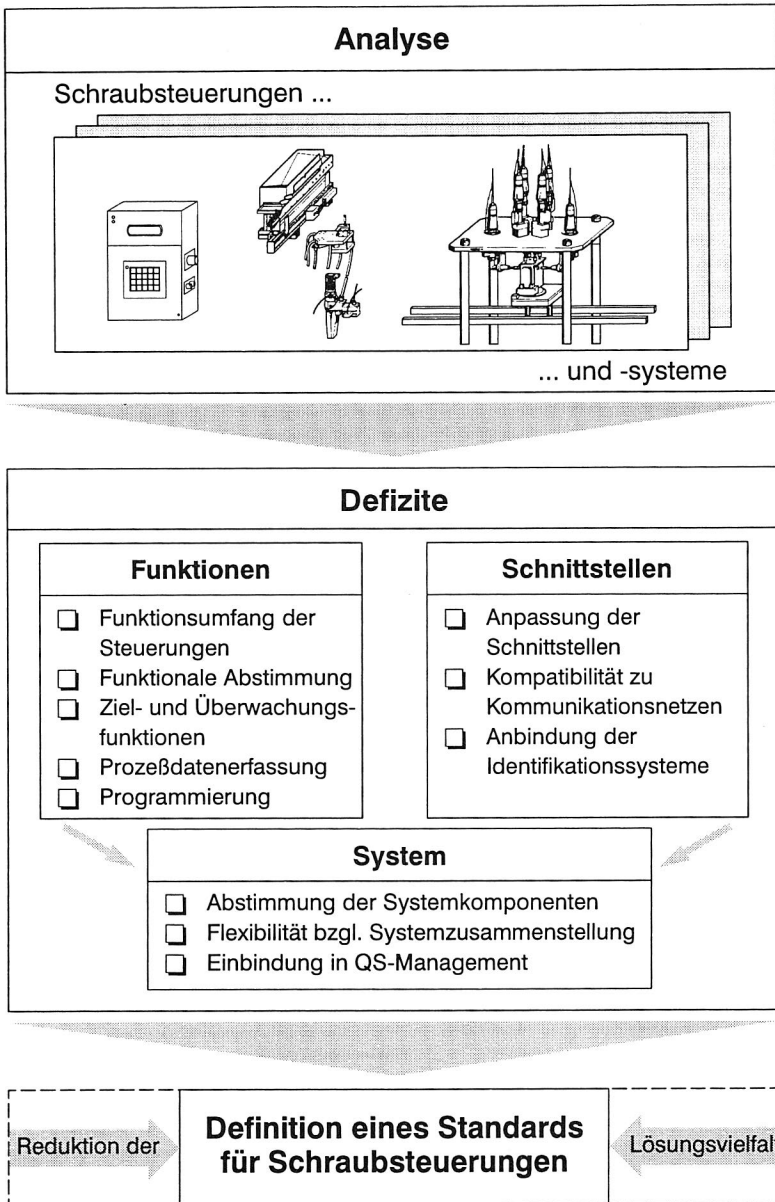


Bild 3-2: Signifikante Defizite bestehender Schraubersteuerungen bezüglich Funktionsumfang und Schnittstellenanbindung

steuerungen zu schaffen. Sehr viele Steuerungen bieten jedoch keine Alternativen; es wird nur ein spezielles Programmiergerät angeboten, das gezwungenermaßen als eigene Systemkomponente mit erworben werden muß.

Nicht zuletzt die Frage der Schnittstellenanbindung ist bei vielen Schraubersteuerungen nicht befriedigend gelöst. Die Gestaltung und Anpaßbarkeit der seriellen und parallelen Schnittstellen ist oft nicht geeignet, flexibel auf die unterschiedlichen Kundenwünsche hinsichtlich der geforderten der Systemkonfigurationen zu reagieren. Gerade bei den Schraubersteuerungen der höheren Leistungskategorie vermißt man die Möglichkeit, die Schraubstationen leistungsfähig und kostengünstig an Kommunikationsnetze anzuschließen, um über zentrale Systemkomponenten Aufgaben wie Programmierung und Qualitätsdokumentation wahrzunehmen. Auch eine Ankopplung von Identifikationssystemen und einfachen Kennzeichnungseinrichtungen ist oft nur mit erheblichem Aufwand oder überhaupt nicht möglich. Gerade für eine umfassende Qualitätssicherung ist es jedoch unbedingt erforderlich, zumindest die Produktdaten dem einzelnen Schraubfall zuzuordnen.

3.1.6 Ziele und Einflußkriterien der Standardisierung

Wie die Analyse bestehender Schraubsysteme gezeigt hat, ist die Flexibilität bezüglich unterschiedlicher Systemkonfigurationen aufgrund der funktionalen und schnittstellenspezifischen Defizite der Steuerungen meist stark eingeschränkt. Deshalb sind zeit- und kostenintensive Anpassungsarbeiten erforderlich, um die vielfältigen Kundenwünsche und Randbedingungen der verschiedenen Einsatzfälle abzudecken. Eine Standardisierung des Leistungsprofils und der Schnittstellengestaltung gerade für neue Steuerungsgenerationen ist deshalb zwingend erforderlich.

Ziel der Standardisierungsbestrebungen für Schraubersteuerungen muß es sein, diese möglichst modular zu gestalten, um hieraus mit geringem Aufwand komplette Schraubsysteme aufzubauen. Aufgrund des großen Spektrums an Schraubanwendungen erscheint es sinnvoll, abgestufte Leistungsklassen für repräsentative Einsatzfälle zu formulieren. Die Standardisierungsvorschläge müssen so ausgeprägt sein, daß die Merkmale eines Standards möglichst viele Randbedingungen innerhalb einer Leistungsklasse abdecken. Allerdings darf hieraus keine zu große Vielfalt entstehen, um gerade bei einfachen Systemlösungen nicht den Kostenvorteil der Standardisierung wieder zu verlieren.

Ein ausgewogener Standard kommt gleichermaßen den Schraubanwendern und den Systemherstellern zu gute, erfordert jedoch unbedingt eine enge Abstimmung zwischen den Herstellern und zumindest den Großanwendern der Schraubtechnik, um einen Standard im Industrialltag auch flächendeckend einzuführen. Allerdings ergeben sich hierdurch gerade für den Anwender eine Vielzahl von Vorteilen. Bislang war es für diesen sehr schwierig, die für den praktischen Einsatzfall notwendigen Leistungsmerkmale und Funktionen der Steuerungen zu extrahieren, die angebotenen Lösungen hinsichtlich konkreter Einsatzanforderungen und Randbedingungen zu analysieren bzw.

zu vergleichen oder gar einzelne Schraubsysteme in ein vorliegendes Fertigungs- und Qualitätssicherungskonzept zu integrieren. Ein abgestimmtes Standardisierungskonzept bedeutet für den Anwender eine erhebliche Planungs- und Realisierungsvereinfachung für den Einsatz von Schraubsystemen im Fabrikverbund und trägt damit wesentlich zur Kostensenkung bei.

Für die Steuerungshersteller bietet die Standardisierung vor allem eine Orientierung bei der Entwicklung neuer Steuerungsgenerationen. Jedoch sind die einzelnen Spezifikationen nicht als restriktive Randbedingungen zu verstehen, vielmehr sollte der vorgesehene Freiraum dazu genutzt werden, Wettbewerbsvorsprung durch intelligente und effiziente Realisierungen und optionale Zusatzfunktionen zu schaffen. Aufgrund des Standards kann sich der Steuerungshersteller auf eine reduzierte Anzahl von Systemkomponenten konzentrieren, damit aber auch kostengünstigere Systemmodule anbieten. Letztendlich lassen sich mit dieser Maßnahme die Gesamtkosten für die Schraubstationen reduzieren.

Das Konzept für ein standardisiertes Schraubsystem wird durch eine Vielzahl von Randbedingungen geprägt, die in Bild 3-3 zusammengestellt sind. Durch die Gesetzgebung wurden bezüglich der Produkthaftung neue Voraussetzungen für die Gestaltung von Qualitätssicherungssystemen geschaffen. Wie bereits aufgezeigt, erfordert dies im Bereich der Schraubtechnik, insbesondere bei sicherheitsrelevanten Verschraubungen, einen erhöhten Aufwand an der Aufbereitung von Prozeßdaten. Ziel ist es dabei nicht unbedingt, einen lückenlos dokumentierten Produktionsprozeß vorzuweisen, sondern aufzuzeigen, daß die Fertigungsprozesse sicher und im statistischen Sinne beherrschbar sind. Dabei ist in besonderem Maße der 'Stand der Technik' zu berücksichtigen, da dieser Begriff im rechtlichen Zusammenhang mit DIN ISO 9000 relevant ist.

Weiterhin ist die gesamte Produktionsumgebung von Bedeutung, in der die Schraubstationen integriert sind. Je nach Struktur der Anordnung und Vernetzungsmöglichkeiten der Produktionsmittel sollte auch entsprechend die Schraubstation gestaltet sein. Dies umfaßt den Bereich von einer kommunikativen Anbindung bis hin zur vollständigen Integration der Materialfluß- und Ablaufsteuerung in die Schraubstation. Die Schraubersteuerungen müssen in der Lage sein, diese verschiedenen Anforderungen abdecken zu können.

Auch die Produktionsfaktoren, wie z. B. Stückzahlen, Varianten, Losgrößen wirken sich nachhaltig auf das geforderte Leistungsprofil von Schraubersteuerungen aus. Aus diesen Kriterien ergeben sich zumeist die Anforderungen bezüglich technologischer Leistungsmerkmale wie Taktzeit, Variantenflexibilität und Umrüstzeit.

Nicht zuletzt das Produkt selbst mit den entsprechenden Schraubstellen beeinflusst die Gestaltung der Schraubstation. So ist beispielsweise die Zugänglichkeit oft ausschlaggebend für eine manuelle oder automatische Montage. Insbesondere die Analyse der Schraubfälle ergibt spezielle Anforderungen an die einzusetzende Schraubtechnologie. Eine Vielzahl verschiedener Einflußparameter bezüglich des vorliegenden Schraubfalles sind bei der Auswahl des geeigneten Schraubverfahrens von Bedeutung.

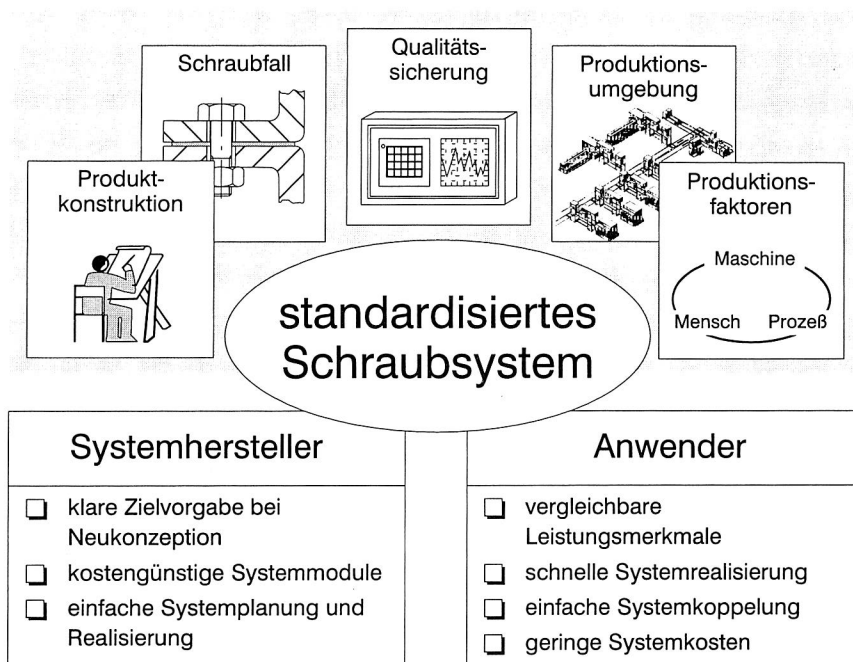


Bild 3-3: Einflußkriterien auf die Standardisierung von Schraubsystemen und Nutzen der Standardisierung für die Anwender und Systemhersteller

Bei der Definition des Leistungsprofils von standardisierten Schraubsystemen sind diese Einflußkriterien maßgeblich zu berücksichtigen.

3.2 Leistungsprofil standardisierter Schraubsysteme

Wie im vorhergehenden Kapitel aufgezeigt wurde, müssen die Standardisierungsbestrebungen in der Schraubtechnik in Abhängigkeit von genau spezifizierten Klassen erfolgen, um angepasste und vorallem kostengünstige Gesamtlösungen realisieren zu können. Bislang gibt es allerdings keine Kategorien für Schraubersteuerungen, wie sie z. B. bei SPS oder anderen Automatisierungskomponenten üblich sind. Im folgenden wird eine Klassifizierungssystematik vorgestellt, die sich grob an dem Entwurf der VDI-Richtlinie "Einsatz von Schraubsystemen in der Automobilindustrie" orientiert [124]. Aus den definierten Mindestanforderungen werden in Kapitel 3.3 die Konsequenzen für den Einsatz von standardisierten Schraubsystemen abgeleitet.

3.2.1 Klassifizierungssystematik

Zur deskriptiven Beurteilung von Schraubsteuerungen eignet sich eine Klassifizierung der Steuerungen nach dem Umfang und der Leistung der eingesetzten Technologiefunktionen. Eine Untergliederung in einfache, komplexe und multifunktionale Steuerungen kann jedoch nur als erste Orientierungshilfe dienen, da viele Schraubersteuerungen nicht eindeutig einer Leistungsklasse zugeordnet werden können. Auch dürfen Schraubersteuerungen nicht alleine nach schraubtechnologischen Funktionen eingeordnet und beurteilt werden, da die notwendigen Schnittstellen zur Einbindung in ein Montagesystem sehr stark die Leistungsfähigkeit und letztendlich die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems mitbestimmen.

Die Klassifizierungssystematik orientiert sich deshalb zum einen am spezifischen Einsatzfeld des jeweiligen Schraubfalles, zum anderen am Grad der Automatisierung der Montageplatzes. Es wird unterschieden, in welche Risikoklasse die Verbindung eingeordnet ist, die verschraubt werden soll [124]. Das Risiko bezieht sich auf die Folgen des Versagens einer Schraubstelle (s. a. Kapitel 2.1):

- sicherheitsrelevante Verschraubung (Risikoklasse A):
mittelbare oder unmittelbare Gefahr für den Menschen
- funktionsrelevante Verschraubung (Risikoklasse B):
Funktionsstörung von Baugruppen oder des gesamten Produktes
- untergeordnete Verschraubung (Risikoklasse C):
Verärgerung des Kunden

Bezüglich dem Grad der Automatisierung wird eine Einteilung in

- Handwerkzeug
- Handgehaltene Schraubspindel
- Starr automatisierte Schraubstation
- Hochflexibles Schraubsystem

gewählt. Die einzelnen Klassen werden folgendermaßen spezifiziert:

3.2.2 Spezifikation der Klassen

Handwerkzeug

In diese Klasse entfallen einfache Handwerkzeuge, wie z. B. Knickschlüssel. Selbstverständlich können diese Werkzeuge nicht bezüglich einer Steuerungstechnik klassifiziert werden. Allerdings gibt es elektronische Drehmomentschlüssel, die zumindest hinsichtlich ihrer schnittstellenspezifischen Anbindung zur Datenauswertung berücksichtigt werden.

Handgehaltene Schraubspindel

Die manuelle Montageumgebung ist charakterisiert durch die vorrangige Stellung des Menschen, der Werkstück und Werkzeug handhabt, und den Montageprozeß durch-

führt. Auf das Verschrauben bezogen heißt das, daß der Werker wichtige Funktionen wie

- Schraube vereinzeln,
- Schraube zuführen,
- Schraube voreindrehen,
- Schraubwerkzeug führen,
- Verschraubung auslösen,
- Fehlerreaktionen initiieren,

teilweise oder vollständig manuell ausführt. Nur der eigentliche Anziehvorgang wird automatisiert, über motorisch angetriebene Handschraubspindeln, ausgeführt. Motorische Handschraubgeräte sind die meist verwendeten Geräte in der Montage. Bei [75] wird der Anteil der handgeführten Schraubgeräte auf 62 % beziffert. Gerade in der Automobilmontage ist diese Kategorie von Schraubgeräten wegen vieler handhabungstechnisch aufwendiger und deswegen manueller Vorgänge unentbehrlich. Mehr als die Hälfte aller Verschraubungen werden hier manuell erstellt [76], [77].

Die Kosten für eine Lösung mit entsprechend qualifiziertem Montagepersonal sind oftmals niedriger als für eine aufwendige, vollautomatische Systemlösung zur Schrauberhandhabung. Auch die Flexibilität bezüglich Schrauber- und Werkzeugwechsel spricht in vielen Fällen für eine manuelle Schraubmontage. Um einen effizienten Montageablauf zu gewährleisten und eine bessere Verschraubungsqualität zu ermöglichen stehen auch für manuelle Schraubstationen eine Vielzahl von teilautomatisierten Vorrichtungen und Geräten zur Verfügung. Hierzu zählen beispielsweise

- Werkzeugwechsel-Magazin (intelligenter Stecknußkasten, etc.),
- Schraubenzuführung,
- Anzeigen- und Bedienfeld.

Bei der Entwicklung eines standardisierten Schraubsystems ist die Ansteuerung dieser Systemkomponenten unbedingt zu berücksichtigen.

Starr automatisierte Schraubstation

Die starr automatisierten Schraubstationen sind charakterisiert durch hoch spezialisierte Montageautomaten, die auf einen festen Montagevorgang abgestimmt besonders hohe Produktivität gewährleisten sollen. Hierbei sind teil- und vollautomatische Anlagen zu unterscheiden.

Die Halbautomaten sind gekennzeichnet durch die manuelle Beschickung mit den Werkstücken oder manuelles Handling von Vorrichtungen. Der Schraubvorgang wird von Hand gestartet und läuft danach vollautomatisch ab. Zur Kategorie der Halbautomaten gehören auch handgeführte Mehrfachschräuber, bei denen mehrere synchron arbeitende Spindeln zu einer Einheit zusammengefaßt sind. Diese Geräte werden vom Werker über Hilfsvorrichtungen, wie z. B. Balancer, an die Verschraubungsposition ge-

bracht. Das resultierende Reaktionsmoment wird dabei durch das Handlingsystem abgefangen. Mehrfachschrauber werden eingesetzt wenn z. B. die Bandtaktzeit zu kurz ist, um die Montageaufgabe mit einem einzelnen Schrauber zu erfüllen, oder konstruktive Vorgaben beispielsweise das synchrone Anziehen ein solches Gerät erfordern. Ein typisches Beispiel aus der Automobilindustrie ist das Verschrauben der Räder am Fahrzeug mit einem Mehrfachschrauber [88].

In einem Vollautomaten läuft das Werkstück automatisch in die Montagestation ein und wird in die Verschraubungsposition gebracht. Sobald die Schraube korrekt zugeführt ist, startet der automatische Verschraubungsvorgang. Die Schraubenvereinzelnung und -zuführung wird in der Regel durch Vibrationswendelförderer in Verbindung mit einer Druckluftzuführung der Schrauben über Schläuche übernommen. Das Pick-and-Place-Verfahren zur Schraubenaufnahme eignet sich aufgrund der kurzen Taktzeiten meist nicht.

Wichtig für beide Anlagentypen ist die große Prozeßsicherheit der Schraubanlage und das hohe Qualitätsniveau der Verschraubung. Fehler und Störungen wirken sich bei den kurzen Taktzeiten und der starren Verkettung in einer meist geschlossenen Montagelinie besonders auf die Produktivität und Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems aus. Die Steuerung der Anlage muß deshalb in der Lage sein, eine schlechte Verschraubung zu erkennen und gegebenenfalls zu beheben bzw. eine Anweisung an den Bediener auszugeben. Kann der Fehler nicht behoben werden, so ist das Werkstück an die Nacharbeitsstation auszuschleusen [88].

Hochflexibles Schraubsystem

Vollautomatische Schraubstationen, die unterschiedliche Schraubenformen und -größen in verschiedenen angeordneten Schraubbildern verarbeiten können [52], werden der Klasse der hochflexiblen Schraubsysteme zugeordnet [85], [112]. Für eine Schraubersteuerung, die in einer solchen Systemumgebung eingesetzt wird, bedeutet dies, daß in Abhängigkeit von der Schraubstelle und des Produktes bzw. der Produktvariante das zugeordnete Verschraubungsprogramm angestoßen werden muß. Die Identifikationssysteme, wie Barcodeleser oder Schreib-/Lesestationen für mobile Datenträgersysteme, sind über die Ablaufsteuerung oder nach Möglichkeit direkt an das Steuerungssystem der Schraubspindel anzubinden. Erst so ist eine eindeutige Verknüpfung von Prozeß- und Produktdaten gewährleistet. Bislang bieten jedoch erst wenige Schraubersteuerungen eine Schnittstelle zur direkten Anbindung von Identifikationssystemen [78].

Auch das Montageumfeld von flexibel automatisierten Schraubsystemen muß einen erheblich größeren Aufgabenumfang bewältigen als bei einem starren System. Die Systemkomponenten sind hierbei gekennzeichnet durch eine hohe Flexibilität und einen hohen Automatisierungsgrad. Neben einem leistungsfähigen Handhabungsgerät sind spezielle Einrichtungen für die Schrauben-, Schrauber- und Werkzeughandhabung erforderlich, die einen schnellen, automatisierten Wechsel ermöglichen.

Wie bereits bei den starren Schraubstationen aufgezeigt, sind hohe Anforderungen an die Prozeßsicherheit der flexiblen Montageanlage zu stellen. Zudem ist eine breiter angelegte Qualitätssicherung bezüglich der zu erfassenden Prozeßparameter erforderlich, da der Schraubprozeß aufgrund der Flexibilitätsanforderungen sehr unterschiedliche Ausprägungen haben kann.

3.3 Ausprägungen der funktionalen Kriterien – Technologische Anforderungen an das Standardsystem

Anhand der Klassifizierungssystematik werden elementare Aussagen bezüglich den Anforderungen an die Schraubersteuerungen getroffen, die angepaßt an die jeweilige Einsatzumgebung zu konzipieren sind. Im Bild 3-4 sind die Kennzeichen der festgelegten Anwendungsklassen gegenübergestellt. Die Grafik zeigt außerdem die Einsatzfelder, bei denen es wegen sicherheitstechnischer Anforderungen unbedingt erforderlich ist, elektronische Schraubsteuerungen einzusetzen, und Bereiche, bei denen es zukünftig aufgrund von erhöhten Qualitätsanforderungen oder einem prozeßtechnisch schwer zu beherrschenden Schraubfall verstärkt zum Einsatz dieser Steuerungssysteme kommen wird.

3.3.1 Anforderungen an das Steuerungssystem für handgehaltene Schraubspindeln

Wie das Bild 3-4 zeigt, ist der Einsatzbereich von gesteuerten Handschraubspindeln für untergeordnete Schraubfälle nicht von Bedeutung, da diese Verschraubungen mit wesentlich einfacheren und kostengünstigeren Werkzeugen, wie z. B. Druckluft-Abschaltspindeln montiert werden können. Eine Ausnahme bildet hier der Einsatz eines intelligenten Nußwechselkastens, der den Einsatz einer Schraubersteuerung notwendig macht.

Schraubfälle der Klasse B und A sollten dagegen bereits mit gesteuerten Systemen verschraubt werden, da hier zumindest die Zielgröße durch eine geeignete Sensorik gemessen werden muß [124]. Werden keine elektronischen Steuerungen eingesetzt, so ist auf jeden Fall ein separates Überwachungssystem notwendig, wie es in Kapitel 4 dargestellt wird.

Handgehaltene Schraubwerkzeuge werden sehr häufig im Stand-Alone-Betrieb eingesetzt. Für diesen Einsatzbereich ist es ausreichend, eine einkanalige, nicht erweiterbare und damit auch kostengünstige Schraubersteuerung vorzusehen. Soll mehr als eine Spindel in einer Station betrieben werden, so ist es sinnvoll, auf ein erweiterbares System in Rackbauweise zurückzugreifen. Diese Rackversion (siehe auch Bild 3-7) muß einen Bereich von zwei bis vier Schraubkanälen abdecken. Dabei sollte es möglich sein, die Systemhardware zu erweitern, um eine gewisse Anpassung an variable Systemzusammenstellungen zu gewährleisten.

Die für intelligente Handschraubspindeln eingesetzte Steuerungstechnik braucht nur einfache Verfahren, wie z. B. das Drehmomentverfahren, beherrschen. Der Programm-

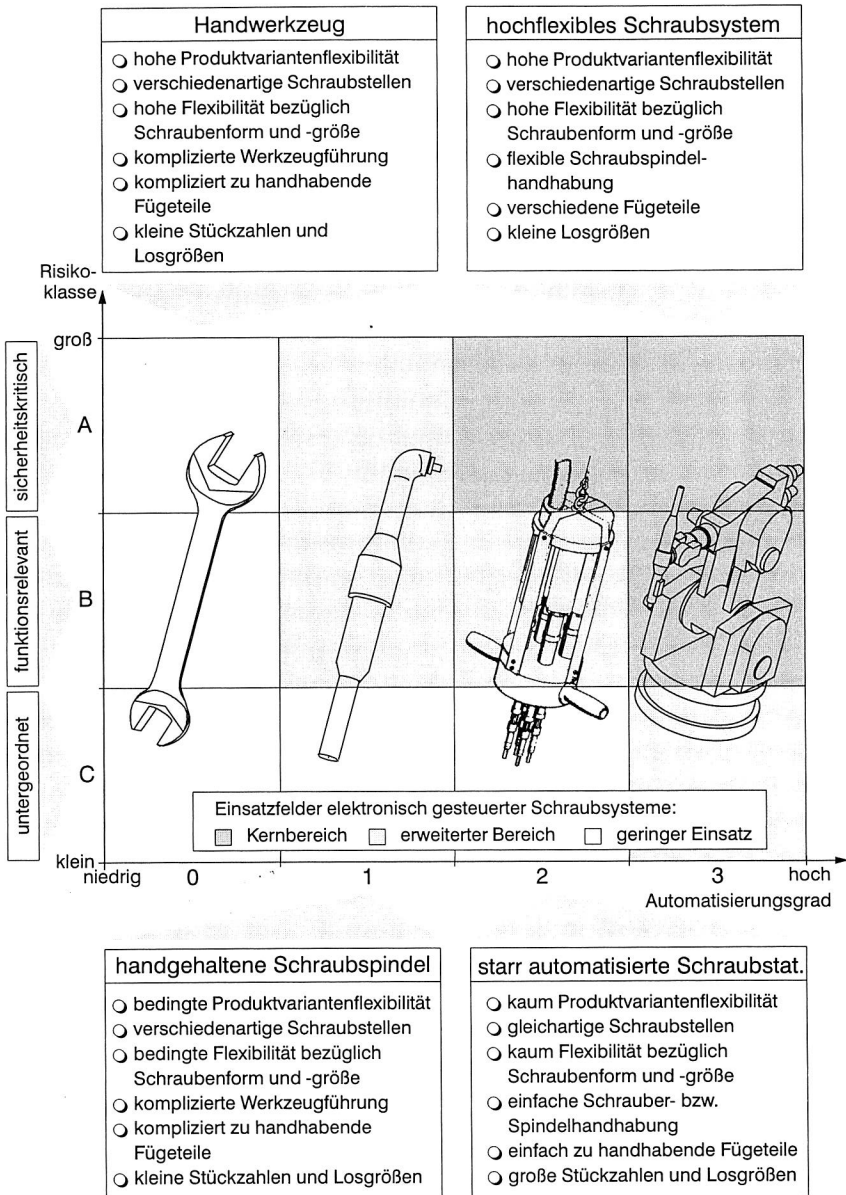


Bild 3-4: Einflußkriterien auf den Automatisierungsgrad von Schraubarbeitsplätzen und Einsatzfelder von elektronisch gesteuerten Schraubsystemen

speicher soll dabei über mindestens zwei Verschraubungsprogramme verfügen und zweistufige Schraubverfahren zulassen, damit der Flexibilität der manuellen Montage Rechnung getragen werden kann. Die Anwahl des entsprechenden Programmes kann durch den Werker oder über eine übergeordnete Ablaufsteuerung erfolgen.

Eine interessante und kostengünstige Alternative zur Drehmomentsteuerung bietet die Motorstromsteuerung. Da zusätzliche Sensorbaugruppen am Handschrauber wegfallen, läßt sich die Schraubspindel zudem sehr ergonomisch gestalten. Hochwertige Anziehverfahren, wie das streckgrenzgesteuerte, sind für Handschrauber generell nicht vorzusehen, da bei manueller Schrauberführung die definierte Abstützung des Winkelgebers und damit die exakte Drehwinkelzählung nicht gewährleistet ist.

Zur Verschraubung von Bauteilen der Risikoklasse A ist es unbedingt erforderlich, den Prozeß durch eine zusätzliche Überwachungsfunktion (Drehmoment-, Drehwinkel-, Zeitüberwachung etc.) abzusichern, wobei Steuer- und Zielparameter nicht identisch sein dürfen. Werden als Überwachungsverfahren drehwinkelbasierende Funktionen gewählt, so ist hier auf die jeweilige Schraubanwendung bezogen, die Unsicherheit bezüglich der Winkelzählung zu berücksichtigen.

Die Bewertung der Schrauberergebnisse ist in der manuellen Systemumgebung insbesondere bei den sicherheitskritischen Schraubfällen erforderlich. Hierbei genügt es nicht, die IO- oder NIO- Meldung an einem kleinen Display oder über kleine Leuchtdioden an der Schraubersteuerung auszugeben. Der Werker muß über eine Anzeigeeinheit, die direkt am Schraubwerkzeug angebracht ist oder über akkustische Signale die Ergebnisbewertung erkennen können. Wenn es die Produktionsumgebung zuläßt, Nacharbeiten vor Ort zu erledigen, so ist es sinnvoll, auch spezielle Werkerinformationen auszugeben. Hierüber bekommt der Werker mitgeteilt, weshalb die Verschraubung als NIO eingestuft wurde, und kann mit dieser Information sehr gezielt die Reparaturmaßnahmen anstoßen.

Auch für die manuelle Montage kann es sinnvoll sein, komplette Schraubverlaufskurven für die weitergehende externe Verschraubungsanalyse bereitzustellen. Die Schraubkurvenverfassung und -bereitstellung ist aus Kostengründen allerdings nur optional vorzusehen.

In Bild 3-5 sind die Mindestanforderungen zusammengestellt, die an ein standardisiertes Schraubsystem hinsichtlich eingesetzter Technologie und der Ausgabe der Prozeßinformationen zu stellen sind.

3.3.2 Auswirkungen auf automatisierte Schraubsysteme

Der Haupteinsatzbereich von Schraubersteuerungen liegt im Bereich der starr und flexibel automatisierten Montageumgebung. Speziell für funktions- und sicherheitsrelevante Verschraubungen ist es unumgänglich, elektronisch gesteuerte Schraubspindeln einzusetzen. Das Verschraubungsprogramm für starr automatisierte Systeme sollte dabei mindestens 4 Verschraubungsstufen ermöglichen, um den Schraubprozeß technologisch angepaßt und zeitoptimiert durchführen zu können. Der Programmspeicher

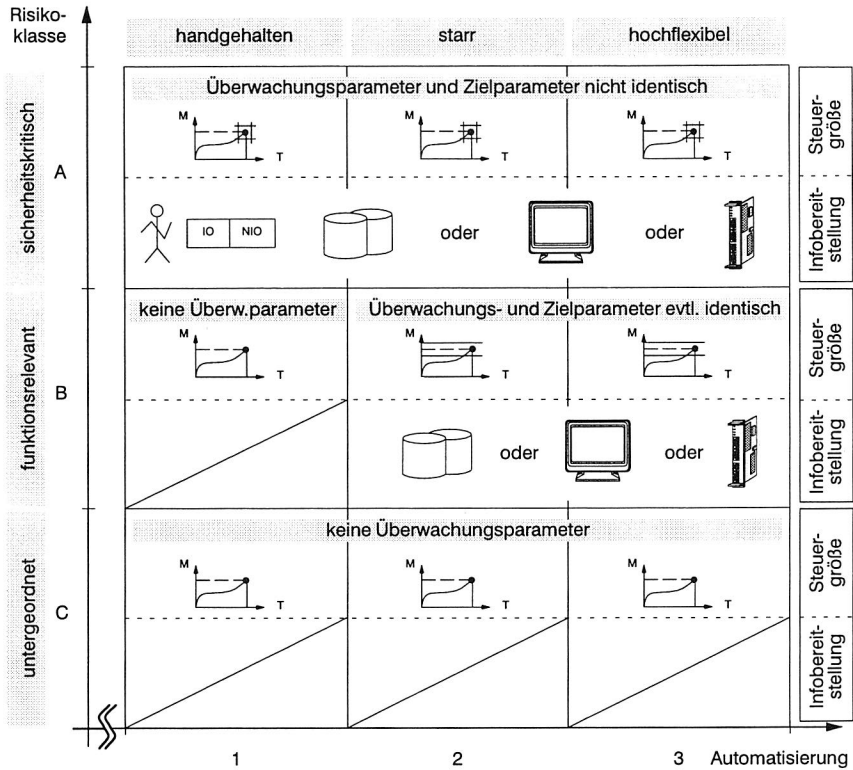


Bild 3-5: Technische Mindestanforderungen an Schraubsysteme bezüglich Ziel- und Überwachungsfunktionen, sowie Datenbereitstellung

sollte trotz starrer Automatisierung mindestens 6 komplette Schraubabläufe (Tab. 3-1) zur Verfügung stellen, um gezielt auf Verschraubungsfehler durch Neuverschrauben oder Nachziehen der Schraube zu reagieren. Für flexible Systeme sind bezüglich der Anzahl der Schraubstufen meist höhere Anforderungen zu stellen. Es gibt bereits Steuerungssysteme, die eine freie Kombination beliebig vieler Schraubstufen ermöglicht. Der Programmspeicher sollte mindestens die Abspeicherung von 10 Schraubabläufen zulassen, um eine hohe Flexibilität bezüglich der unterschiedlichen Schraubfälle zu erreichen.

Automatisierungsgrad →	hand- gehalten	starr auto- matisiert	hoch- flexibel
minimale Anzahl Schraubabläufe	≥ 2	≥ 6	≥ 10
minimale Anzahl Schraubstufen je Ablauf	≥ 2	≥ 4	≥ 4

Tab. 3-1: Mindestanforderung an die Anzahl realisierbarer Schraubabläufe und -stufen

Die Schrauberführung durch Handhabungsgeräte und Achssysteme gewährleistet eine gute Reproduzierbarkeit der Bewegung. Somit können auch reproduzierbare Winkelwerte erreicht werden. Als Minimalforderung sind deshalb für diese Schraubsysteme die beiden Zielfunktionen Drehmoment- und Drehwinkelsteuerung vorzusehen. Sonderschraubverfahren wie z. B. das Direktverschrauben in Metallen und Kunststoffen sollten zumindest optional realisierbar sein, um spezifisch angepaßt an den jeweiligen Schraubfall montieren zu können.

Im Vergleich zur manuellen Schrauberhandhabung ist die Höchstzahl von 4 Schraubkanälen nicht als ausreichend anzusehen. So sind beispielsweise bei einer simultanen Verschraubung von Zylinderköpfen im Minimum bereits 10 Schraubkanäle erforderlich. Eine Analyse der Praxisbeispiele hat gezeigt, daß das Steuerungssystem auf bis zu 32 Kanäle ausbaubar sein sollte. Nur für ein hochflexibles Schraubsystem kann aufgrund der Flexibilität des Handhabungsgerätes eine Schraubspindel für mehrere Schraubstellen eingesetzt werden. In den meisten Fällen wird es deshalb ausreichend sein, eine zwei- bis vierkanalige Kompaktsteuerung einzusetzen.

Für die automatisierten Systeme ist es dringend erforderlich, eine hohe Prozeßsicherheit zu gewährleisten. Als Standard sind die Überwachungsfunktionen Drehmoment, Drehwinkel und auch die Zeit zu sehen. Von den in Kapitel 2.2.3 gezeigten kombinierten Überwachungsverfahren sind Einschraub- und Stick-Slip-Überwachung zumindest optional in der Steuerung vorzusehen.

Die Schraubergebnisbewertung ist in der automatisierten Umgebung als sehr wichtig einzustufen, um eine automatische Ausschußführung realisieren zu können. Es muß deshalb möglich sein den Fehlerstatus differenziert zu gestalten sein. Eine frei programmierbare Logik bezüglich der Überwachungsparameter und -verfahren ermöglicht eine gezielte Fehlerzuordnung. Somit kann diese Grundaufgabe der Qualitätssicherung sehr nahe am Schraubprozeß realisiert werden. Die Ausgabe der Ergebnisbewertung und des Fehlercodes ist für diese Anwendungsklasse möglichst flexibel zu gestalten, so daß unterschiedlichste Systemkomponenten die Ablaufsteuerung übernehmen können.

Im Zusammenhang mit der Ergebnisbewertung ist auch die Analyse der Verschraubungskurve von Interesse. Verschraubungskurven im automatisierten Schraubereinsatz müssen eine hohe Überwachungssicherheit und exakte Prozeßanalyse ermöglichen. Deshalb ist es notwendig, zusätzlich zu den üblichen Schraubverlaufskurven parametrierbare Diagramme aus frei definierbaren Wertepaaren der eingesetzten Steuer-

und Überwachungsparameter zu bilden. Der notwendige Hard- und Softwareaufwand läßt sich allerdings nur noch durch den Einsatz eines integrierten Mikrorechners lösen.

Es ist erstrebenswert, hier einen Regelkreis aufzubauen, um schwankende Verschraubungsbedingungen durch gezielte Reaktionen kompensieren zu können. Im Kapitel 5 wird gezeigt, wie für eine hochflexible Schraubstation, die über einen Industrie-PC gesteuert wird, ein solcher Prozeßregelkreis aufgebaut werden kann.

3.4 Standardisierung der Datenstrecke

Im folgenden wird ein Konzept für die Standardisierung der Schnittstellen zur Prozeß- und Systemprogrammierung, zur Datenerfassung sowie zur Anlagensteuerung vorgestellt. Hierbei wird insbesondere die Anbindung von Schraubstationen über Kommunikationsnetze aufgezeigt, da dies eine zukunftsweisende Alternative darstellt [73].

Seitens der Systemanwender ist nicht davon auszugehen, daß sich eine Mehrheit für eine einheitliche, feste Schnittstellengestaltung durchsetzen läßt. Vielmehr ist Flexibilität gefordert, da in den Produktionsumgebungen meist verschiedene Kommunikationssysteme und Randbedingungen vorhanden sind. Deshalb ist anzustreben, sich auf eine beschränkte Anzahl wichtiger Schnittstellenspezifikationen und Bussysteme festzulegen [108]. Dies setzt voraus, daß zum einen die entsprechende Modularität der Hardware (siehe Bild 3-7), und zum anderen die spezifische Anpassung auch durch die Software in der Konzeption berücksichtigt wird. Dabei muß der Aufwand für die Kommunikationsanbindung im Verhältnis zu den allgemeinen Ansprüchen und Leistungskriterien der jeweiligen Schraubersteuerung stehen. Denn alleine die Möglichkeiten vorzusehen, mehrere Schnittstellen optional bereitzustellen, sind für die Gesamtkosten der Steuerung nicht unerheblich.

Im weiteren werden für jede Aufgabenstellung mögliche Lösungen aufgrund verschiedener Randbedingungen vorgeschlagen. Jedoch soll hier nicht zu stark auf konkrete Spezifikationen eingegangen werden, da diese zum großen Teil anwenderspezifisch veränderbar bzw. anpaßbar sein sollen.

3.4.1 Vernetzte Schraubstationen

Der Trend zur Vernetzung von Fertigungssystemen in einer Fabrik setzt sich mehr und mehr auch bei der wichtigsten Montagetechnologie durch. In zunehmendem Maße werden Schraubsysteme und -stationen durch ein fabrikweites Netzwerk verbunden. Die Vernetzung gewinnt insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Qualitätssicherung und der zentralen Programmierung und Parametrierung der Schraubersteuerungen zunehmend an Bedeutung. Die Vernetzung hat hierbei zwei grundsätzliche Zielvorgaben zu erfüllen,

- die zentrale und aktive Steuerung sowie
- die passive Überwachung der Schraubprozesse im Sinne der Qualitätssicherung.

Durch die Vernetzung wird es möglich, die Schraubparameter und -verfahren von zentralen Stellen aus einzugeben und zu ändern. Anpassungen an veränderte Prozeßbedingungen oder eine Anpassung der Schraubabläufe sind so einfacher und gezielter umzusetzen [107].

Problematisch gestaltet sich derzeit die Anbindung unterschiedlicher Fabrikate und Versionen von Steuerungen an ein einheitliches Netz. Prinzipiell gibt es hierbei zwei Möglichkeiten, die Schraubsteuerung an ein Netzwerk anzubinden. Entweder bietet die Schraubersteuerung selbst eine Schnittstelle für ein Bussystem. Ansonsten wird der Einsatz eines speziellen Interface notwendig. Dieses Interface kann z. B. ein speziell angepaßtes Koppelmodul oder auch ein eigener Mikrorechner sein, der mit einer entsprechenden Mehrfach-Schnittstellenkarte ausgestattet, an das Bussystem angeschlossen wird. Bild 3-6 veranschaulicht diese beiden Ankopplungsmöglichkeiten. Darüberhinaus kann die Schraubsteuerung über die stationseigene SPS an einen Datenbus angekoppelt werden.

Entscheidend für die Auswahl einer Ankopplungsart sind nicht zuletzt die Gesamtkosten für eine Vielzahl zu realisierender Busanbindungen. Die Lösung mit einem Schnittstellenrechner mit entsprechender Busanbindung zur übergeordneten Prozeßebene und einfachen seriellen Schnittstellen zur Anbindung der einzelnen Schraubersteuerungen ist sicher zunächst als die kostengünstigste Alternative anzusehen, da übliche serielle Schnittstellen wesentlich billiger als eine Busanbindung sind. Ursächliches Problem ist, daß über diese Busanbindung meist nur der Datentransfer für die Schraubdatendokumentation und -auswertung aus der Schraubersteuerung funktioniert, und nicht auch die Parametrierung der Steuerung. Dies widerspricht jedoch der sinnvollen Forderung, ein Bussystem möglichst umfassend zu nutzen.

Ähnliches gilt für die Ankopplung über speziell für diese Aufgabenstellung entwickelte Koppelmodule. Zudem ist der Entwicklungs- und Realisierungsaufwand für Hard- und Software relativ hoch, wobei zu bedenken ist, daß derartige Lösungen immer einen teuren Sonderweg darstellen. Die alternative Ankopplung über eine Stations-SPS muß kritisch betrachtet werden, insbesondere wenn die Übertragung kompletter Schraubverlaufskurven an übergeordnete Steuerungsebenen notwendig sind; die SPS-interne Kommunikation wird durch die hohe erforderliche Übertragungsleistung erheblich behindert.

Bisher ist bei den meisten Schraubsteuerungen eine direkte Busankopplung nur mit erheblichem Aufwand durchzuführen. Die Erfahrung zeigt auch, daß Probleme durch die Vernetzung erst entstehen, da kommerzielle Steuerungen im allgemeinen nicht netzfähig sind. Durch falsche Datenübertragung aufgrund unsicherer Protokolle entstehen Fehler und Schwierigkeiten, die es ohne eine Vernetzung nicht gegeben hätte. Unsichere oder gar ausfallende Prozesse, die den Einsatz von Notstrategien erforderlich machen, um die Fertigung aufrechtzuerhalten, sind die mögliche Folge.

Für die Konzeption neuer Schraubsteuerungsgenerationen ist es deshalb unumgänglich, von vornherein geeignete und standardisierte Koppelungsmöglichkeiten vorzusehen, um kostengünstige Gesamtlösungen aufzubauen. Hierbei ist es notwendig, zwi-

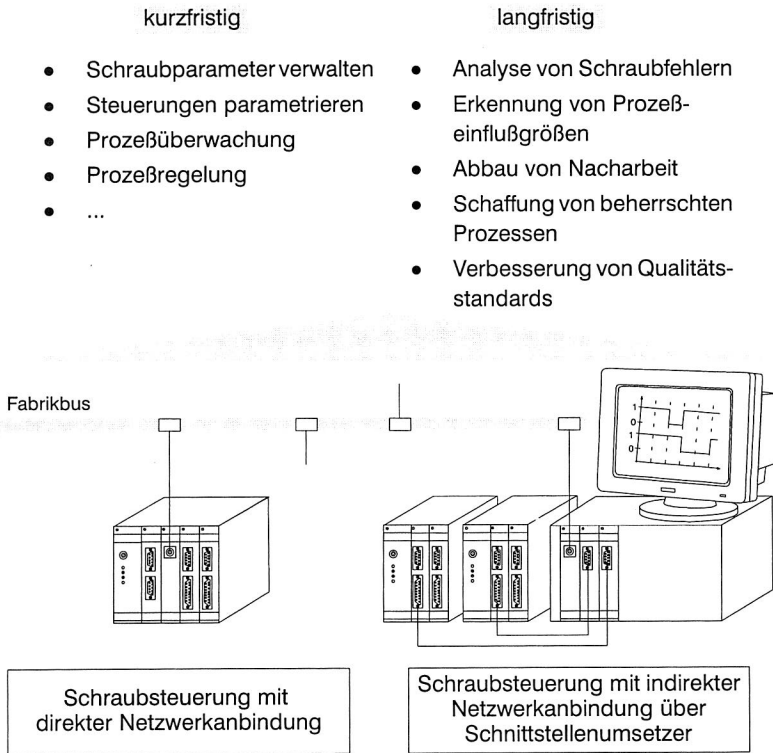


Bild 3-6: Direkte und indirekte Anbindung der Schraubersteuerungen an Fabriknetzwerke

schen der daten- und steuertechnischen Vernetzung zu unterscheiden. Die beiden Bereiche sind in Bild 3-1 deutlich zu unterscheiden. Bezüglich der einzusetzenden Bussysteme ist deshalb zwischen Daten- und Steuerbus zu unterscheiden.

Eingesetzte Datenbusse für die Prozeßdatenerfassung

Der Datenbus wird in erster Linie zur Übertragung komplexer Informationen in Form von einzelnen Daten oder Datensätzen eingesetzt. Auf die Schraubtechnologie bezogen sind das z. B. Identnummern, Solldaten, Istwerte, Schraubverlaufskurven sowie komplette Schraubprogramme. Diese dienen zwar der Steuerung des Schraubablaufes, jedoch kann die reine Datenübertragung vom Programmiergerät in die Schraubersteuerung eher als mittelbare Dienstfunktion denn als direkte Steuerungsfunktion angesehen

werden. Zumeist ist die Integration dieser Funktion in einer Busankopplung realisiert, die auch die Schraubdatenübertragung aus der Schraubersteuerung in übergeordnete Komponenten leistet. Zur Datenübertragung über weite Strecken empfiehlt sich die Anwendung von Protokollen wie IPX (z. B. Novell-Net) und TCP/IP, die meist auf Ethernet als Übertragungsmedium aufsetzen. Nicht zu empfehlen ist der Einsatz von hersteller-spezifischen, u. U. sogar kostengünstigeren Bussystemen, da sich hierdurch nur eine geringe Flexibilität bezüglich des Gesamtsystemaufbaus ergibt.

Steuerbusse zum Anbindung der Automatisierungskomponenten

Da eine SPS meist Schwierigkeiten im schnellen Handling großer Datenmengen hat, wie es das Übertragen komplexer Verschraubungskurven innerhalb von kurzen Taktzeiten darstellt, ist eine Trennung von Datenbus und Steuerbus unumgänglich. Der Steuerbus dient der direkten Kopplung der Anlagen- mit der Schraubersteuerung sowie weiteren Automatisierungskomponenten und Sensoren. Dieser ist in der Regel auf den Einsatz von speicherprogrammierbaren Steuerungen abgestimmt und ermöglicht eine sehr schnelle Datenübertragung von geringen Datenmengen. Auf der Feldbusebene hat sich in der Fertigungsautomatisierung für das Ansprechen intelligenter Feldgeräte der Profibus durchgesetzt [100].

3.4.2 Differenzierte Betrachtung der standardisierten Schnittstellen

Bei der Konzeption eines standardisierten Schraubsystems ist unbedingt darauf zu achten, daß dem Anwender differente Schnittstellen optional bereitgestellt werden müssen. Dies erfordert gerade bei mehrkanaligen Schraubsystemen einen Steuerungsaufbau in Rack-Bauweise, um eine schnelle und flexible Systemrealisierung zu erreichen.

Programmierschnittstelle

Bei einkanaligen Kompaktsteuerungen erfolgt die Programmierung meist direkt an der Steuerung. Ein Standard ist hier nicht vorzusehen, da diese Schnittstelle sehr hersteller-spezifisch ausgeführt ist. Erfolgt dagegen die Parametrierung über externe Programmiergeräte, die direkt an das Steuerungssystem angeschlossen werden, wie z. B. Laptops, so sind einfache serielle Schnittstellen mit flexibel einstellbaren Hardware- und Protokollparametern (Baudrate, Handshakeverfahren, Start- und Stopbits etc.) vorzusehen.

Sollen mehrkanalige Schraubsteuerungen über einen Rechner parametriert werden, so ist eine serielle Schnittstelle, besser noch eine Ethernet-Anbindung, zu realisieren. Wie in Bild 3-7 dargestellt, erfordert dies jedoch eine interne Verbindung der Steuerungskarten über das Rack-System.

Schnittstelle zur Datenerfassung

Bei handgehaltenen Schraubsystemen, insbesondere bei Stand-Alone-Systemen, genügt es, standardmäßig für die Datenerfassung einfache serielle Schnittstellen vorzuse-

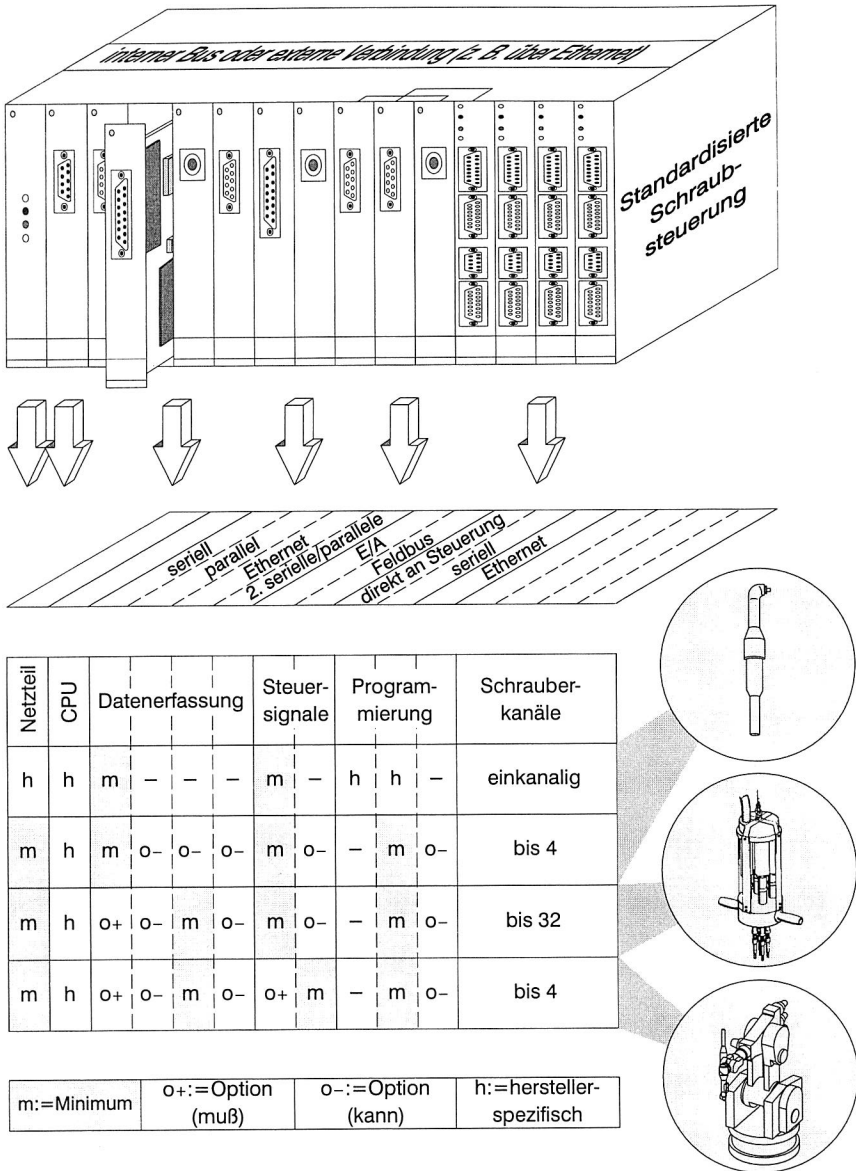


Bild 3-7: Modular aufgebautes Schraubsteuerungssystem mit standardisierten Schnittstellen

hen, die jedoch, wie bereits der Programmierung aufgezeigt, auf die verschiedenen Randbedingungen einstellbar sein müssen. Bei automatisierten Schraubanwendungen und bei sicherheitskritischen Schraubfällen ist aufgrund des hohen Datenaufkommens und der notwendigen Anbindung an übergeordnete QS-Systeme unbedingt eine leistungsfähige Vernetzung erforderlich [70]. Für diese Aufgabenstellung eignet sich von der Hardwareplattform das Ethernet, da hier Übertragungsstrecken im Kilometerbereich erreicht werden können.

Sollen sowohl Parametrierung als auch Datenerfassung über eine Busschnittstelle erfolgen, so ist darauf zu achten, daß die Bidirektionalität des Datenflusses nicht durch die Ankopplungsart an die Schraubersteuerung eingeschränkt wird.

Schnittstellen zum Austausch der Steuersignale

Wie im Kapitel 2.3.3 aufgezeigt, wird der Materialfluß, die Werkstück- und Werkzeug-handhabung sowie die Koordination des Schraubprozesses innerhalb der Montagestation in der Regel von einer übergeordneten Anlagensteuerung übernommen. Die Schnittstelle der Schraubersteuerung zum Austausch der Steuersignale ist hierbei alleine für die Bereitstellung und Entgegennahme der Prozeßsignale aus dem Schraubvorgang zuständig.

Ausschlaggebend für die richtige Wahl dieser Schnittstelle ist zum einen die Anzahl der Schraubkanäle, die mit der Betriebsmittelsteuerung zu verknüpfen sind, zum anderen die Komplexität des Montageprozesses, der von der Anlagensteuerung koordiniert werden muß.

Im Bereich von manuellen Stand-Alone-Stationen und sehr starr automatisierten Schraubstationen mit einfachen Komponenten und Abläufen genügen aufgrund der geringen Anzahl von Signalleitungen einfache E/A-Schnittstellen zum Signalaustausch. Durch eine einheitliche Pin-Belegung ließe sich künftig der Anpassungsaufwand erleichtern.

Sind jedoch mehrere Schrauber in einem Montageabschnitt, der von einer zentralen SPS gesteuert wird, parallel im Einsatz, so ist der Verkabelungsaufwand zwischen den Schraubersteuerungen und der SPS bereits aufwendig. Hierbei sind auch die größere Distanzen, die zwischen den Steuerungen zu überwinden sind, zu berücksichtigen. Für derartige Einsatzbedingungen sollte deshalb ein Feldbussystem zum Austausch der Steuersignale zumindest optional vorgesehen werden (siehe hierzu auch Bild 2-12).

Insbesondere bei hochflexiblen Schraubstationen sind hohe Anforderungen an die Steuerungstechnik der gesamten Montagestation zu stellen. Alleine eine flexible Werkzeug-handhabung über ein mehrachsiges Handhabungsgerät erfordert eine Vielzahl von Sensoren und Vorrichtungen, wie z. B. Wechselsystemen und Werkzeugmagazinen. Für künftige Systemlösungen ist deshalb der Einsatz von leistungsfähigen Feldbussen als Standard zu betrachten. Um jedoch die Einsatzmöglichkeiten nicht zu stark einzuschränken, sollte optional eine konventionelle E/A-Anbindung zum Signalaustausch berücksichtigt werden.

4 Adaptierbares Prozeßdatenerfassungs- und Analysesystem

In der neuen VDI-Richtlinie [124] werden die technischen Mindestanforderungen festgelegt, die an ein Schraubsystem, das in der Automobilindustrie eingesetzt werden soll, gestellt werden. Für die im Bild 4-1 dargestellten Anwendungsfälle führt dies zukünftig zwangsläufig zum Einsatz von Prozeßdatenerfassungssystemen, um die Schraubergebnisse zu dokumentieren und einer weiteren Analyse zugänglich zu machen.

In der automatisierten Montage von funktionsrelevanten, ja sogar sicherheitskritischen Verschraubungen, werden neben elektronisch gesteuerten Schraubspindeln jedoch

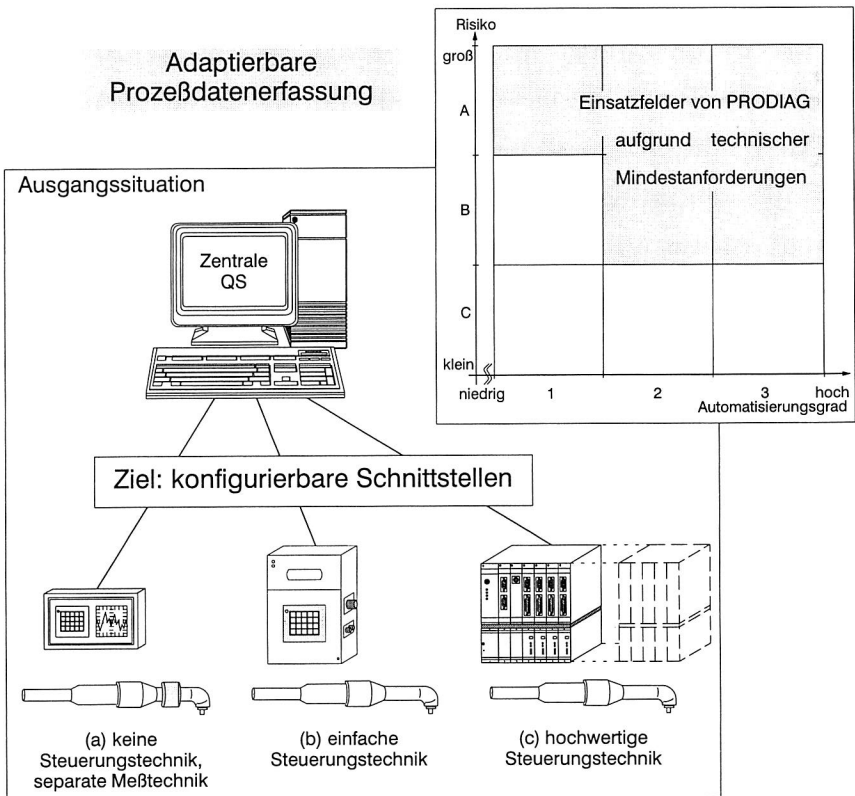


Bild 4-1: Bereitstellung von sicherheits- und funktionsrelevanten Qualitätsdaten durch adaptierbare Erfassungssysteme

noch häufig einfache pneumatische Schrauber mit mechanischer Abschaltung eingesetzt. Um die technischen Anforderungen bezüglich der Ergebnisbereitstellung und hinsichtlich der Steuer- und Kontrollgrößen zu erfüllen, müssen diese Systeme zumindest mit einer eigenen Sensorik zur Erfassung der Prozeßgrößen ausgestattet sein. Im folgenden sind die technischen Systeme zusammengestellt, die die in [124] genannten Kriterien erfüllen:

- (a) pneumatische und elektrische Schraubspindeln ohne elektronische Steuerungstechnik, aber mit integrierter Sensorik zur Erfassung der Kontroll- und Steuergrößen
- (b) elektronisch gesteuerte Schraubspindeln, deren Steuerungen fest eingestellte Datenschnittstellen und feste Dateninhalte aufweisen
- (c) elektronisch gesteuerte Schraubspindeln, deren Steuerungen auf unterschiedliche Datenschnittstellen und Dateninhalte parametrisiert werden können

Insbesondere für die beiden Einsatzfälle (a) und (b) ist ein adaptierbares Datenerfassungssystem notwendig, um gezielt Informationen aus dem Prozeß zu erhalten und an die Qualitätssicherung weiter zu leiten. Die Kombination der verschiedenen Teilsysteme einer Montagestation erfordern eine weitgehend universelle Komponente zur Prozeßdatenerfassung. Auf dem Markt befindliche Erfassungssysteme sind nur an die jeweilige Meßtechnik der Werkzeughersteller angepaßt und in der Funktionalität wenig flexibel [83]. Mit dem entwickelten rechnergestützten **Prozeßdatenerfassungs- und Diagnosesystem** für automatisierte Schraubstationen (**PRODIAG**) wird ein universelles Programmsystem vorgestellt.

4.1 Systembeschreibung von PRODIAG

PRODIAG enthält die Verwaltung der Schnittstellen, die Filter zur Umwandlung der Prozeßdaten, die von den angeschlossenen Schraubsystemen und Meßgeräten übermittelt werden, in ein universelles Datenformat sowie Routinen zur Analyse, Prüfung, Verwaltung und Speicherung der relevanten Verschraubungsdaten zur prozeßbegleitenden Qualitätsprüfung. Zudem bietet PRODIAG die Möglichkeit der Umwandlung der Daten in ein vorgegebenes Format und die Weitergabe der Prozeßinformationen an übergeordnete QS-Systeme. Das Softwarepaket setzt sich aus fünf Modulen zusammen (Bild 4-2):

- Konfiguration der angeschlossenen Schraub- und Meßtechnik
- Datenerfassung
- Trendanalyse (Qualitätsregelkarte) mit Fehlerauswertung
- Langzeitauswertung
- Datenpflege und -vernetzung

PRODIAG wird auf einem Standardrechner installiert. Der Auswerterechner auf PC-Basis fungiert als Plattform für den Zugriff der verantwortlichen Mitarbeiter auf die bereichsspezifischen Daten und bietet damit die Möglichkeit der aktuellen Überwachung und

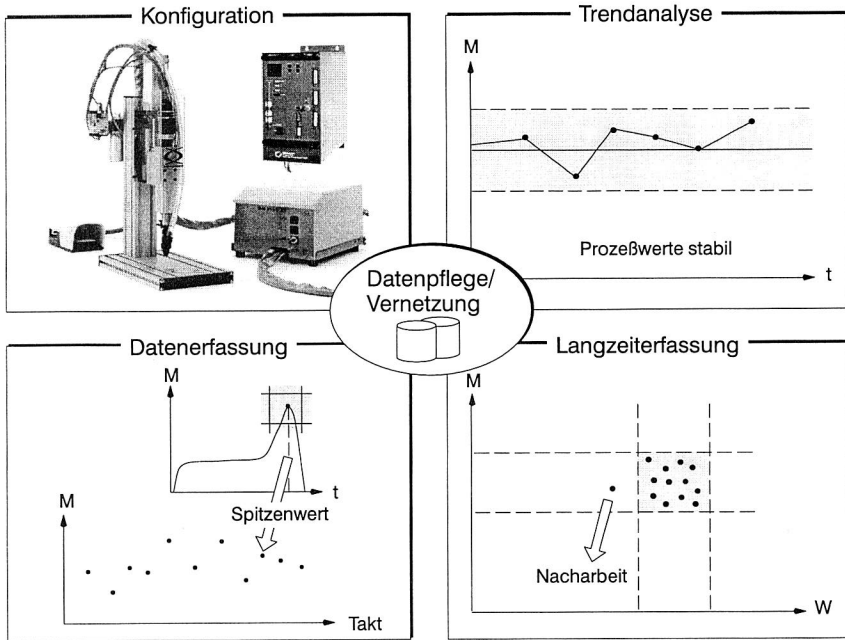


Bild 4-2: Module des Programmsystems PRODIAG zur Prozeßdatenerfassung an automatisierten Schraubsystemen

Regelung der Schraubprozesse. Die zwischen Prozeßsystem und Auswerterechner ausgetauschten Daten können dabei in vier Bereiche aufgeteilt werden:

- ☐ Spitzenwert der Verschraubung
- ☐ Schraubverlaufskurve
- ☐ Fehlerinformation
- ☐ Sollparameter

Im folgenden werden die Anforderungen an die einzelnen Tools spezifiziert.

4.2 Konfiguration der angeschlossenen Schraubtechnik

Die Kernproblematik bei der Konzeption eines universellen Datenerfassungssystems liegt vor allem in der Anpassung an die vielfältigen Schnittstellen und Datenformate. Mit dem Konfigurationsmodul werden alle zu erfassenden Schraubprozesse festgelegt und die jeweils spezifischen Meßketten für die eingesetzte Schraub- und Sensortechnik im Rechner abgebildet. Zwei grundsätzliche Alternativen sind hierbei zu unterscheiden.

An die Datenschnittstelle ist eine

- Schraubsteuerung mit eigener Signalvorverarbeitung
- Meßaufnehmer/Meßgeräte-Konfiguration ohne Prozeßwert-Interpretation

angeschlossen. Das Programm PRODIAG erlaubt die simultane Erfassung der verschiedenen Verschraubungen über 12 getrennte Erfassungskanäle. Jeder Kanal erfasst genau einen Schraubablauf unter Verwendung einer für die Meß- und einfache Schraubtechnik typischen Schnittstelle und speichert diesen in einer Datei ab. Überträgt eine Steuerung die Prozeßergebnisse mehrerer Verschraubungsprogramme über eine Leitung, so sind hierfür auch mehrere Erfassungskanäle erforderlich, die jedoch alle der gleichen physikalischen Schnittstelle zugeordnet sind.

Neben Einzelwerten, wie z. B. Spitzenwert von Drehmoment und Drehwinkel, können auch komplette Schraubverläufe, bei denen der zeitliche Anstieg der Meßgröße aufgezeichnet werden muß, über das Interface aufgenommen werden. Im System PRODIAG wurde beispielhaft die Schraubdatenerfassung über

- serielle RS232 Schnittstellen
- IEC-Bus-Anschluß
- interne PC-Meßkarten

implementiert. Interessant ist diese Kombination deshalb, weil es sich bei RS232 um eine reine Schnittstelle mit Anschluß an genau ein Gerät handelt, der IEC-Bus dagegen ein Bussystem ist, das mehrere Geräte an einem physikalischen Anschluß ermöglicht. Die Anzahl der RS232 Schnittstellen ist durch die Rechnerhardware auf PC-Basis auf maximal vier begrenzt. Spezielle Schnittstellenkarten mit eigenem Datenpuffer erlauben jedoch den Anschluß von bis zu 16 seriellen Interfaces.

4.2.1 Alternativen der Prozeßbankopplung

In Bild 4-3 sind einige Möglichkeiten dargestellt, auf welchem Weg Daten von den verschiedenen Schraubprozessen zum Prozeßrechner gelangen können.

- (a) Mindestens zwei Schraubspindeln sind an eine mehrkanalige Steuerung angeschlossen; die Kommunikationsschnittstelle der Steuerung ist mit genau einer PC-Schnittstelle verbunden. Zur Unterscheidung der Datensätze, werden sowohl die Schraubkanalnummern als auch die Programmkennungen der Schraubstufen interpretiert.
- (b) Ein Schraubwerkzeug ist genau einem Meßgerät mit einer seriellen Schnittstelle zugeordnet.
- (c) Unterschiedliche Schraubspindeln sind an je ein Meßgerät angekoppelt; jedes Gerät hat einen integrierten Busanschluß mit eigener Busadresse (wie z. B. IEC-Bus).
- (d) Der Meßaufnehmer der Schraubspindel wird über eine Meßkarte, die in den PC integriert ist, ausgewertet.

Um die Leistungsfähigkeit von PRODIAG zu verifizieren, wurden analog zu den drei Alternativen die Datenfilter für elektronische Schraubsteuerungen mit serieller Datenaus-

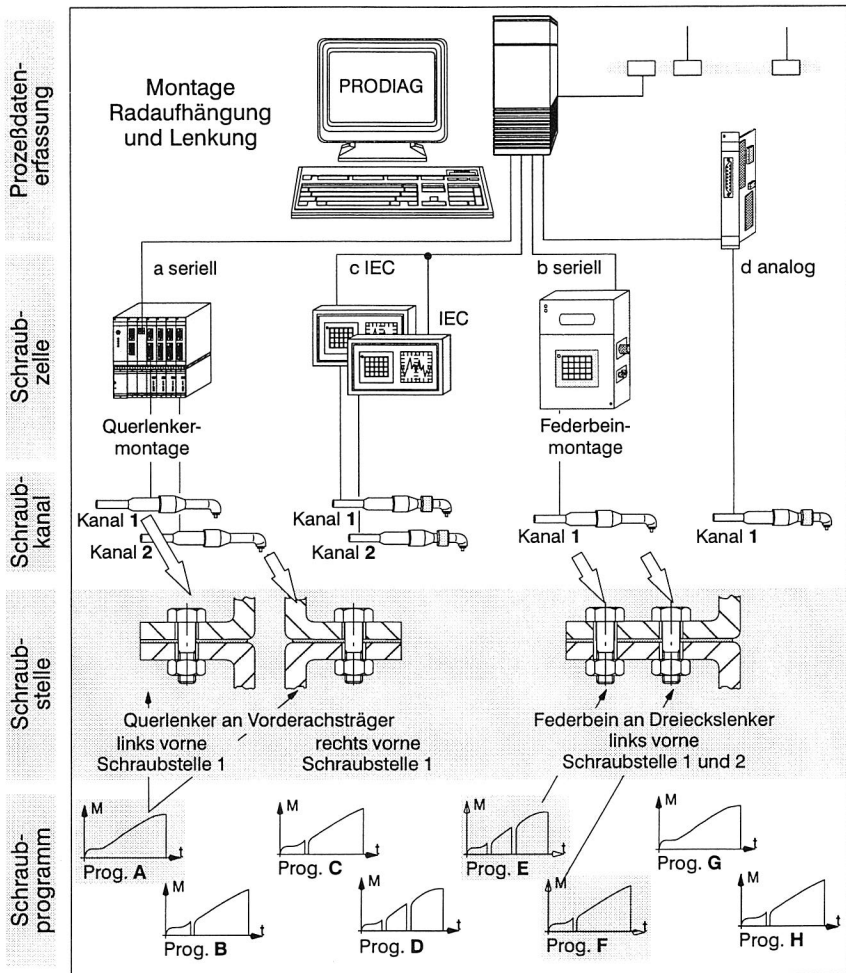


Bild 4-3: Alternativen der Prozeßbankkopplung von Schraubsteuerungen und Meßgeräten

gabe, einen Transientenspeicher mit serieller Datenausgabe und einen Meßmonitor mit IEC-Bus-Schnittstelle realisiert.

4.2.2 Datenflußkonzept

Die Datenbearbeitung in PRODIAG ist angelehnt an das ISO/OSI-Schichtenmodell zur Datenübertragung und deshalb in eine ähnliche Schichtenstruktur unterteilt (Bild 4-4).

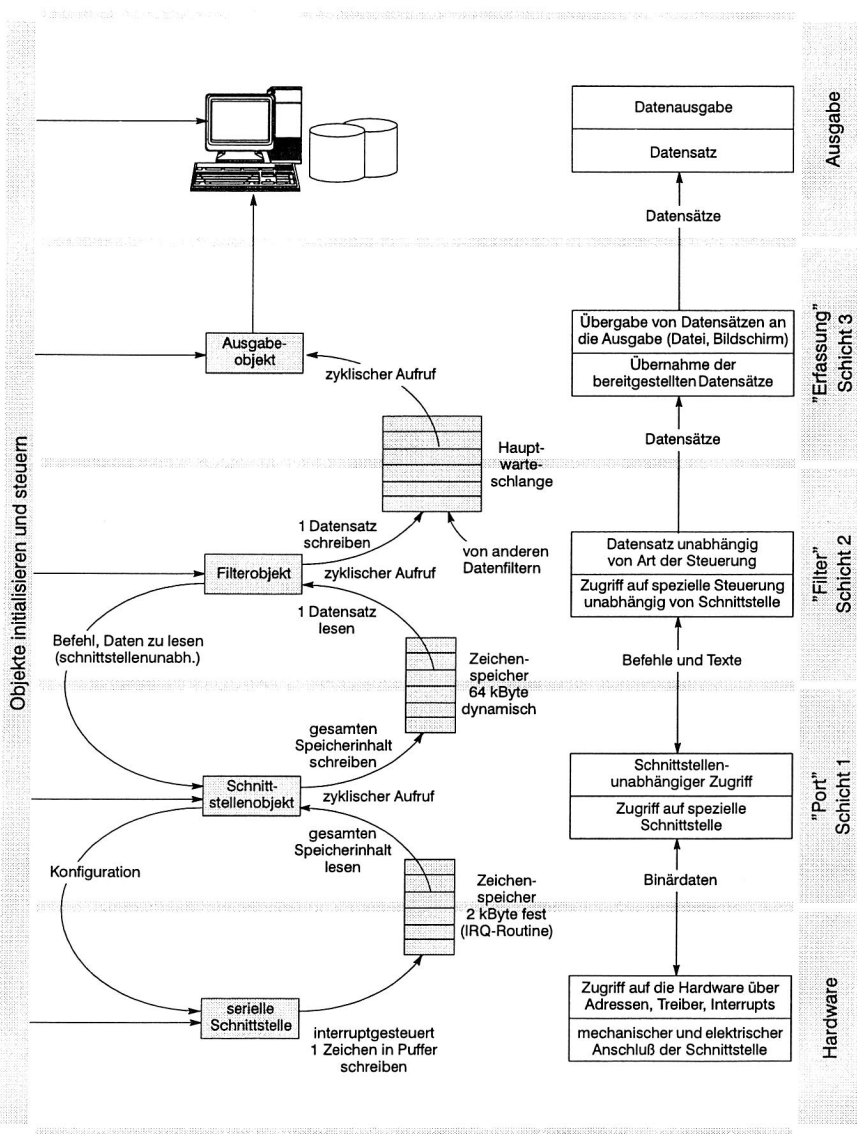


Bild 4-4: Puffer- und Aufrufstruktur im Erfassungsmodul von PRODIAG zur Verdichtung der Prozeßdaten nach dem ISO/OSI-Schichtenmodell

Jede dieser Schichten ist transparent im Sinne des Zugriffs von oben und leistet den angeforderten Dienst durch die Anforderung von Diensten der darunterliegenden Schicht. Die unterste Schicht entspricht der Ebene der Schnittstelle. Sie hat Funktionen wie das Initialisieren der Schnittstelle und das gepufferte Lesen und Schreiben von Zeichenketten.

Die darüber liegende Schicht wandelt die unformatierten Zeichenketten aller Schnittstellen in ein einheitliches Datenformat. Wie beim ISO/OSI-Modell nimmt auch hier der Informationsgehalt der Datenpakete von Schicht zu Schicht zu. In der Schicht der Datenfilter wird die Prozeßinformation der Steuerung (Spitzenwert von Drehmoment und Drehwinkel) durch weitere Daten wie Uhrzeit sowie Art und Name der Schnittstelle ergänzt. Besonders die Herkunft der Daten ist wichtig, da die Daten auf dieser Ebene bereits völlig unabhängig von der Steuerung und der Schnittstelle sind, diese Zuordnung aber weiterhin gebraucht wird.

In der dritten Schicht werden die ebenfalls gepufferten Daten der Filter gesammelt und die logische Verbindung zwischen den verschiedenen Schraubvorgängen zu einer Verschraubung hergestellt. Die Ausfilterung von Datensätzen für komplette Schraubverläufe ist ebenso eine Aufgabe der Schicht 3.

Da PRODIAG objektorientiert programmiert wurde, ließ sich eine derartige Gliederung direkt als Objekthierarchie übernehmen. Jeder physikalischen Schnittstelle bzw. jeder Busadresse wurde ein Objekt zugeordnet, das von einem gemeinsamen Vaterobjekt ererbt wurde. Das hat den entscheidenden Vorteil, daß alle Objekte, die einen gemeinsamen Vorfahren haben untereinander kompatibel sind, und somit jedes Objekt und damit jede Schnittstelle mit den gleichen Methoden gesteuert werden kann, egal ob es sich um eine serielle Schnittstelle oder eine IEC-Bus-Adresse handelt.

Die gesamte Aufrufstruktur einer Erfassung von der Schnittstelle bis zur Datei ist in Bild 4-4 zusammengestellt. PRODIAG bearbeitet alle an der Erfassung beteiligten Objekte in einer Art Multitasking, um eine quasi Echtzeitfähigkeit zu erreichen. Dies ist möglich, da meist nur kurze Überprüfungen in den Objekten stattfinden und ausschließlich beim Vorliegen von Prozeßdaten weitere Aktionen ausgeführt werden müssen. Da kein Timesharing stattfindet, wurde jedes Objekt so programmiert, daß die aufgerufene Methode möglichst schnell wieder verlassen wird, um keine anderen Aufrufe zu blockieren.

4.2.3 Konfiguration der Schnittstellen und Datenfilter

Bevor mit der eigentlichen Datenerfassung begonnen werden kann, ist die Systemumgebung im Rechner abzubilden; außerdem sind einige Grundeinstellungen an der Software vorzunehmen. Das Bild 4-5 zeigt den prinzipiellen Durchlauf der Konfigurationsroutine in PRODIAG. Zu unterscheiden ist dabei grundsätzlich zwischen der Konfiguration der Schnittstelle und Datenfilter sowie der Parametrierung des Meßkanals.

Im eigentlichen Grundschrift des Konfigurationsprozesses wird festgelegt, welcher Datenfilter – also welche Steuerung bzw. welches Meßgerät – der zu parametrierenden

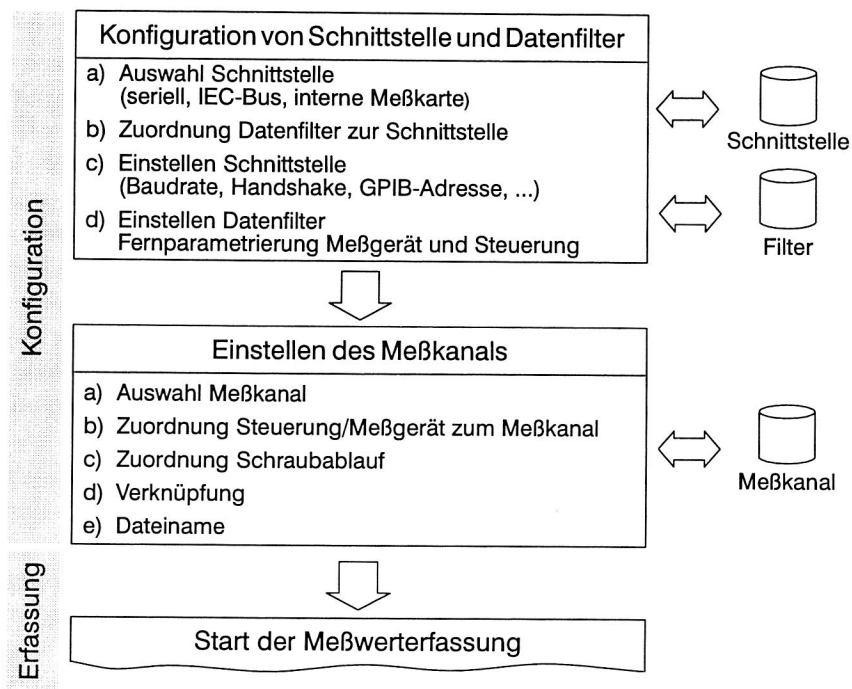


Bild 4-5: Prinzipielle Schritte zur Konfiguration einer Prozeßdatenerfassungsroutine in PRODIAG

Schnittstelle zugeordnet wird. Mit der Auswahl des Filters wird die programminterne Verbindung zwischen Schnittstelle und Filter geschaffen (Bild 4-4).

Neben der Eingabe der geräteabhängigen Schnittstellendaten können bei Bedarf auch gerätespezifische Daten eingegeben werden. Gerade bei Peripherieeinheiten, die eine IEC-Bus-Schnittstelle besitzen, kann mit Hilfe dieses Moduls von PRODIAG aus das angeschlossene Meßgerät fernparametriert werden.

Alle Einstellungen werden für jede Schnittstelle getrennt in den Dateien 'Schnittstelle' und 'Filter' (siehe Bild 4-5) abgespeichert und bei einem erneuten Start von PRODIAG automatisch wieder geladen. In der Regel greift der Benutzer auf die einmal definierte Schnittstelle zurück, da sich die angeschlossene Hardware nur in den seltensten Fällen verändert. Häufiger wechselt jedoch der Schraubfall und damit auch der Schraubablauf, was eine Anpassung des Meßkanals erforderlich macht.

4.2.4 Parametrieren der Meßkanäle

Über das Eingabedialog-Fenster des Meßkanals sind prinzipiell drei Bereiche zu steuern:

- Woher, also von welchem Gerät, stammen die Prozeßdaten?
- Welche Daten sind für die Erfassung relevant?
- Wohin sollen die erfassten Daten geschrieben werden?

In der Eingabeliste sind alle verfügbaren Schnittstellen und die aktuell zum jeweiligen Meßkanal zugeordneten Datenfilter aufgeführt. Wichtig für die Archivierung ist der Name und die Nummer der angeschlossenen Schraubsteuerung und die Datei, in der die Prozeßdaten abgespeichert werden sollen.

Wie bereits dargestellt, nimmt jeder Meßkanal immer nur die Werte einer Schraubstufe – oftmals die letzte Schraubstufe des Schraubablaufs – auf. Ein universelles Erfassungssystem muß jedoch auch Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Datensätzen berücksichtigen. So ist beispielsweise nur im einfachsten Fall der Schraubablauf nach einer einzigen Prozeßstufe beendet. In der Regel wird eine Verschraubung aus mehreren Schraubstufen zusammengesetzt (siehe Kap. 2.2.1). Die Daten jeder Schraubstufe für sich betrachtet sind jedoch nicht ausreichend, um eine sichere Aussage treffen zu können, ob die Verschraubung insgesamt als IO zu bewerten ist. Die einzelnen Schraubstufen gehören logisch zusammen und müssen bei der Archivierung der Daten auch so gekennzeichnet sein (Bild 4-6).

Im Falle einer NIO-Verschraubung wird häufig die u. U. schon eingedrehte oder verklemmte Schraube wieder herausgedreht und der Einschraubvorgang wiederholt. Auch hier gehören die drei Schraubvorgänge zusammen und dürfen auswertungstechnisch nicht getrennt betrachtet werden.

Das System PRODIAG ermöglicht für diese Fälle eine Verknüpfung der Datensätze. Diese sorgt dafür, daß zusammengehörende Verschraubungen identische Laufnummern erhalten. Hierdurch kann jederzeit festgestellt werden, ob und mit welchem Ergebnis eine Wiederholverschraubung erfolgt ist.

4.2.5 Datensimulations- und Testschnittstelle

Zu Testzwecken wurde in PRODIAG ein Simulationsmodul integriert. Ist der Simulator aktiviert, so erzeugt dieser in einem einstellbaren Zeitbereich und frei definierbaren Verhältnis sowohl Gut- als auch Schlechtverschraubungen. Änderungen in der Konfiguration des Simulators, wie z. B. der Vorgabe einer tendenziellen Abweichung des Drehmomentes, wirken sich auf die Datenerfassung ähnlich einem mechanischen Eingriff im realen Schraubprozeß aus.

Die Eingabefelder für die Prozeßwerte Drehmoment und Drehwinkel bestimmen die Spannweite, innerhalb der eine simulierte Verschraubung als IO gilt. Alle Gutverschraubungen streuen innerhalb dieses Bereiches statistisch zufällig nach der Gauß'schen

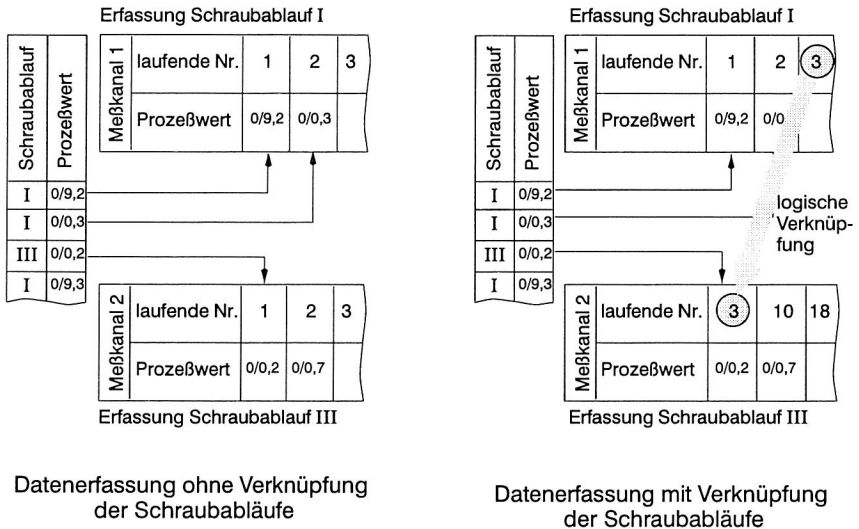


Bild 4-6: Logische Verknüpfung der erfaßten Prozeßdaten

Normalverteilung. Wie im realen Prozeß können hier bei einer Schlechtverschraubung entsprechende Wiederholverschraubungen initiiert werden. Diese Funktion ermöglicht den Test einer Verknüpfung von Datensätzen (Kap. 4.2.4).

Die Simulationsschnittstelle hat sowohl einen internen als auch einen externen Datenausgang. Bei der internen Ausgabe werden die Simulationsdaten an das Erfassungsmodul geliefert. Ansonsten sendet der Simulator die Daten an eine physikalische Schnittstelle. Er eignet sich somit auch zum Test von fremden Programmen zur Schraubdatenerfassung oder der Überprüfung einer Datenübertragung über Kabel.

4.3 Datenerfassung und Trendanalyse der Prozeßdaten

Durch eine zentrale Datenerfassung und -haltung gewinnt die statistische Behandlung und Auswertung von Schraubdaten immer stärker an Bedeutung. Sie bildet die Grundlage für die sichere Beherrschung der Fertigungsprozesse im allgemeinen und in der Schraubtechnik im besonderen.

4.3.1 Statistische Prozeßregelung in der Schraubtechnik

Mit Hilfe von statistischen Analyseverfahren, wie z. B. einer Trendanalyse der erfaßten Prozeßdaten, kann die Qualität des Endprodukts verbessert und der Ausschuß wäh-

rend des Produktionsprozesses auf ein Minimum gesenkt werden. Durch die Beobachtung eines Prozesses wird vorhergesagt, ob ein Prozeß stabil ist bzw. wie sich dieser tendenziell entwickeln wird, um bereits vor dem Auftreten von Störungen einzugreifen und nicht erst nach dem Feststellen der Auswirkungen eines Fehlers [81].

Die kontinuierlich geführte, elektronische Qualitätsregelkarte zeigt den Verlauf der Meßgröße, z. B. das Drehmoment, an. Sie stellt damit ein Instrument für die Qualitätssicherung dar, das Verhalten des Prozesses zu beurteilen. Damit wird die reagierende Qualitätssicherung zur präventiven Qualitätsstrategie, die beherrschte Prozesse regelt, und nicht auf schlechte Prozeßergebnisse durch Aussortieren reagiert [72].

Somit ist die statistische Prozeßregelung (SPC) auch für die Verschraubungstechnik ein ausgezeichnetes Hilfsmittel zur Reduzierung von Schraubfehlern. [129] nennt die wichtigsten Vorteile:

- schnelles Erkennen der Haupteinfluß- und Fehlergrößen
- Reduzierung der Fehlerhäufigkeiten
- Abbau der Nacharbeit
- Verbesserung der Qualität bei Schraubelementen

Trotz aller Vorteile der SPC besteht beim Verschrauben die Problematik der indirekten Klemmkraftmessung. Basis für die Berechnung der Prozeßkennwerte ist das gemessene Drehmoment bzw. der Drehwinkel. Damit gehen alle Unwägbarkeiten, die in diesen beiden Prozeßgrößen stecken, in die Beurteilung des Prozesses mit ein. Das bedeutet, daß ein gemäß den Prozeßkennwerten fähiger und beherrschter Prozeß dennoch große Streubreiten bezüglich der Zielgröße Klemmkraft aufweisen kann. Dieser Umstand muß bei der Beurteilung von Prozessen, die auf der Basis von Hilfsgrößen beruhen, unbedingt berücksichtigt werden.

4.3.2 Elektronische Qualitätsregelkarte in PRODIAG

PRODIAG ermöglicht während der laufenden Erfassung eine Trendanalyse der Meßwerte, die Veränderungen im Schraubprozeß erkennt und an das Bedienpersonal weitermeldet. Hierdurch ist ein präventiver Eingriff durch den Einrichter möglich. Das Ergebnis der Trendanalyse und die relevanten Prozeßwerte werden dabei über eine einfache Onlinegrafik am Bildschirm dargestellt (Bild 4-7).

Die Tendenz von Drehmoment und Drehwinkel wird mit Hilfe der linearen Regression analysiert. Als Datenbasis dienen die Spitzenwerte der letzten Verschraubungen ('PipeLen'), die sich innerhalb der Bandbreite der Regressionsrechnung befinden. Prozeßfehler, bei denen z. B. die Schraube verklemmt oder nicht vorhanden war, dürfen nicht in die Analyse eingehen. Eine derartige Vorgehensweise ist statistisch gerechtfertigt, da Gegenstand der Analyse nur jene Verschraubungen sein dürfen, die nicht voll versagen, sondern aufgrund einer Parameteränderung (Reibwert, Gratbildung etc.) den Gut-Bereich nur wenig verlassen. In Bild 4-7 zeigt die Analyse, daß innerhalb eines Vorausschauungszeitraums 'PreCalc' der Erwartungswert die obere Toleranzgrenze

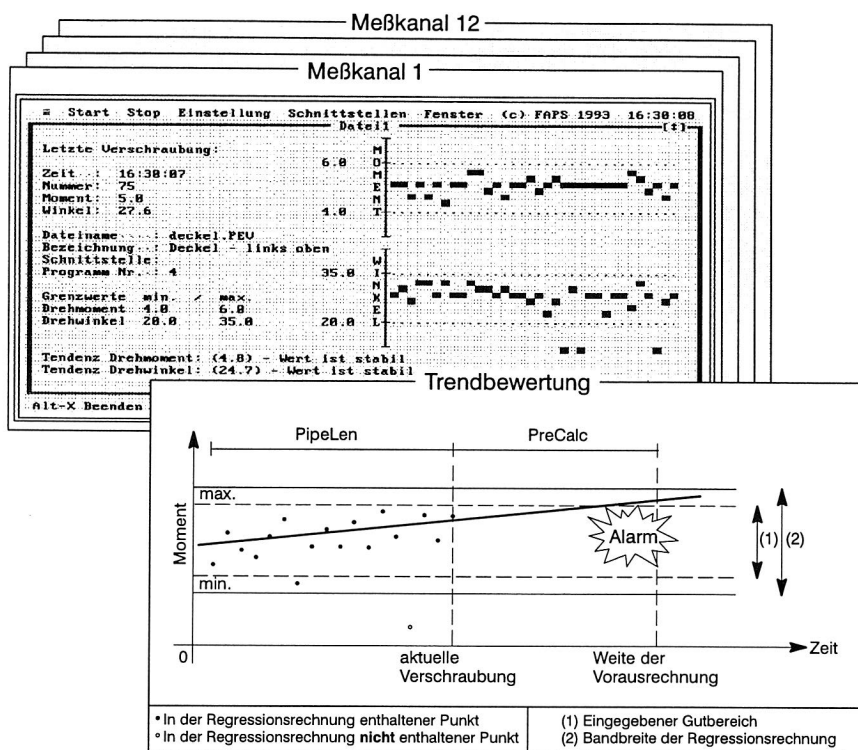


Bild 4-7: Schraubdatenerfassung mit Online-Trendanalyse

des Drehmomentes überschreiten wird. Deshalb wird eine Alarmmeldung initiiert und diese zusammen mit der tendenziellen Entwicklung der Prozeßwerte am Rechner ausgegeben.

4.4 Langzeitauswertung und Datenpflege

Die dokumentierten Prozeßdaten können nach Abschluß der Datenaufnahme über das Auswertemodul nach statistischen Gesichtspunkten grafisch oder alphanumerisch angezeigt und ausgewertet werden. Die alphanumerische Darstellung zeigt einzelne Werte oder Rechenergebnisse genau an, ohne dabei auf den Zusammenhang des Datensatzes in der Gesamtmenge der Daten einzugehen. Die grafische Darstellung vermittelt dagegen einen umfassenden Überblick über die Struktur und Verteilung der Daten.

Zum Auswertemodul von PRODIAG gehören folgende Basis-Funktionen:

- Seriendatenauswertung
- Schraubverlaufkurve
- Kenndatenberechnung
- Datenpflege

4.4.1 Seriendatenauswertung und Schraubverlaufskurven

In der Seriendatenauswertung können getrennt für jeden Meßkanal die Istwerte der einzelnen Verschraubungen angezeigt werden. Über das Modul lassen sich auch komplette Schraubverlaufskurven visualisieren. Hier sind zusätzliche Werkzeuge zur optischen Beurteilung des Schraubverlaufs, wie z. B. Zoomfunktionen, zur Verfügung gestellt.

Die Grafiken in Bild 4-8 zeigen schematisch die Einzelwerte, den durch einen PT₁-Softwarefilter geglätteten Verlauf der Einzelwerte und die Histogramme für die Darstellung der Häufigkeitsverteilung. Aussagekräftig ist hier vor allem die Darstellung des Anziehmomentes über dem Drehwinkel. Aus dieser Darstellung lassen sich zahlreiche Fehler-

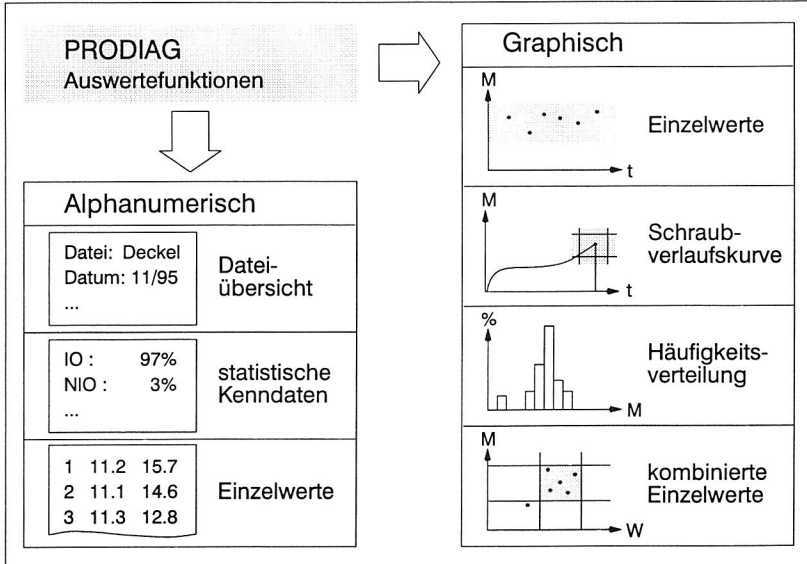


Bild 4-8: Alphanumerische und grafische Auswertefunktionen in PRODIAG

arten ableiten, z. B. Schraube nicht gefunden, Schraube nicht gegriffen oder defektes Gewinde. Gezielt lassen sich damit Nacharbeitsvorgänge anstoßen.

Da PRODIAG objektorientiert programmiert wurde, lassen sich bei der Seriendatenauswertung über die gleichen Methoden beliebige Diagramme aus der gemeinsamen Datenbasis ableiten. Die Anzeige der Einzelwerte ist der einfachste Fall der Darstellung. Das Diagramm greift direkt auf die Elemente von EvBuffer zu (Bild 4-9). Die Darstellung als Histogramm kann als eine andere Sicht auf die gleiche Datenmenge betrachtet werden. Dazu wird zwischen den EvBuffer und das Diagramm ein weiteres Element eingefügt. Dieses liest die Daten aus EvBuffer und stellt die daraus berechneten neuen Daten in genau der gleichen Art wie EvBuffer bereit.

4.4.2 Kenndatenberechnung

Bei der Betrachtung der Ergebnisse, die moderne Präzisions-Schraubwerkzeuge leisten, zeigt sich, daß die Verteilung der Prozeßregelgrößen bei einem stabilen und beherrschten Prozeß der Normalverteilung entspricht. Für normalverteilte Grundgesamtheiten von Werten gibt es zwei wichtige Größen:

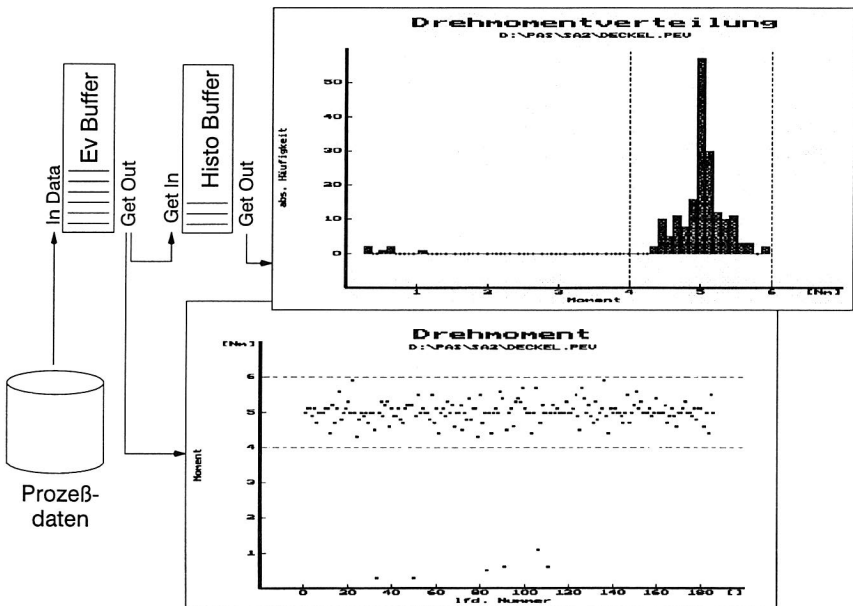


Bild 4-9: Objekte und Methoden zum Erzeugen der unterschiedlichen Diagrammformate aus einer gemeinsamen Datenbasis

- Mittelwert
- Standardabweichung

Aufbauend auf diese beiden Grundgrößen lassen sich eine Reihe von Kennwerten berechnen, die das Verhalten einer Maschine oder eines Prozesses kennzeichnen. Zwei wichtige Kenngrößen sind in diesem Zusammenhang:

- Maschinenfähigkeit
- Prozessfähigkeit

Für beide Größen läßt sich ein Fähigkeitskennwert C_m bzw. C_p und ein kritischer Kennwert für die Fähigkeit C_{mk} bzw. C_{pk} definieren [129]. Die Kenngrößen der Prozeßfähigkeit berechnen sich nach folgenden Vorschriften:

$$C_p = \frac{T_o - T_u}{6 \times \sigma}$$
$$C_{pk} = \text{Min} \left(\frac{T_o - \bar{x}}{3 \times \sigma}; \frac{\bar{x} - T_u}{3 \times \sigma} \right)$$

Das System PRODIAG eignet sich zur automatischen Ermittlung des C_p -Wertes in der Serienmontage. In diese Kenngröße gehen alle das Endresultat beeinflussenden variablen Faktoren, wie z. B. Bediener- und Umgebungseinflüsse, mit ein. Man erhält ein Maß für die Eignung des Prozesses für die Montageaufgabe.

Ein Prozeß gilt als fähig, wenn für beide Werte gilt $C_p \geq 1,33$ und $C_{pk} \geq 1,33$. Ziel ist die sogenannte zentrierte Fertigung, d. h. der Mittelwert des Prozesses liegt bei geringer Streuung möglichst nahe bei dem Mittelwert der vorgegebenen Toleranzgrenzen.

Neben den bereits aufgeführten statistischen Kenndaten läßt sich mit PRODIAG auch der prozentuale Fehleranteil, sowie Größt- und Kleinstwert der IO-Verschraubungen getrennt nach Momenten- und Winkelwerten ermitteln. Die Zeiträume für die einzubeziehenden Daten sind dabei frei wählbar.

5 *Aufbau von Regelkreisstrukturen für das automatisierte Verschrauben*

Zur Erhöhung der Produktivität von automatisierten Schraubstationen sowie zur Sicherung und Verbesserung der Qualität der Schraubprozesse und damit jeder einzelnen Verschraubung bedarf es der Entwicklung von Prozeßsystemen, die Störeinflüsse erkennen, analysieren und kurzfristige Reaktionsmechanismen zur Fehlerkompensation ableiten. Darüber hinaus müssen solche Systeme durch die strukturierte Bereitstellung von Expertenwissen einen wesentlichen Beitrag zur langfristigen Optimierung des Gesamtsystems "Schraubprozeß" im Sinne der Vermeidung von Schraubfehlern durch Beseitigung ihrer Ursachen in den indirekten Einflußbereichen leisten.

5.1 *Prozeßnahe und bereichsübergreifende Regelkeise*

Grundlage für die Strategie der modernen Qualitätssicherung ist das Konzept hierarchisch strukturierter Qualitätsregelkreise [15], [84]. Durch die Rückführung von qualitätsrelevanten Daten aus dem zu regelnden Prozeß, deren Vergleich mit den Vorgaben und die daraus abzuleitende Anpassung bzw. Optimierung der Führungsgrößen des Prozesses über die Stellglieder entsteht ein System, mit dessen Hilfe der Übergang von der passiven Steuerung zur aktiven und präventiven Regelung von Fertigungs- und Montageabläufen vollzogen werden kann.

Die Regelungsstrukturen greifen dabei in unterschiedlichen Spannweiten. Man unterscheidet dementsprechend prozeß- bzw. maschinennahe und bereichsübergreifende Regelkreise der Qualitätssicherung [15]. Letztere nutzen die Informationen der darunterliegenden Regelstrukturen. Auf diese Weise wird ein System geschaffen, das möglichst viele Einflußbereiche in die Regelung und Optimierung des Zielprozesses einbindet. Erst durch die Integration der Qualitätssicherung der einzelnen Montageprozesse in ein bereichsübergreifendes Qualitätssystem kann aufgrund des angesammelten Wissens über die Wirkungszusammenhänge der Einflußfaktoren eine Optimierung der Teilprozesse, wie z. B. dem Schraubprozeß, erreicht werden.

Die Aufgaben eines Systems zur Schraubfehleranalyse unterteilen sich entsprechend dem in Bild 5-1 dargestellten Konzept in

- kurzfristige Regelungsmechanismen und
- langfristige Optimierungsstrategien.

Zur kurzfristigen und prozeßnahen Regelung der Schraubqualität sind die spezifischen Prozeßparameter, wie z. B. Solldrehmoment oder Einschraubgeschwindigkeit, zu überwachen und für jede Verschraubung die IO / NIO-Entscheidung herbeizuführen. Diese Entscheidung sollte durch die Einbeziehung von Expertenwissen auf eine wesentlich breite Basis gestellt werden. Die Nutzung einer Wissensbasis macht die Fehlererkennung des Schraubsystems intelligenter und führt somit zu einer Verbesserung der Qualität von Verschraubungen. Auf der Basis einer gezielten Fehleranalyse und

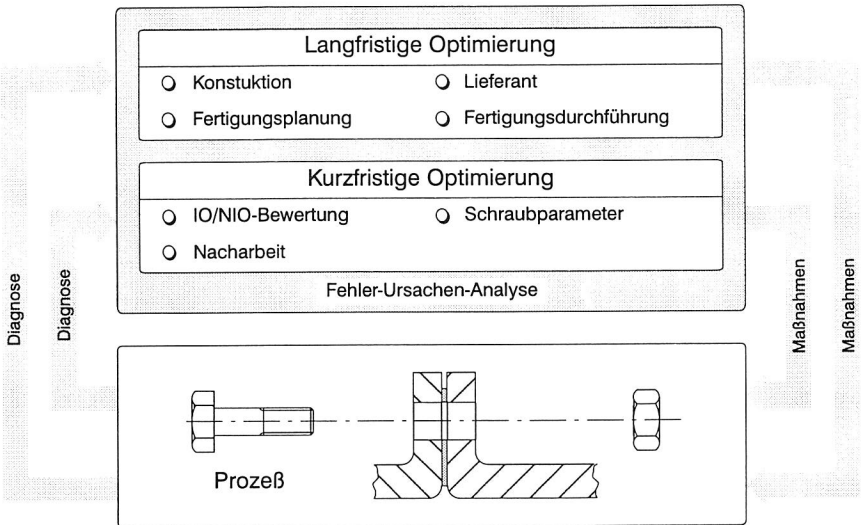


Bild 5-1: Prozeßnahe und bereichsübergreifende Qualitätsregelkreise in der Schraubmontage

-bewertung können hieraus systemspezifische Reaktionen zur Fehlerkompensation abgeleitet werden.

Die Aufgaben einer prozeßnahen Qualitätsregelung müssen während bzw. direkt nach jeder Verschraubung vollzogen werden. Da sich die Analysezeit der teilweise umfangreichen Daten direkt auf die Gesamtzykluszeit der Montagestation auswirkt, müssen die entsprechenden Funktionen auf Stationsebene, am besten direkt in der Schraubsteuerung, realisiert werden.

Die Lokalisierung und Beseitigung der Fehlerursachen kann und darf aber nicht auf den Schraubprozeß selbst beschränkt bleiben. Während auf der Produktionsebene die Analyse und Auswertung von Schraubdaten immer nur auf der Basis der aktuellen Verschraubungen durchgeführt werden kann, stehen auf der bereichsübergreifenden Ebene Schraubdaten über einen längeren Zeitraum und von verschiedenen Schraubstationen zur Verfügung.

Eine weitere notwendige Voraussetzung zur kontinuierlichen Qualitätsverbesserung der Schraubverbindungen ist die Einbeziehung der indirekten Einflußbereiche Produktkonstruktion, Arbeitsplanung, Lieferant und Fertigungsdurchführung in die Fehler-Ursachen-Analyse. Durch die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den festgelegten Merkmalsausprägungen (z. B. Qualität der Schrauben, Festlegung des

Schraubverfahrens) und entstehenden Fehlern gelingt es, an die Ursachen der Probleme zu kommen.

Nur durch die umfassende bereichsübergreifende Betrachtung des Schraubprozesses mit all seinen Einflüssen können Schraubverbindungen und -prozesse zukünftig die Anforderungen bezüglich Zuverlässigkeit und Qualität erfüllen. Im Vordergrund dieser Betrachtungen steht die Verbesserung der Schraubprozesse hinsichtlich der Fehlerentstehung und -vermeidung. Ein System zur Schraubfehleranalyse ist aber in jedem Fall als Teilsystem der Qualitätsabsicherung der Montageprozesse zu sehen. Es stellt eine Ergänzung und keineswegs einen Ersatz der Aufgabenumfänge der Qualitätslenkung dar.

5.2 Prozeß- und Systemanalyse

Wie bereits im Kapitel 2.2 aufgezeigt, ist es in der überwiegenden Zahl von Schraub Anwendungen das Ziel des Prozeßablaufs, eine definierte Vorspannkraft auf einen Schraubverbund aufzubringen. Ein Fehler im Schraubablauf liegt immer dann vor, wenn beim Montagevorgang nicht die vorgeschriebene Klemmkraft in der Schraubverbindung aufgebaut wird. Die Ursache dafür liegt in den internen Störungen und externen Fehlern aus der Teilefertigung und -bereitstellung sowie den organisatorischen und logistischen Planungsfehlern begründet [117]. Oft sind sogar mehrere Ursachen gleichzeitig für die Fehlerentstehung verantwortlich. Die Folge sind erhebliche Störungsraten, die zu Verzögerungen des Montagedurchlaufs und aufwendigen Reparaturschleifen führen und die Verfügbarkeiten der Montagestationen beeinträchtigen [36].

5.2.1 Interne und externe Störungseinflüsse bei der Schraubmontage

Zur systematischen Analyse von Verschraubungsfehlern ist deshalb eine detaillierte Betrachtung der Fehlerursachen notwendig. Hierbei lassen sich zahlreiche interne und externe Störungseinflüsse unterscheiden, die durch Schraube, Werkstück, Schraubwerkzeug, Prozeßsteuerung und nicht zuletzt durch den Bediener bedingt sein können (Bild 5-2).

Einen maßgeblichen Einfluß auf die Qualität der Verbindung und auf die Verfügbarkeit der Montagestation hat die Schraube [32]. Daher ist eine 100 % Prüfung als Endkontrolle des Herstellers wünschenswert. In den meisten Fällen ist dies jedoch wirtschaftlich nicht vertretbar, da die Kosten für Schrauben mit sehr hohen Reinheitsgraden exponentiell ansteigen [36].

Eine große Bedeutung haben Beschädigungen und Verschmutzungen des Gewindes, da sie Fehlverschraubungen und somit Anlagenstörungen zur Folge haben können. Beispielsweise können durch die mechanische Beanspruchung in automatisierten Zuführ- und Ordnungssystemen Abriebpartikel entstehen, die zu einer Verschmutzung der Schraube führen [44].

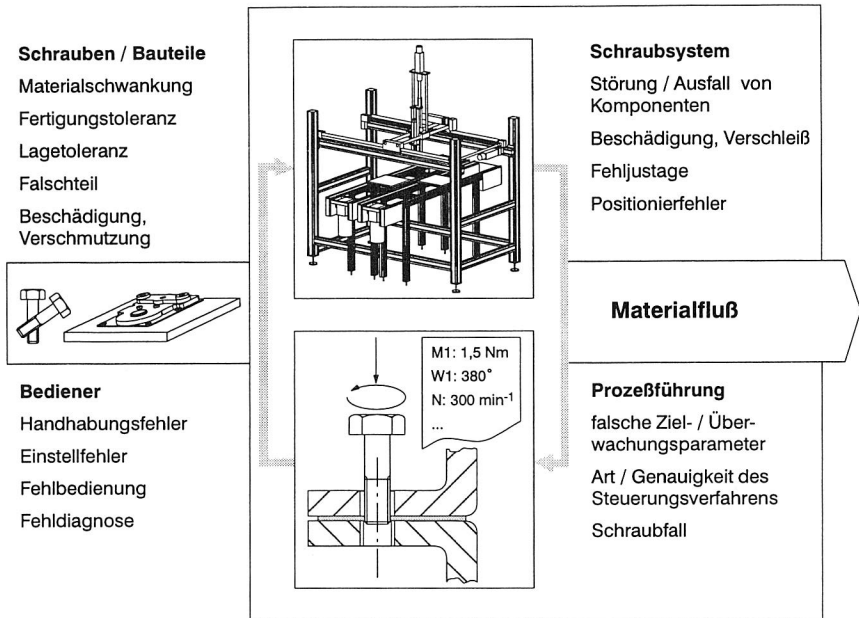


Bild 5-2: Ermittlung der internen und externen Störeinflüsse beim automatisierten Verschrauben durch eine systematische Fehler-Ursachen-Analyse

Bei der Herstellung der Bohrung können verschiedene Fehler und deren Kombinationen auftreten. Eine zu große Kernbohrung kann dazu führen, daß beim Anziehen das Sollmoment nicht erreicht wird, da die Schraube auf Grund plastischer Verformung des Werkstückgewindes durchdreht. Ist die Kernbohrung weniger als 1/10 mm zu klein, so wird in der Regel die Bohrung durch das Gewindeschneidwerkzeug aufgeweitet. Jedoch ergibt sich mit einem verschlissenen Werkzeug ein mangelhaft geschnittenes Gewinde, wodurch ein höheres Reibmoment an den Gewindeflanken auftreten kann. Dies kann im Extremfall zu einem vorzeitigen Abschalten des Schraubvorganges führen.

Fehler können auch durch die Handhabungseinrichtungen selbst hervorgerufen werden. Das Spiel der Schraubspindel und des Werkzeugwechselsflansches hat Einfluß auf die Genauigkeit, mit der eine aufgenommene Schraube in die Bohrung eingeführt wird. Vor allem bei horizontalen Verschraubungsfällen macht sich dieses Spiel bemerkbar. Im Extremfall kann die Schraube nicht in die Bohrung eingeführt werden.

5.2.2 Akquisition und Repräsentation von typischen Verschraubungsfehlern am Beispiel der Endmontage von Automobilen

Bei einer durch den Verfasser durchgeführten Erhebung in einem Automobilwerk wurden eingehende Untersuchungen anhand typischer Schraubfälle in der Endmontage von PKW's vorgenommen. Im Vordergrund standen dabei auftretende Probleme und Fehlerursachen beim Verschrauben von funktions- und sicherheitsrelevanten Verschraubungen. Da die getroffene Auswahl einen Querschnitt durch die sicherheitsempfindlichen Verschraubungsvorgänge in der Endmontage von Fahrzeugen darstellt, können die Ergebnisse der Studie zudem als repräsentativ für die Fehlerarten und -häufigkeiten beim automatisierten Verschrauben von PKW's gesehen werden.

Um die Fehlerschwerpunkte und die ursächlichen Beziehungen dieser Fehler zu den verschiedenen Funktionsträgern des Prozesses aufzuzeigen (siehe Bild 5-2), wurden die Schraubverläufe von Gut- und Fehlverschraubungen analysiert und eine Zuordnung von charakteristischer Kurvenform zum jeweiligen Fehler vorgenommen. Hierbei stand erstmalig sehr umfangreiches Datenmaterial zur Verfügung. Dies ermöglichte ein Datennetzwerk zur prozeßbegleitenden Qualitätsprüfung, an das alle untersuchten Schraubsysteme angebunden waren. Zur Ergänzung und Validierung der Aussagefähigkeit der erzielten Ergebnisse wurden neben der Analyse der Schraubverlauskurven weitere Informationsquellen genutzt:

- Fehlerprotokolle des Montagepersonals
- Fehlerprotokolle in der Nacharbeit
- Visuelle Kontrolle der Montageabläufe
- Wissenspotential des Fertigungspersonals
- Prinzipversuche und -messungen
- Statistische Kenndaten

Im folgenden wird eine Gesamtübersicht der in der Erhebung ermittelten Verschraubungsfehler in Bezug zu den Funktionsträgern gezeigt. Die Ursachenermittlung bezieht sich hierbei auf das Datenmaterial von ca. 200.000 analysierten Verschraubungen!

- Schraube
 - Schraubengewinde fehlerhaft
 - Schraubenantrieb beschädigt
 - Maßabweichungen
- Bauteil
 - Bauteilgewinde beschädigt
 - Fremdkörper im Gewinde (z. B. Späne, Schweißperlen)
 - Rückstände im Gewinde (z. B. Lackreste)
 - Oberfläche oder Beschichtung verletzt
 - Maßabweichungen

- Bediener
 - Eingriff in den Prozeßablauf
 - Handhabungsfehler
- Schraubensystem
 - Schraube fehlt
 - Bauteil fehlt
 - falsche oder fehlende Beilageteile
 - Positionierung der Bauteile fehlerhaft (Schraube schräg angeschraubt, Schraubenantrieb nicht im Werkzeug eingefädelt, etc.)
 - Steuerung blockiert
- Prozeßführung
 - falsche Parameter (Rattern, Schraube nicht vollständig eingeschraubt, Überschreitung der Toleranzgrenzen)

Nahezu die Hälfte aller Fehlverschraubungen sind durch Fremdkörper im Gewinde, wie Späne, Lackreste oder durch ein Setzen des Schraubenverbundes verursacht worden (Bild 5-3). Ein weiterer großer Anteil an Prozeßfehlern liegt in den Handhabungsfehlern begründet. Hierbei greifen die Werker häufig gezielt in den Prozeßablauf ein, um den Verschraubungsvorgang aufgrund eines erkannten Positionierfehlers zu beenden. Allerdings wird der Ablauf teilweise auch durch Handhabungsfehler der Bediener unterbrochen.

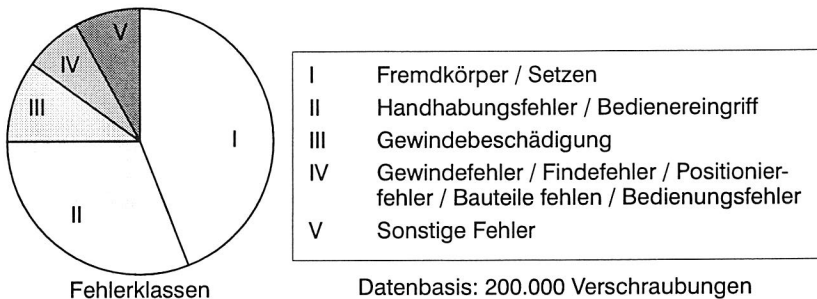


Bild 5-3: Hauptfehlerklassen und deren prozentualen Fehleranteile, die bei der Erhebung in einem Automobilwerk ermittelt wurden

5.3 Erfassung der Prozeßwerte und Peripheriesignale

Um die aufgeführten Fehler frühzeitig erkennen zu können, sind gezielt Informationen aus dem Prozeß notwendig, die einen Rückschluß auf die vorliegenden Fehler zulassen. Neben der Überwachung des Verschraubungsvorgangs muß auch die Überwachung der Peripherie, wie Handhabung, Zuführung und Materialtransport, berücksichtigt und die Ergebnisse dem Bediener und der Steuerung des Prozesses bereitgestellt werden. Hierzu ist eine schrittweise Verfeinerung in separate Subsysteme notwendig, um gezieltere Diagnoseinformationen aus den einzelnen Elementen zu erhalten.

In Bild 5-4 wird das Systemmodell zur Darstellung einer ganzheitlichen Betrachtung der Prozeßdatenerfassung an komplexen, flexibel automatisierten Schraubzellen dargestellt. Die Systemebene unterteilt sich in den eigentlichen Schraubprozeß, den es zu überwachen gilt, und in die anlagenspezifische Systemperipherie, z. B. der Schraubenzuführung. Nur ein Teil der Prozeßgrößen kann laufend gemessen werden und eignet sich damit als Meßgröße zur Prozeßverfolgung.

Die einzelnen Meßgeber liefern analoge und digitale Signale. Durch Verknüpfung und Binärisierung der Signale erhält man ein Meßsignalmuster, das die Basis für umfangreiche, rechnergestützte Diagnosemöglichkeiten bildet. In das Auswertesystem werden diese Signalmuster eingelesen und mit abgelegten Referenzmustern und -kurven verglichen. Bei Übereinstimmungen wird aus der Datenbasis des Diagnosesystems die zugehörige Fehlerursache und mögliche Abhilfemaßnahmen bestimmt. Damit können gezielte Hinweise auf Fehler im Prozeßablauf gegeben werden. Dies ist Voraussetzung für die Prozeßrückführung und damit das Schließen des Prozeßregelkreises.

In den beiden folgenden Kapiteln wird festgelegt, wie ein solches Diagnosesystem aufgebaut sein muß und mit welchen Analysestrukturen die Meßsignalmuster der erfaßten Prozeß- und Peripheriegrößen am geschicktesten auszuwerten sind.

5.4 Aufbau eines Diagnosesystems zur Analyse von Verschraubungsfehlern

Die Realisierung eines Regelkreises zur langfristig orientierten Optimierung der Qualität des Schraubprozesses stellt ein umfangreiches und in seinen Wechselwirkungen äußerst komplexes Problemfeld dar, für dessen Lösung der Einsatz von Expertensystemstrukturen notwendig erscheint. Die Basis zur Umsetzung dieser übergreifenden Qualitätsregelstruktur ist jedoch die Verwirklichung von schnellen, prozeßnahen Regelkreisen. In die Steuerungen müssen Systemstrukturen integriert sein, um eine intelligente Fehlererkennung zu gewährleisten. Hierdurch sollen bisher unerkannte Schraubfehler, die den weiteren Produktionsablauf erheblich stören oder bei Risiko-A-Teilen sogar Sicherheitsrisiken im Betrieb des Produkts hervorrufen, lokalisiert werden. Das zweite Hauptziel ist die Fehlerbehebung bei einer erkannten Fehlverschraubung. So müssen beispielsweise Nacharbeitsanweisungen für den Werker generiert werden, um die notwendige Reparatur der Bauteile sicherzustellen.

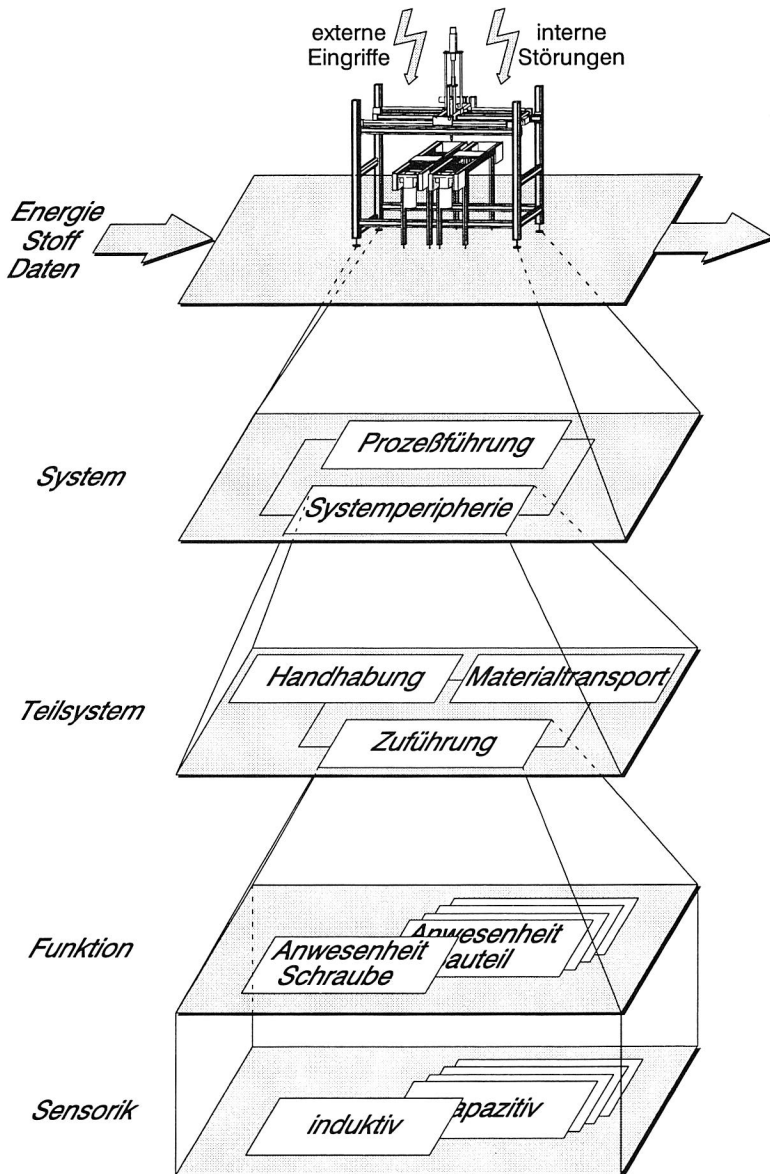


Bild 5-4: Modell zur Prozeß- und Peripheriedatenerfassung an automatisierten Schraubstationen nach einer schrittweisen Zerlegung des Problem-bereichs

In Bild 5-5 ist der prinzipielle Aufbau des realisierten Diagnosesystems zur Schraubfehleranalyse dargestellt. Nach diesem Konzept kann die Analyse der Fehlerursachen zur kurzfristigen Regelung direkt auf der Prozeßebene erfolgen. Die Funktionen des Diagnosesystems sollten dazu als Erweiterung des standardmäßigen Funktionsumfangs in die Schraubsteuerung implementiert werden. Diese umfangreiche Funktionsausweitung bedingt eine Ausdehnung bisheriger Hardwarekonzepte von Schraubsteuerungen. Als schlüssige Lösung bietet sich hier die Realisierung der Steuerungsfunktionen auf der Basis eines PC's an. Das in Kapitel 3.4 gezeigte modular aufgebaute Schraubsteuerungssystem mit standardisierten Schnittstellen eignet sich hervorragend zur Integration dieser Funktionen auf Basis eines in das Steuerungsrack eingebauten Industrie-PC's.

Den Kern eines Diagnosesystems [134] zur Schraubfehleranalyse bilden die methodischen Strukturen zur Ermittlung der Verschraubungsfehler. Für die automatische, zuverlässige und vor allem schnelle Analyse der komplexen Zusammenhänge zwischen Schraubfehler, Fehlermeldung der Steuerung und Schraubverlauf in Gestalt der Momenten-Winkel-Kurve müssen die Daten, die aus der aktuellen Verschraubung zur Verfügung stehen, durch logische Strukturen reduziert werden, um hieraus Regeln zur Analyse der Fehlerursachen abzuleiten.

Zur Auswertung der Verschraubung durch das Diagnosesystem stehen auf der Prozeßseite folgende Daten zur Verfügung:

- Ziel- und Überwachungsparameter
- Spitzen- bzw. Endwerte
- Fehlermeldungen
- Schraubverlaufskurve
- Informationen über den Schraubfall

Im Diagnosesystem wird auf Basis des abgelegten Wissens und der festgelegten Regeln im Verarbeitungsprozeß zunächst die IO / NIO-Entscheidung getroffen. Wird eine Fehlverschraubung diagnostiziert, so wird zusätzlich Fehlerart, -ort und -ursache ausgewiesen sowie Strategien zur Fehlerbehebung in Abhängigkeit von der Art des Fehlers und des Stationstyps abgeleitet. Durch die Rückführung dieser Maßnahmen wird der Qualitätsregelkreis geschlossen. Analog zum Konzept zweier Regelkreise mit unterschiedlichen Spannweiten (siehe Bild 5-1) lassen sich hierbei kurzfristige und langfristige Maßnahmen unterscheiden.

Die kurzfristigen Prozeßeingriffe müssen sich auf die Ausschleusung und/oder die Nacharbeit einer fehlerhaften Verschraubung beschränken, entsprechend den Vorgaben des Diagnosesystems. Die gewonnenen Daten über diese Verschraubung müssen aber auch auf der Leitebene zur Auswertung im bereichsübergreifenden Regelkreis zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich zu den Daten über den Verlauf der Verschraubung sind zur mittel- und langfristigen Auswertung auch Informationen über die Komponenten des Schraubsystems, wie z. B. die Schrauben, die Bauteile, die eingesetzt

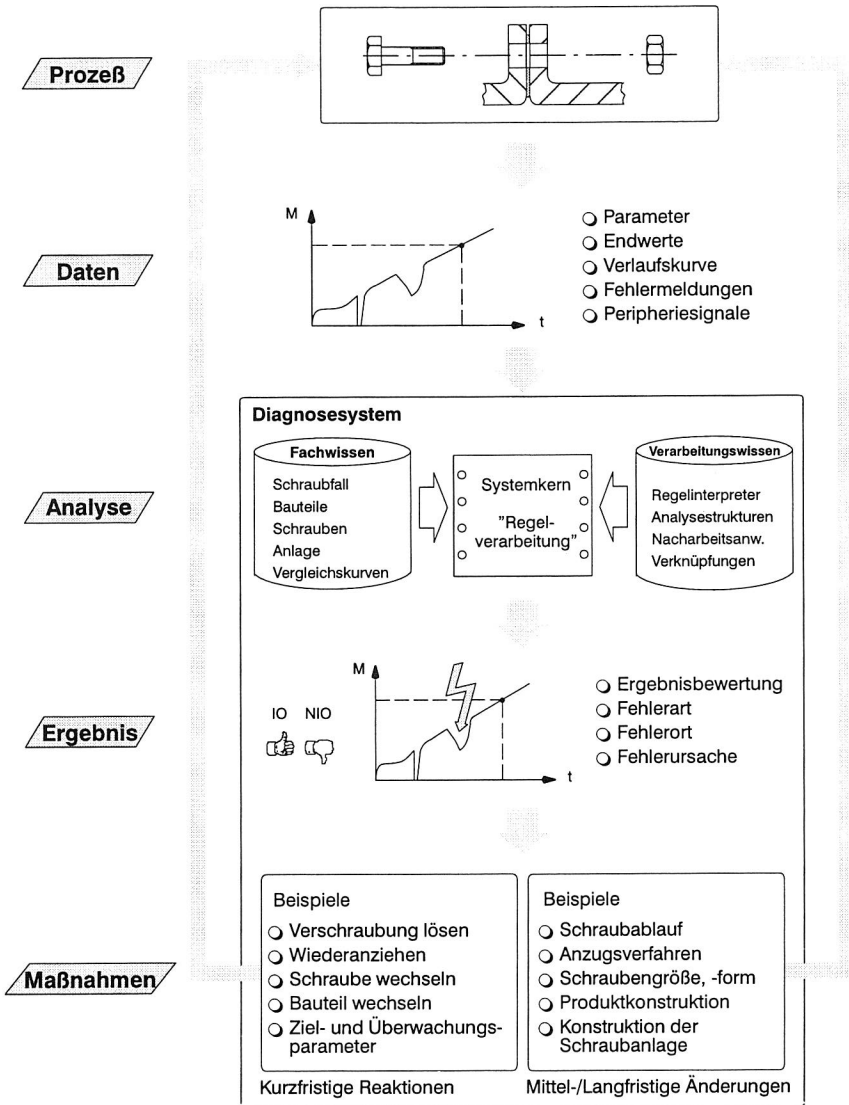


Bild 5-5: Prinzipielle Struktur eines Diagnosesystems zur Schraubfehleranalyse

Werkzeuge oder die Schraubsteuerung, notwendig. Bei [103] werden dazu Datenstrukturen beschrieben, die geeignet sind, die zusätzlich erforderlichen Daten zu erfassen.

Erst durch die umfassende Betrachtung aller Einflußgrößen können langfristige Maßnahmen zur Optimierung des Schraubprozesses festgelegt werden. Dazu gehören z. B. die Anpassung der Schraubabläufe, der Einsatz von zusätzlichen Überwachungsmethoden bei der Verschraubung oder die Initiierung einer Gegenmessung der erzielten Verschraubungswerte über ein Referenzsystem. Auch weitreichendere Maßnahmen, wie z. B. die Änderung der Schraubentyp bzw. -beschichtung bei häufigen reibbedingten Fehlern oder sogar die konstruktive Änderung von Bauteil und Schraubsystem, werden unterstützt durch die Ergebnisse und Erkenntnisse aus einem übergeordneten Qualitätsregelkreis.

5.5 Alternative Analysestrukturen zur Ermittlung von Verschraubungsfehlern auf Prozeßebene

Im Kapitel 5.2 wurde dargelegt, welche internen und externen Störungen den Schraubprozeß beeinflussen und welche Hauptfehler hierdurch bei der teil- und vollautomatisierten Verschraubung auftreten können. In den folgenden Kapiteln werden anhand der analysierten Verschraubungsfehler prinzipielle Analysestrukturen aufgezeigt und deren Eignung für den Einsatz in der Prozeßsteuerung zum Aufbau von schnellen Regelkreisen abgeleitet. Für die unmittelbare Fehler-Ursachen-Analyse stehen auf der Prozeßebene die Meßwerte des Schraubverlaufs zur Verfügung. Hierbei ist zwischen der Betrachtung von Einzelwerten, wie z. B. die Spitzenwerte von Einschraub- und Festschraubphase, oder der kontinuierlichen Bewertung der numerischen Wertepaare aus Drehmoment und Drehwinkel innerhalb von in Teil- und Vollbereichen zu unterscheiden. Es wird deshalb eine Systematik bezüglich drei alternativer Analysestrukturen gewählt, die eine punktuelle, bereichsbezogene oder vollständige Betrachtung des Schraubverlaufs ermöglichen (Bild 5-6).

Zu den punktuellen Verfahren gehört die Beurteilung des Spitzenwertes und die Auswertung von speziellen Fehlermeldungen aus der Schraubsteuerung. Hierbei dient jeweils nur die Lage der Endpunkte des Schraubverlaufs als Kriterium für die Ursache des Schraubfehlers. Die bereichsbezogenen Verfahren überprüfen, ob ein Schraubkurvenabschnitt innerhalb eines bestimmten Toleranzbandes verläuft. Die verlaufsorientierten Verfahren beziehen dagegen die Form der gesamten Schraubverlaufskurve einer oder mehrerer Schraubstufen in die Bewertung der Verschraubung mit ein. Diese Verfahren dürfen nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Vielmehr müssen in einem intelligenten Analysesystem mehrere dieser Methoden kombiniert werden, so daß hybride Strukturen entstehen.

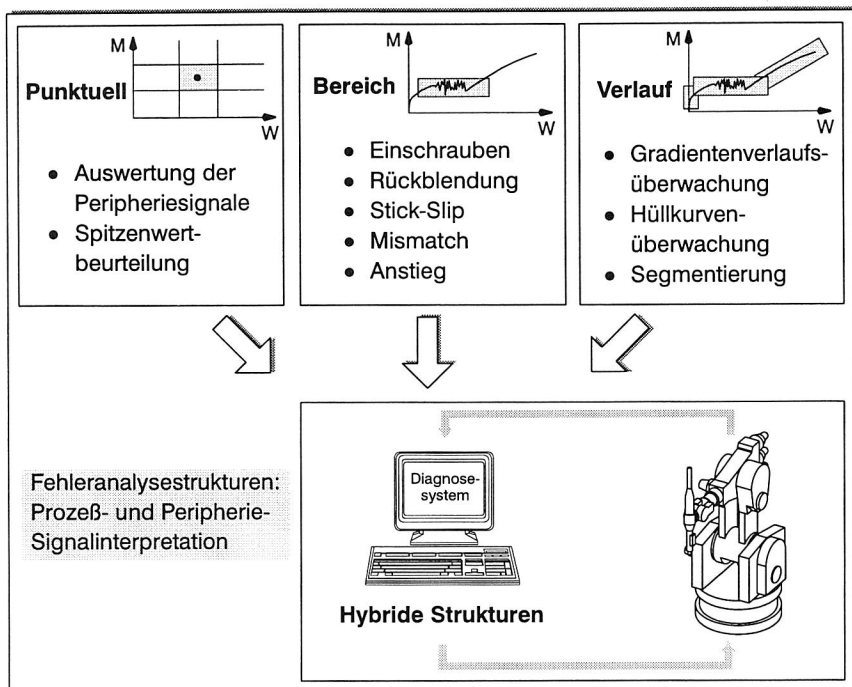


Bild 5-6: Systematik der Strukturen zur Fehleranalyse

5.5.1 Punktuelle Verfahren zur Schraubfehleranalyse

Die klassische Auswertung von Peripheriesignalmustern, wie sie beispielsweise in [38] beschrieben ist, und die Auswertung spezifischer Einzelwerte aus den zugehörigen Prozeßverlaufskurven, zählen zu den punktuellen Verfahren. Für eine aussagekräftige Fehleranalyse sind beide Signalmuster zu berücksichtigen und gezielt zusammenzuführen.

Auswertung von Peripheriesignalen aus der Montagestation

Wie im Bild 5-2 gezeigt wird, treten in der automatisierten Fertigung Verschraubungsfehler durch verschiedene Störfaktoren auf, die ihre Ursache in der Schraube, Werkstück, Schraubsystem oder im Prozeß haben können. Entsprechend sind auch die Peripheriesignale bezüglich der vier Bereiche zu unterscheiden.

Gerade der Schraube als dem zentralen Element gilt ein Hauptaugenmerk zu widmen. Mit vertretbarem Aufwand können in der Serienmontage von den Hauptmerkmalen einer Schraube im Teilprozeß der Zuführung wichtige Größen geprüft werden:

- Gesamtlänge: optische und induktive Sensoren
- Kopfabmessung: Signal bei ordnungsgemäßer Aufnahme durch das Werkzeug
- Schaftdurchmesser: optischer Sensor, Sortiervorrichtung

Als Standard bei automatisierten Schraubstationen ist die Abfrage der Anwesenheit der Schraube zu sehen. Durch Sensorik im Schraubwerkzeug oder durch Anfahren einer Prüfvorrichtung läßt sich kontrollieren, ob diese ordnungsgemäß zugeführt bzw. aufgenommen worden ist und ob ihre Länge korrekt ist.

Mit Hilfe eines zusätzlichen Sensors kann außerdem die Einschraubtiefe zur Überwachung von kritischen Punkten im Schraubverlauf abgefragt werden. Dieser Prozeßwert stellt einen sehr wertvollen Parameter zur Kontrolle insbesondere der Einschraubphase dar, der allerdings in der Serienproduktion derzeit praktisch noch nicht genutzt wird. Ist das Fügoment (MP1) erreicht worden, kann durch die Überprüfung der Einschraubtiefe die Kopfanlage der Schraube sichergestellt werden. Vor allem bei stark streuenden Reibwerten und hohen Einschraubgeschwindigkeiten, die aufgrund knapper Taktzeit oftmals erforderlich sind, ist die Überwachung der Einschraubtiefe sehr gut zur Fehlererkennung geeignet. Ebenso können durch diesen Tiefensensor falsche oder fehlende Unterlegteile im Schraubenverbund erkannt werden.

Neben Prüfsignalen bzgl. des Produktes stehen eine Vielzahl von Signalen aus der Montagezelle zur Verfügung, die für eine exakte Fehlerdiagnose ausgewertet werden müssen. Beispielsweise läßt sich über einen Drucksensor überprüfen, ob der Schrauber überhaupt an die Montageposition abgesenkt werden kann. Werden diese Meßsignale nicht in die Fehleranalyse einbezogen, so kann dies zu Fehlinterpretationen bei der Analyse der Prozeßkurven führen.

Punktuelle Interpretation der Prozeßkurve

Bei der punktuellen Fehleranalyse des Schraubverlaufs wird eine Spitzenwertbeurteilung des Prozeßsignalverlaufs durchgeführt. Diese betrachtet die Lage bzw. Koordinaten des Endpunktes der Verschraubungskurve innerhalb einer Schraubstufe zum Zeitpunkt t_E . Der tatsächlich erreichte Endwert wird von der Schraubsteuerung in der Regel in einem Spitzenwertspeicher festgehalten. Nach beendeter Verschraubung werden die Koordinaten-Werte dieses Punktes mit den vorgegebenen Toleranzgrenzen verglichen (Bild 5-7). Steht nach dieser Methode nur ein Parameter, z. B. der Spitzenwert des Drehmomentes, für die Beurteilung der Verschraubung zur Verfügung, so ist dies wegen der geringen Aussagekraft des einzelnen Kontrollwertes in der Praxis ohne Bedeutung.

Die untersuchten Schraubfälle nutzen in der Regel nicht nur eine Überwachungsfunktion, sondern weitere Überwachungsparameter, so daß in der Kombination zumindest

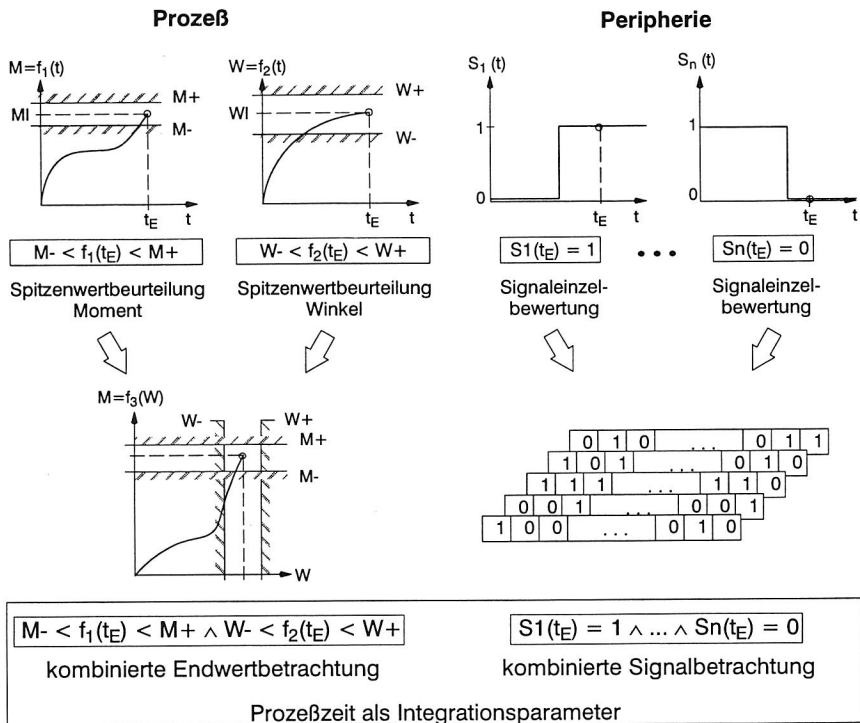


Bild 5-7: Beurteilung des Endwertes von IO- und NIO-Schraubverlaufskurven

ein Toleranzfenster aufgespannt werden kann, um eine kombinierte Endwertbetrachtung zu erhalten (Bild 5-7). Es entspricht der gegenwärtigen Praxis in der Schraubtechnik, die Gesamtbeurteilung eines Schraubfalles ausschließlich auf der Basis der IO / NIO-Werte von Moment und Winkel vorzunehmen. Liegt der kombinierte Endwert innerhalb des Gutfensters, so gilt die gesamte Verschraubung als IO. Abgesehen von der Prozeßzeit wird eine genaue Analyse der NIO-Verschraubungen mittels weiterer Fehlermeldungen von den Schraubsteuerungen oder eine Peripheriesignalbewertung oftmals nicht durchgeführt.

Die Prozeßzeit stellt deshalb als Integrationsfaktor einen weiteren wichtigen Überwachungsparameter bei der Prozeßbeurteilung dar. Bei Überschreiten der Zeit-schranke für die maximale Zeit, innerhalb der eine Schraubphase beendet sein muß, bricht die Steuerung den Ablauf ab und gibt eine Fehlermeldung aus. Im allgemeinen deutet dies auf Finde- oder Gewindefehler hin, da der Aufbau des Drehmoments verhindert wird. Die Überwachung der Prozeßzeit ist auch für die Festschraubphase ein

wichtiges Instrument zur Sicherung der Schraubqualität. Hier lassen sich verschiedene Zeitabschnitte definieren, die zu spezifischen Fehlermeldungen führen.

Fehlerermittlung durch Endwertanalyse

In Bild 5-8 sind typische Fehlerursachen den Feldern des Schraubgebiets zugeordnet. Die hier zusammengestellten Verschraubungsfehler beruhen dabei auf den Ergebnissen, die bei der Serienuntersuchung in der Automobilindustrie ermittelt wurden (s. Kap. 5.2.2).

Um eine genaue Fehleranalyse zu erreichen, wird nicht nur eine Spitzenwertbetrachtung der letzten Schraubstufe (hier: Stufe 2) durchgeführt, sondern auch eine Endwertbetrachtung in der Einschraubphase. Allerdings ist hier nur eine Momentenbetrachtung sinnvoll bzw. möglich, da die Winkeltriggenung für eine gezielte Winkelzählung in der

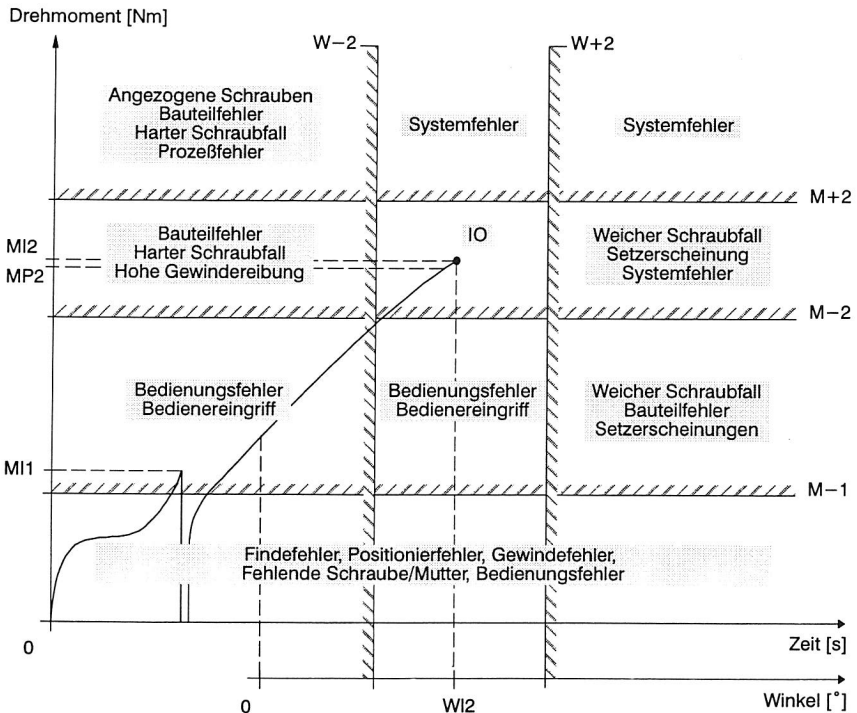


Bild 5-8: Zuordnung der Ursachen für Verschraubungsfehler bei der durchgeführten Istwertanalyse

Regel noch nicht erfolgt ist. Somit lassen sich zehn verschiedene Felder definieren. Endwerte, die unterhalb des Fügемoments ($M-1$) liegen, deuten im allgemeinen auf sog. Findefehler hin. Die Einschraubphase kann hier aufgrund von Gewindebeschädigungen, Positionierfehlern oder fehlenden Schraubenteilen nicht ordnungsgemäß zu Ende geführt werden. Damit wird der Start der Festschraubphase nicht ausgelöst. Der Abbruch des Schraubvorgangs erfolgt entweder intern nach Ablauf der Zeit-Überwachung oder vorzeitig durch den Werker.

Ist das erzielte Endmoment relativ gering und der Drehwinkel im Bereich zwischen Null und der oberen Winkeltoleranzgrenze, so ist der Fehler häufig auf unsachgemäße Handhabung des Schraubwerkzeugs zurückzuführen. Der Abbruch kann hier durch Abrutschen vom Schraubenkopf oder frühzeitiges Abschalten des Werkzeugs herbeigeführt worden sein.

Die Praxis hat gezeigt, daß die Fehlerkombination $M-2 / W+2$ am häufigsten auftritt. Die Ursache für diesen Schraubfehler ist in den meisten Fällen auf einen Bauteilfehler zurückzuführen. Rückstände im Gewinde, wie z. B. Lackreste, täuschen den Abschluß des Fügevorganges vor und führen so zu einem frühzeitigen Start der Festschraubphase und einer verfrühten Winkeltriggerung. Die obere Winkeltoleranzgrenze wird hierdurch im Prozeßablauf überschritten. Für die untersuchten Montagevorgänge gilt daher der Einfluß der Bauteile mit ihren variierenden Oberflächenkennwerten als Hauptfehlerquelle für Verschraubungsfehler.

Das Setzen der Schraubverbindung während des Anziehvorgangs kann Ursache für einen oszillierenden, weichen Schraubverlauf sein. Dies führt je nach Ausprägung der Verlaufskurve zu den Fehlermeldungen $W+2$ und $M-2 / W+2$.

Liegt beim drehmomentgesteuerten Verfahren der Istwert über der oberen Toleranzgrenze für das Drehmoment, so ist von einem Systemfehler auszugehen. Der Abbruch des Schraubvorgangs findet entweder gar nicht oder zu spät statt, so daß die Schraubspindel den Maximalwert des Drehmoments überschreitet. Analoges gilt für das Überfahren des maximalen Winkels beim drehwinkelgesteuerten Verschrauben.

Probleme bei der Endwertanalyse

Die Problematik bei der Istwertanalyse ist die unzureichende Genauigkeit bei der Unterscheidung von Fehlerursachen. Dies liegt im Konzept der punktuellen Betrachtung des Schraubergebnisses begründet. Das heißt, der Verlauf der Verschraubung wird bei der Zuordnung der Fehlerursache nicht berücksichtigt. Deshalb ist es möglich, daß Fehler nicht erkannt werden. So können z. B. stark oszillierende Schraubverläufe mit einem Peak den Abschaltpunkt erreichen. Wenn zusätzlich auch der Wert des Enddrehwinkels innerhalb der Toleranzgrenzen liegt, wird eine solche Fehlverschraubung von der Steuerung nicht beanstandet. Eine ausreichende Verschraubungsqualität ist somit nicht gewährleistet.

Bei [125] und bei [7] wird nachgewiesen, daß bestimmte Fehler zu falschen IO- bzw. NIO-Anzeigen führen. Werkstofffehler der Schrauben (z. B. falscher Werkstoff, falsche

Wärmebehandlung, Inhomogenitäten im Werkstoff) äußern sich unter anderem durch zu große oder zu kleine Streckgrenzwerte. Bei der Montage dieser fehlerhaften Schrauben wird der Mangel durch die Schraubsteuerung bei drehmoment- bzw. drehwinkel-gesteuerten Verfahren an Hand der Istwertanalyse nicht erkannt. Diese Fehlertypen sind nach [125] nur durch die Anwendung der Streckgrenzsteuerung erkennbar. Allerdings ist der Einsatz dieses Anzugsverfahrens wie bereits erwähnt nur mit größerem Aufwand verbunden und außerdem bei stark oszillierenden Drehmomentverläufen gänzlich ungeeignet.

In vielen Fällen mag diese Analysemethode dennoch ausreichen, um zur kurzfristigen Steuerung des Prozesses eine geeignete Nacharbeitsanweisung auszugeben. Für die detaillierte Fehleranalyse vor allem im Hinblick auf die langfristige Optimierung des Gesamtsystems ist diese Methode jedoch nicht angemessen.

5.5.2 Bereichs- und Verlaufsorientierte Verfahren

Der Funktionsumfang von bereichsorientierten Verfahren wurde im Kapitel 2.2.3 bereits ausführlich geschildert. Bei hochwertigen Steuerungen sind diese Strukturen als Überwachungsfunktionen bereits teilweise in die Schraubsteuerungen integriert. Häufig werden diese Funktionen jedoch vom Anwender nicht aktiviert oder gar zur systematischen Fehlerdiagnose genutzt. Für den Aufbau von Prozeßregelkreisen bilden diese jedoch eine Grundvoraussetzung. Zudem sind weitergreifende, verlaufsorientierte Analysestrukturen in einem Diagnosesystem zu verwirklichen, die im weiteren spezifiziert werden.

Gradientenverlaufsüberwachung

Der Gradient einer Schraubverlaufskurve errechnet sich als Quotient aus Drehmoment- und Drehwinkeldifferenz. Aus dieser einfachen Definition ergibt sich für wenig glatte oder gar oszillierende Drehmomentverläufe die Schwierigkeit der aussagekräftigen Bestimmung des Gradienten. In Bild 5-9 sind zwei alternative Berechnungsverfahren für den Gradienten der Kurve dargestellt.

Die erste Methode (Gradient 1) berechnet die Steigung aus der Drehmomentdifferenz zweier unmittelbar aufeinander folgender Punkte der Momenten-Winkel-Kurve. Für unruhige oszillierende Verläufe werden sich mit dieser einfachen Vorschrift große Schwankungen des Gradienten ergeben. Die Aussage des Überwachungsparameters Gradient ist in diesem Fall damit nicht aussagekräftig genug für die Fehleranalyse.

Die nach der zweiten Methode (Gradient 2) berechnete Steigung der Schraubverlaufskurve ist besser geeignet für stark schwankende Verläufe. Die beiden Punkte, durch die der Gradient gelegt wird, werden durch das arithmetische Mittel aus mehreren Werten bestimmt. Zusätzlich liegt zwischen den zu mittelnden Werten eine bestimmte Anzahl von Kurvenpunkten. Diese Berechnungsvorschrift stellt damit zwei Variablen zur Verfügung, um sie an den typischen Verlauf der Kurve anzupassen. Während durch das arith-

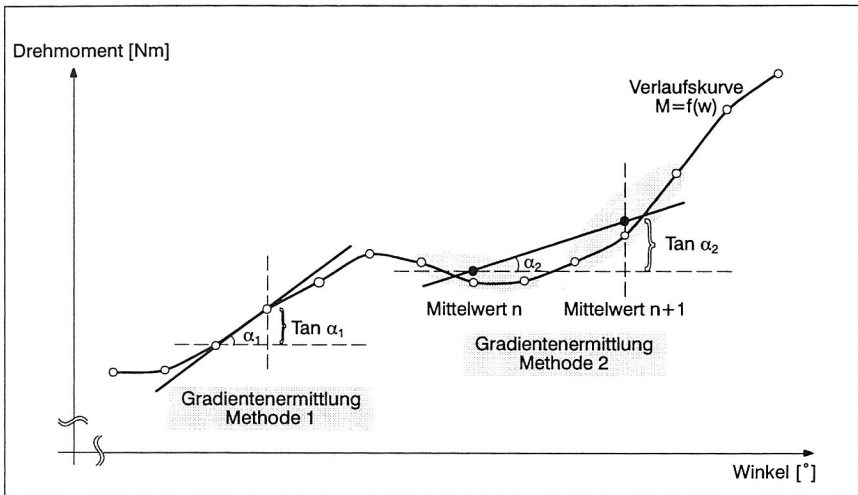


Bild 5-9: Alternative Möglichkeiten zur Bestimmung des Gradienten

metische Mittel einzelne Spitzen weitgehend eliminiert werden, verringert das Auseinanderziehen der beiden gemittelten Werte den Einfluß größerer Schwingungen. Ein Nachteil dieser Berechnungsart ergibt sich jedoch für Kurvenbeginn und -ende. In Abhängigkeit von der Größe der beiden variablen Werte der Berechnungsvorschrift bleibt jeweils ein Stück am Beginn bzw. am Ende der Kurve unberücksichtigt.

Eine Alternative zur aufwendigen Berechnung des Gradienten ist die Glättung des Kurvenverlaufs mit Hilfe von numerischen Verfahren. Durch diese müssen allerdings Verzerrungen bzw. Verschiebungen des Schraubverlaufs in Kauf genommen werden. Daher darf die Glättung der Kurve erst nach der Überprüfung anderer Überwachungskriterien, wie z. B. der Istwertanalyse, durchgeführt werden, um eine Verfälschung der Ergebnisse zu vermeiden.

Die Einschraubphase ist durch die in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Überwachungsstrukturen weitgehend abgedeckt, so daß hier der zusätzliche Aufwand für eine Gradientenüberwachung nicht genutzt wird. Die Überwachung des Gradienten der Schraubverlaufskurve ist daher vor allem für die Festschraubphase von Bedeutung.

Viele Schraubsteuerungen bieten die Überwachung des Anstiegs nur in einem bestimmten Abschnitt der Schraubverlaufskurve der Festschraubphase an. Die durchgeführten Untersuchungen haben aber gezeigt, daß die Festschraubphase zum Teil von sehr komplizierten Formen der Verlaufskurve gekennzeichnet ist. Die einfache, starre Festlegung von Grenzen für die Steigung der Kurve ist daher für eine gezielte Fehler-

analyse nicht ausreichend. Vielmehr muß diese Schraubstufe über den gesamten Abschnitt hinweg durch eine vollständige Gradientenüberwachung kontrolliert werden.

Für eine sinnvolle Gradientenverlaufsüberwachung muß die Festschraubphase in verschiedene Abschnitte (Bild 5-10) unterteilt werden, die sich am typischen Kurvenverlauf orientieren. Diese Phasen sind Fügen, Stick-Slip, Momentenanstieg und Erreichen der Streckgrenze. Die Abschnitte können allerdings je nach Form der Schraubverlaufskurve in verschiedener Reihenfolge auftreten oder sich überlagern.

Das Startmoment der Gradientenverlaufsüberwachung sollte zwischen dem Füge- und Schwellmoment liegen, da in diesem Abschnitt noch Füge- und Anlegevorgänge v. a. in den Bauteilfugen ablaufen. Dieser Bereich kann durch die Festlegung eines Toleranzfensters für den Gradienten überwacht werden. Das Überschreiten dieser Toleranz

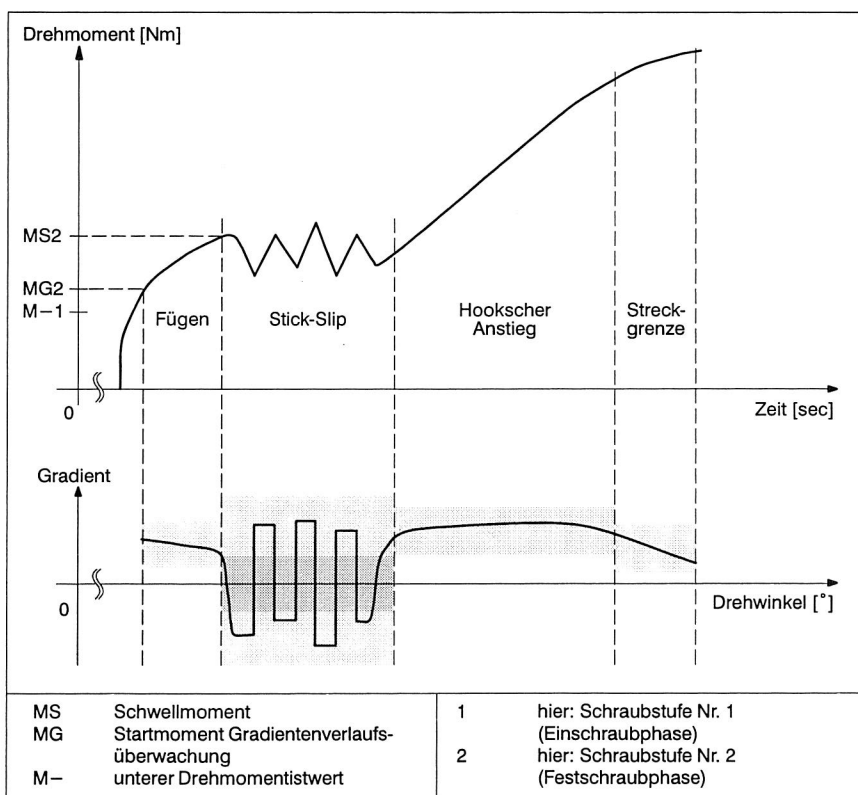


Bild 5-10: Gradientenverlaufsüberwachung in der Festschraubphase

signalisiert einen zu harten Drehmomentverlauf, der z. B. durch Gewindefehler verursacht sein kann.

Auch die durch Stick-Slip-Effekte hervorgerufenen Schwankungen des Drehmoments können mit Hilfe des Gradientenverlaufs überwacht werden. Hierzu bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten. Zum einen kann die Schwankung des Gradientenwerts in diesem Bereich durch ein Toleranzfenster überprüft werden. Dies wird aber wegen der notwendigerweise großen Toleranzbreite zu wenig befriedigenden Aussagen führen. Sinnvoller ist deshalb die Definition eines kleineren Fensters (dunkler Bereich Bild 5-10). Das Diagnosesystem muß die Anzahl der Über- bzw. Unterschreitungen der zulässigen Toleranzen dieses Fensters durch den Gradientenwert überprüfen und gegebenenfalls eine Fehlermeldung generieren. Wie die Analyse des Datenmaterials gezeigt hat, treten gerade oszillierende Schraubverläufe des Drehmoments sehr häufig auf. Daher kommt der Stick-Slip-Überwachung eine große Bedeutung zu.

In der Anstiegsphase wird die eigentliche Zielgröße in die Verbindung eingebracht. Ein definiertes Gutfenster für den Gradientenanstieg stellt den Verlauf der Momenten-Winkel-Kurve innerhalb einer tolerierten Steigung sicher. Abweichungen aus diesem Toleranzband deuten auf das mögliche Verlassen des Hook'schen Bereiches hin.

Im Bereich der Festschraubphase wird überwacht, ob die Streckgrenze der Schraube erreicht oder gar überschritten wird. Da bei Drehmomentsteuerung die Schraube nur bis in den elastischen Bereiche angezogen werden darf, deutet das Erreichen des Streckgrenzpunktes auf ein Schraubenmaterial mit zu niedrigem E-Modul hin und damit auf einen Verschraubungsvorgang, der nachgearbeitet werden muß.

Die Überwachung des Gradienten ist in jedem Fall als Ergänzung zur Istwertanalyse zu betrachten. Sie eignet sich vor allem zur Erkennung von werkstoffbedingten Fehlern bei Drehmoment- bzw. Drehwinkelsteuerung. Mit Hilfe dieser Methode zur Fehleranalyse können die Nachteile dieser beiden Anzugsverfahren gegenüber der Streckgrenzsteuerung ausgeglichen werden.

Hüllkurvenüberwachung

Bei der Hüllkurvenüberwachung wird das Prinzip der matrixförmigen Aufteilung des Schraubgebiets aufgegeben. Dem kompletten Schraubverlauf wird ein Korridor überlagert, innerhalb dessen sich die absoluten Momenten- und Gradientenwerte der Verschraubung bewegen müssen.

Für die Art der Definition einer Hüllkurve bieten sich zwei Möglichkeiten an. Nach der ersten Methode (Bild 5-11) werden abschnittsweise aufeinanderfolgende rechteckige Toleranzfenster für den Verlauf der Kurve festgelegt. Das Analysesystem überprüft, ob die Schraubwerte innerhalb der einzelnen Fenster liegen. Bei einer Fehlverschraubung wird gemeldet, in welchem Fenster die Kurve das Toleranzband verlassen hat. Diese Information steht für die gezielte Fehleranalyse zur Verfügung. Das heißt, je größer die Anzahl der Hüllfenster ist, desto genauer kann die Analyse der Fehlerursache durchge-

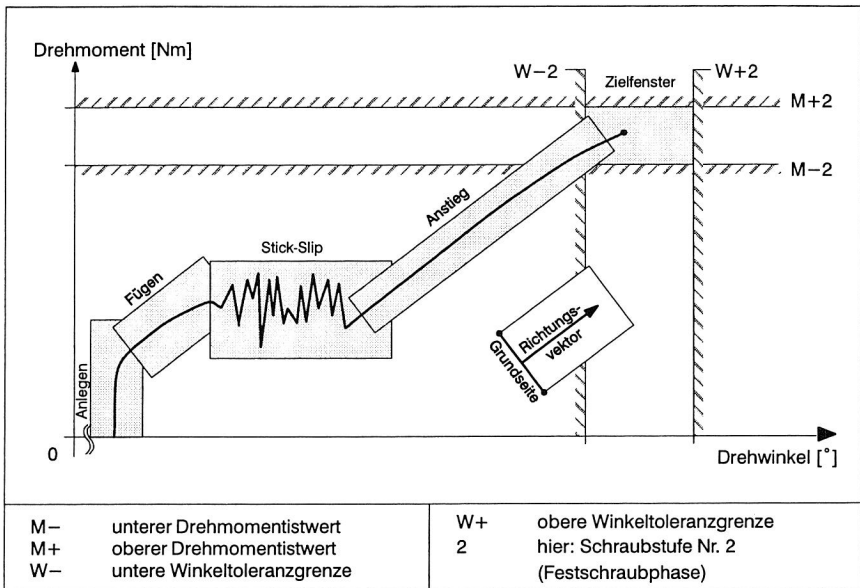


Bild 5-11: Hüllkurvenüberwachung durch Definition von Fenstern

führt werden, desto aufwendiger wird allerdings auch der Parametriervorgang für die Schraubsteuerung.

Eine einfache und eindeutige Beschreibung der geometrischen Lage eines Hüllfensters in der Ebene ergibt sich durch die Festlegung einer Seite des Toleranzfensters in Form zweier Punkte und die Angabe eines Verschiebungsvektors für diese Gerade. Die zur Definition der Fenster notwendigen Drehwinkelwerte haben jeweils den Beginn der Schraubphase zum Bezugspunkt.

Der Nachteil der Definition einer Hüllkurve mit Hilfe einzelner Fenster ist die durch die Anzahl der Fenster beschränkte Aussagefähigkeit einer Fehlermeldung. Außerdem ergeben sich durch die relativ starre Definition der Hüllfenster ungleichmäßige Toleranzbreiten, die zu Verzerrungen der Fehleranalyse führen können. Dieses Problem wird vor allem in den Bereichen deutlich, in denen sich Fenster berühren oder überlappen. Überschreitungen der Toleranzbänder sind hier nicht eindeutig zuordenbar. Von Vorteil ist jedoch die softwaretechnisch relativ einfache Handhabbarkeit der Daten zur Festlegung der Fenster und die Überprüfung des Verlassens der Toleranzgrenzen.

Eine weitere Alternative zur Festlegung einer Hüllkurve ist in Bild 5-12 dargestellt. Hierzu wird für den jeweiligen Schraubfall aus einer Vielzahl von Prinzipversuchen zunächst eine repräsentative Masterkurve einer IO-Verschraubung ermittelt. Aus der Streuung

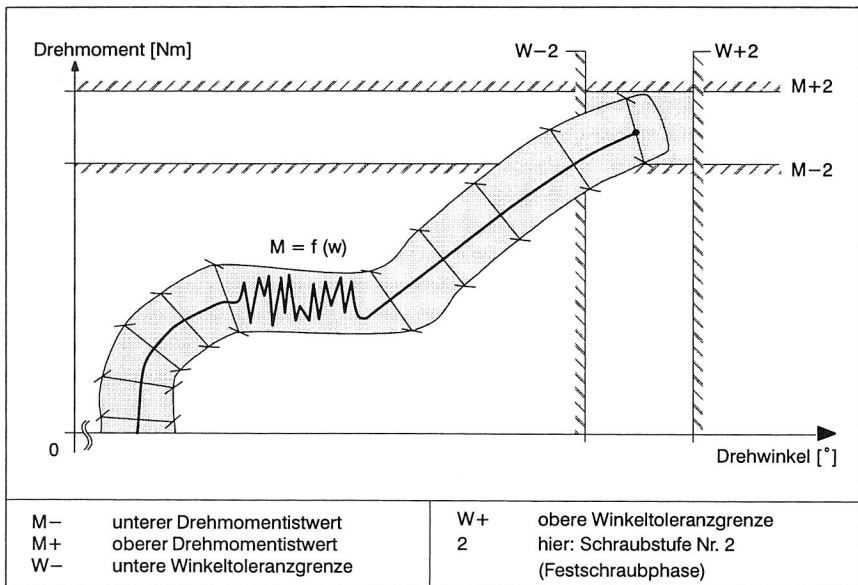


Bild 5-12: Definition einer Hülle basierend auf einer Masterkurve

der IO-Kurven wird außerdem die Breite der festzulegenden Toleranz bestimmt [132]. In regelmäßigen Abständen werden entlang der Masterkurve Normale zu Kurventangenten definiert, aus deren Länge sich die Breite des Toleranzbandes ergibt. Durch die Verbindung der Endpunkte dieser Normalen entstehen zwei Grenzkurven und damit eine Hülle, innerhalb derer sich die Verlaufskurve während der Verschraubung befinden muß.

Das Verlassen der Toleranzhülle wird bei diesem Überwachungsverfahren an jedem beliebigen Punkt der Kurve von dem Diagnosesystem erkannt. Die für die Fehleranalyse zu Verfügung stehende Information über den Kurvenverlauf ist sehr genau. Hier liegt auch der Vorteil gegenüber der Generierung der Hülle durch Rechtecke. Zudem ist durch die verlaufsbezogene Definition der Hülle die genaue Beschreibung der Toleranzbreite möglich. Demgegenüber steht der hohe Aufwand zur Bestimmung der Referenzkurve und der Ableitung der beiden Grenzkurven. Auch die online-Analyse der Verschraubungskurve ist sehr rechenaufwendig, weshalb die Berechnungen in der Regel auf separaten Meßkarten mit eigenen Mikroprozessoren durchgeführt werden.

Segmentierung

Das Verfahren der Segmentierung, das eine interessante Alternative für den künftigen Einsatz innerhalb des Diagnosesystems darstellt, arbeitet weniger nach genau definier-

baren mathematischen Regeln, sondern versucht vielmehr durch Vergleich der Form der Schraubverlaufskurve mit Musterkurven bzw. Kurvenabschnitten die Schraubfehler und deren Ursachen zu bestimmen.

Die Drehmomentkurven einer Schraubverbindung zeigen sehr oft wiederkehrende Grundmuster im Schraubverlauf. Bei Fehlverschraubungen weichen die Drehmomentverläufe in Teilbereichen von diesem Grundmuster ab. Ein Fachmann orientiert sich bei der Beurteilung der Verschraubung an den Ausprägungen der abweichenden Form dieser Teilabschnitte [118]. Deshalb liegt es nahe, im Diagnosesystem Grundmuster und mögliche Variationen von Schraubverlaufskurven abzulegen und mit den entsprechenden Fehlerursachen zu verknüpfen.

Die dazu notwendige Zerlegung der Schraubverlaufskurve in einzelne Segmente kann allerdings nicht starr definiert sein, wie bei den oben beschriebenen Verfahren (z. B. Hüllkurvenüberwachung). Zur Analyse der Kurve eignet sich vielmehr eine Strukturierung in zwei Ebenen. Die Kurve wird zunächst in charakteristische Grobabschnitte unterteilt. Innerhalb eines Bereichs erfolgt dann die Feinstrukturierung der Momenten-Winkel-Kurve mit ihren diversen Ausprägungsformen, die im Diagnosesystem hinterlegt werden müssen.

In Abhängigkeit vom Schraubfall, dem Steuerungstyp, dem eingesetzten Schraubwerkzeug und den zugeordneten Zielparametern sind die Vergleichssegmente für jede Verschraubung aus typischen Kurvenverläufen bei Fehlverschraubungen und IO-Verschraubungen zu bestimmen. Jedes Segment ist jeweils mit einem eigenem Toleranzband zu versehen (Bild 5-13), um den Vergleich mit der Verlaufskurve und eine gezielte Fehlerzuordnung zu ermöglichen. Nicht unterschätzt werden dürfen allerdings die äußerst umfangreichen Versuche zur charakteristischen Segmentierung.

Die Aufteilung der Verlaufskurve in zwei Ebenen ist sinnvoll, da nicht alle Variationen von Segmenten in jedem Bereich der Kurve vorkommen können. Auf diese Weise wird eine Eingrenzung der Variationsmöglichkeiten erreicht, wodurch die vom Analysesystem benötigte Zeit verringert wird. Bild 5-13 illustriert die prinzipielle Vorgehensweise. Die Form eines Teilabschnitts wird mit den in der Wissensbasis für diese Verschraubung und für diesen Bereich zur Verfügung stehenden Segmenten verglichen [118]. Dazu werden zunächst einige Segmente nach vorbestimmten Kriterien (Krümmung, oszillierende Werte, etc.) ausgewählt. Diese werden jeweils mit der Kurvenform des betreffenden Bereichs verglichen und eine IO-Meldung bzw. eine entsprechende Fehlermeldung zugeordnet. Auf diese Weise entsteht die Nachbildung der Schraubkurve aus IO- und NIO-Segmenten. Die einzelnen Fehlermeldungen der NIO-Segmente ergeben zusammen die Ursache der Fehlverschraubung.

5.6 Eignung der Analysestrukturen für die Schraubfehlerdiagnose

In den vorausgegangenen Abschnitten wurden Überwachungsmethoden zur Erkennung von Schraubfehlern und Analyse deren Ursachen vorgestellt und neue Verfahren abgeleitet. Diese methodischen Strukturen sind zentraler Bestandteil eines Diagnose-

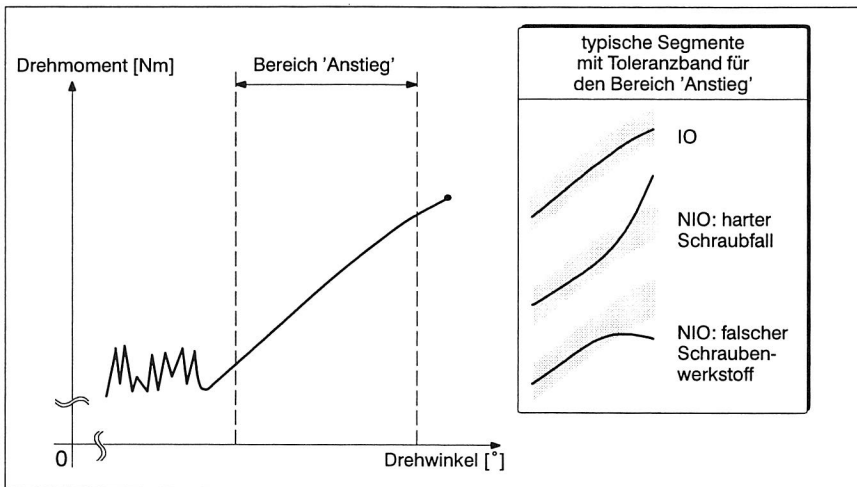


Bild 5-13: Prinzip der Segmentierung

systems zur Schraubfehlererkennung und der Wirkungs-Ursachen-Analyse. Aufgrund dieser Fehleranalyse generiert das System Nacharbeitsanweisungen und schafft die Grundlagen für die Optimierung des Schraubprozesses als Ganzes.

Die punktuell orientierten Verfahren sind in kommerziellen Schraubsteuerungen weitgehend umgesetzt, wobei allerdings nicht jede Steuerung alle Möglichkeiten anbietet oder hier beschriebene Methoden in abgewandelter Form nutzt. Zentraler Ausgangspunkt ist die Istwertanalyse, mit der eine relativ allgemeingültige Grobanalyse der Verschraubungsfehler erfolgen kann. Sie ist allerdings zwingend erforderlich, um die grundsätzliche IO / NIO-Entscheidung zu treffen. Es ist jedoch auch eine zusätzliche Auswertung von Prozeßsignalen aus der Montagestation notwendig, um alle typischen Schraubfehler, wie sie in Kapitel 5.2.2 vorgestellt wurden, erkennen zu können. Gerade diese Funktionalität lassen Schraubsteuerungen bisher vermissen.

Die zusammengestellten punktuellen Überwachungsmethoden sind als Mindestanforderung an eine Schraubsteuerung zu betrachten, um bei konsequentem Einsatz der Überwachungen im Sinne der kurzfristigen Regelung des Schraubprozesses eine ausreichende Qualität der Schraubverbindungen gewährleisten zu können.

Zur Verwirklichung des an der langfristigen Optimierung des Schraubprozesses orientierten Regelkreises bedarf es jedoch weitergehender Strukturen zur Analyse der Schraubfehler. Solche Methoden wurden in Form der bereichs- und verlaufsorientierten Verfahren vorgeschlagen, die eine anlagenspezifische Feinanalyse ermöglichen, wie sie in Bild 5-14 vorgeschlagen wird.

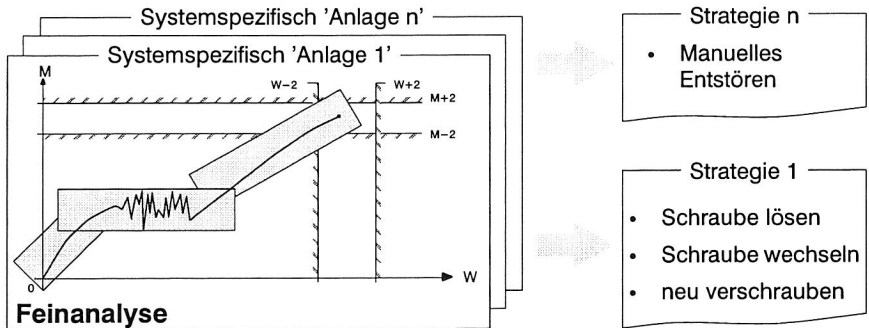
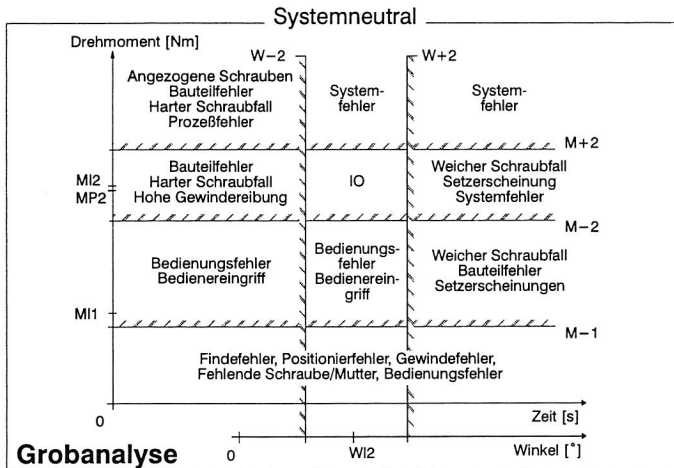


Bild 5-14: Grob- und Feinanalysezyklen ermöglichen eine intelligente Fehlererkennung und Ableitung gezielter Fehlerbehebungsstrategien

Die unterschiedlichen Eigenschaften der analysierten Schraubfälle, die durch verschiedene Sollparameter, durch die spezifischen Charakteristika der Bau- und Verbindungs- teile und auch durch die verschiedenen Konzeptionen der Schraubstationen hervorgerufen werden, führen jeweils zu charakteristischen Schraubverläufen und spezifischen Fehlerschwerpunkten. Die Betrachtung der Fehler und deren Ursachen muß daher für jeden Schraubfall einzeln erfolgen [62]. Darüber hinaus muß der Anlagentyp, der im wesentlichen durch den Automatisierungsgrad und die Steuerungsstruktur charakterisiert ist, bei dem Analysekonzept berücksichtigt werden (Bild 5-14).

Es zeigt sich, daß in den meisten Fällen spezifische Kombinationen von Fehlermeldungen auch charakteristische und damit eindeutig zuzuordnende Kurvenformen hervorrufen. Einer für eine Schraubstation typischen Fehlerkombination ist hiermit in der Regel auch eine Fehlerursache zuzuordnen. Die gleiche Fehlerkombination kann allerdings bei verschiedenen Anlagen und Schraubstellen auch verschiedene Formen von Schraubverlaufskurven hervorrufen.

Der Zusammenhang zwischen Fehlerkombination und Ursache ist somit in den meisten Fällen ausreichend als Basis für eine intelligente Fehlererkennung durch das Schraubsystem. Der Aufwand für die exakte Auswertung der kompletten Kurvenform, wie er bei dem Verfahren der Segmentierung vorgeschlagen wird, mit dem Ziel der Festlegung einer Nacharbeitsanweisung erscheint damit zu hoch und wird durch den erzielbaren Nutzen nicht gerechtfertigt.

Die allgemeingültige Zuordnung zwischen Fehler bzw. Fehlerursache und charakteristischer Fehlermeldung gestaltet sich sehr schwierig. In der Regel wird diese logische Verknüpfung ausgehend von allgemeinen Grundstrukturen und Regeln für jede Anlage separat angepaßt werden müssen, da selbst bei sehr ähnlichen Konfigurationen des Schraubfalls und des Schraubsystems der gleichen Fehlerkombination verschiedene Ursachen zugrunde liegen können.

Deshalb wurden beim Entwurf der Analysestrukturen deren Möglichkeiten und Anwendungsgebiete vor allem allgemein aufgezeigt. Die Zuordnung zwischen Schraubfehler und Verlaufskurve ist für die einzelne Verschraubung aber sehr wohl möglich. Zur Festlegung der Überwachungsmethoden müssen daher für jede kritische Verschraubung in einer Testphase Schraubversuche unter Serienbedingungen durchgeführt werden. Dabei müssen

- die Schraubparameter festgelegt,
- der charakteristische Normalverlauf bestimmt,
- charakteristische Fehler ermittelt,
- die Überwachungsparameter festgelegt und
- Nacharbeitsmaßnahmen definiert werden.

Erst durch diese systematische Vorgehensweise kann für jede kritische Verschraubung die optimale Qualität gewährleistet werden.

Die Ausnutzung der Überwachung des Schraubverlaufs durch aufwendige und genaue Verfahren kann kurzfristig zu einem höheren Ausschußanteil führen. Dies erscheint auf den ersten Blick als ein Widerspruch: Hohe Investitionen und großer Aufwand zur Sicherung der Qualität der Schraubprozesse führen zu höheren Fehleranteilen. Die Registrierung von bisher nicht erkannten Schraubfehlern kann zu diesem Phänomen führen. Erst durch die gezielte Nutzung des übergreifenden Qualitätsregelkreises, der unter Einbeziehung möglichst aller Einflußbereiche der Schraubmontage die Ursachen der Fehler beseitigt, wird sich der Aufwand lohnen.

5.7 Ableitung von Fehlerreaktionen in Abhängigkeit vom eingesetzten Schraubsystem

Die Fehleranalyse dient als Grundlage für die Festlegung der Maßnahmen zur Nacharbeit der fehlerhaft montierten Schraubverbindungen. Die Nacharbeit in der Schraubmontage umfaßt dabei alle Maßnahmen und Aktivitäten zur Reparatur einer Fehlerverschraubung. Die Art der Fehlerreaktion, die vom Diagnosesystem generiert werden muß, orientiert sich hierbei

- am Automatisierungsgrad der Schraubstation
- an der angewählten Zielfunktion
- an den Eigenschaften des Schraubfalls
- am Schraubfehler bzw. dessen Fehlerursache.

Um einen hohen Qualitätsstandard aller Schraubverbindungen zu gewährleisten, muß der Mitarbeiter an der Anlage im Falle einer Fehlverschraubung den Reparaturvorschlag und, aus Gründen der besseren Akzeptanz, die analysierte Fehlerursache erhalten. Die vollautomatische Schraubstation bekommt die Anweisung dagegen in Form eines Fehlercodes. Bei automatischen Stationen werden sich die Möglichkeiten zur Nacharbeit in der Regel auf das Lösen und Neuverschrauben mit eventuellen Wechsel der Schraube beschränken müssen.

Die Nacharbeit wird an der Montagestation selbst oder an separaten Arbeitsplätzen, die innerhalb der Montagelinie oder ganz außerhalb des Materialflusses liegen können, ausgeführt. Die Reparatur der Fehlverschraubung sollte aber soweit als möglich an derselben Station durchgeführt werden, an der die Verschraubung erstellt wurde. Dadurch werden zusätzliche Informationsströme zu den Nacharbeitsstationen vermieden. Darüber hinaus werden die Kenntnisse des Bedieners an der jeweiligen Schraubstation ausgenutzt und das qualitätsbewußte Handeln der Mitarbeiter gefördert.

Die Ausschleusung des Teils bei nicht in der Anlage behebbaren Fehlern ist als letzte Alternative zu wählen. Beispielsweise sind dies im Automobilbau Reparaturarbeiten direkt an Karosserie wie das Wechseln einer defekten Gewindebuchse. Die Reparatur einer Fehlverschraubung durch Nachschneiden des Gewindes sollte dagegen zumindest innerhalb der Montagelinie durchgeführt werden, um den Nacharbeitsaufwand gering zu halten. Am selben Arbeitsplatz ist dies aus Taktzeitgründen in der Regel nicht möglich.

Der Schraubfall charakterisiert die Beschaffenheit der Schraubstelle und die spezifischen Eigenschaften der Bauteile und der Schraubelemente. Hat der Schraubvorgang irreversible Auswirkungen auf einzelne Teile der Verbindung, so darf keine Neuverschraubung vorgenommen werden. Dies gilt beispielsweise für selbstsichernde Muttern, die während des Schraubvorgangs verformt werden oder deren Kunststoffeinsatz beschädigt wird. Hier muß in jedem Fall ein neues Teil für eine evtl. Zweitverschraubung verwendet werden. Normteile, die nicht bis in den plastischen Verformungsbereich angezogen wurden und keine Beschädigung durch den Schraubvorgang erfahren haben,

können problemlos bei nicht sicherheitsrelevanten Teilen ein zweites mal verschraubt werden.

Der Schraubfehler an sich ist Hauptkriterium für die Bestimmung der Fehlerreaktion. In Abhängigkeit vom Typ des Fehlers werden die Maßnahmen bestimmt, die unter Berücksichtigung der oben genannten Einflüsse gegebenenfalls angepaßt werden. Die Zuweisung bzw. Generierung einer Nacharbeitsanweisung ist somit von mehreren Faktoren abhängig. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge und vor allem durch die unterschiedliche Auswirkung ähnlicher Fehler auf verschiedenen Schraubsystemen ist es nicht möglich, allgemein gültige Regeln für die Zuordnung von Nacharbeitsanweisungen aufzustellen. Daher wird beispielhaft eine methodische Zusammenstellung von Nacharbeitsanweisungen angeboten, welche die systematische Zuordnung der Reparaturmaßnahmen zu den Schraubfehlern ermöglicht (Bild 5-15).

Die Nacharbeit in der Schraubmontage verfolgt demnach zwei prinzipielle Strategien. Ausgehend vom Schraubfehler besteht die Möglichkeit, die Fehlverschraubung sofort wieder zu lösen oder den Schraubverbund zunächst zu belassen.

Nach dem Lösen der Verschraubung (Strategie 1) kann direkt ein Zweitanzug oder zunächst eine Prüfung der betroffenen Bauteile bzw. der Schraube erfolgen. Auch die Empfehlung zur Überprüfung der Parameter oder der Komponenten des Schraubsystems ist möglich.

Nach [129] liegen nach einer Wiederholverschraubung die Istwerte derselben Verschraubung zu 70 % bis 90 % im Toleranzbereich. Dies erklärt sich durch die Kompensation von Fehlereinflüssen. Ein zunächst weicher Schraubfall fällt beim Zweitanzug aufgrund von veränderten Reibungsbedingungen in der Regel härter aus, so daß sich eine IO-Verschraubung ergibt. Durch die Zweitverschraubung senkt sich der Anteil an Restfehlern bei drehwinkelbedingten Fehlverschraubungen auf nur noch 25 %. Scheinfehler werden ebenfalls durch die Zweitverschraubung ausgefiltert. Da nach [129] die Drehwinkelfehler rund 45 % der gesamten Fehler ausmachen, ergibt sich durch diese sehr einfache Maßnahme ein erhebliches Einsparungspotential. Die bei einem Automobilhersteller durchgeführte Schraubdatenanalyse bestätigen indes den überragenden Anteil an winkelbasierenden Schraubfehlern.

Das Lösen der Verbindung und ein anschließender Zweitanzug erscheint demnach für Fehlverschraubungen sinnvoll, deren Momentenendwert innerhalb der Drehmomenttoleranz liegt, aber gleichzeitig die Grenzen des Drehwinkels überschritten bzw. nicht erreicht werden. Auch bei Verschraubungen, die zwar das Schwellmoment bereits überschritten und dennoch einen Drehwinkelfehler verursacht haben, ist ein Wiederanzug sinnvoll. Diesen Fehlverschraubungen liegen häufig veränderte Reibbedingungen in den Bauteilen zugrunde. Ausgenommen sind hierbei sehr starke Winkelüberschreitungen bei Drehwinkelsteuerung bzw. hohe Drehmomentüberschreitungen bei drehmomentgesteuerten Verfahren. Hier sollte eine Überprüfung der Verschraubungsparameter, insbesondere der Einschraubgeschwindigkeit, erfolgen. Sind hierbei keine Fehler feststellbar, muß das Schraubsystem einer Kontrolle unterzogen werden.

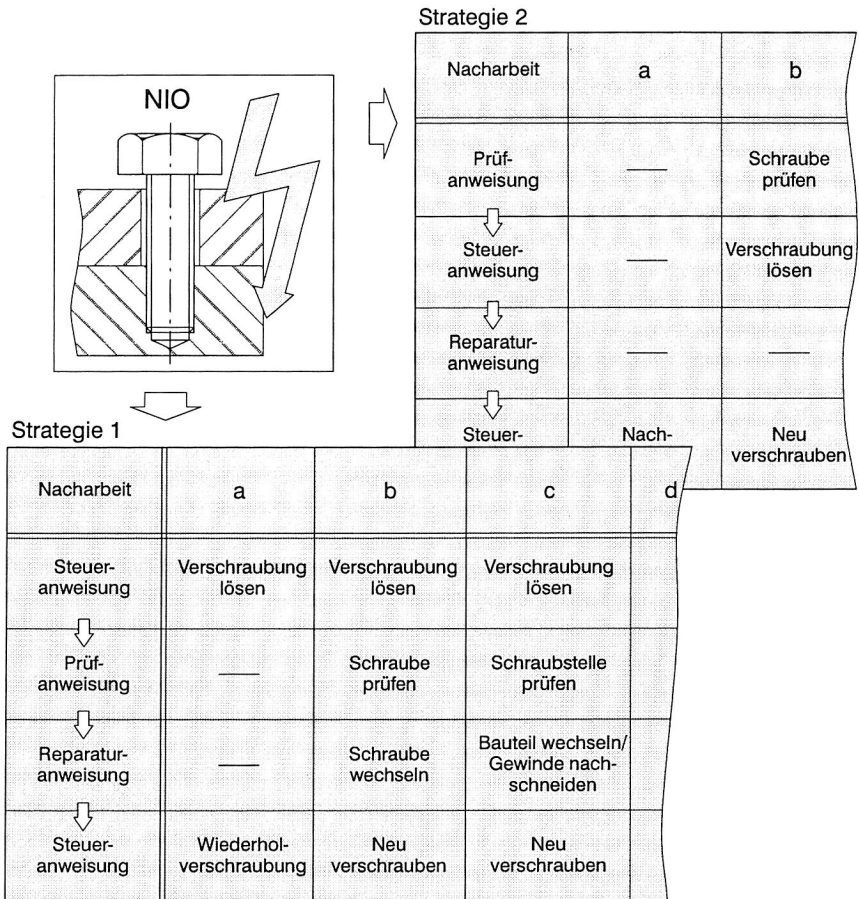


Bild 5-15: Systematik der Nacharbeitsanweisungen

Tritt nach einer Wiederholverschraubung erneut ein Fehler auf, so muß die Verschraubung ganz gelöst und die Schraubstelle bzw. die Schraube gezielt überprüft werden. Dies gilt auch für alle Fehlerspezifikationen, für die ein Zweitanzug nicht in Frage kommt, wie z. B. bei einer Fehlermeldung aus der Gradientenüberwachung. Wird hierbei festgestellt, daß die Schraube bis über ihre Streckgrenze beansprucht wurde, muß die Verschraubung gelöst und der Schraubenbolzen ausgewechselt werden. Mit einer beschädigten Schraube darf auf keinen Fall eine Wiederholverschraubung durchgeführt werden.

In Abhängigkeit vom Typ des Fehlers können direkt Prüf- und Reparaturanweisungen ausgegeben werden, wie z. B. 'Gewinde prüfen', 'Gewinde nacharbeiten', 'Bauteil wechseln' oder 'Schraube wechseln'. Läßt die Ursachenanalyse diese direkte und eindeutige Zuordnung nicht zu, so muß auf die allgemeine Anweisung 'Schraubstelle prüfen' bzw. 'Schraube prüfen' zurückgegriffen werden. Die Kontrolle der Schraubstelle durch den Werker kann beispielsweise ergeben, daß die Schraube schräg eingeschraubt wurde. Hierbei ist es unumgänglich, die Schraube zu wechseln und das Bauteilgewinde nachzuschneiden. Kann die Verschraubung nicht repariert werden, so muß das Teil komplett ausgeschleust werden.

In bestimmten Fehlersituationen kann es sinnvoll sein, den Schraubverbund trotz einer Fehlermeldung nicht sofort zu demontieren (Nacharbeitsstrategie 2). Dies trifft beispielsweise bei Handhabungs- oder Findefehlern zu. Wurde in den Schraubenverbund bereits ein Drehmoment eingebracht, das zwischen Schwellmoment und unterer Drehmomenttoleranzgrenze – bei Drehwinkelsteuerung wird analog der Wert des relativen Drehwinkels zwischen Null und unterer Drehwinkeltoleranzgrenze herangezogen – liegt, so besteht die Möglichkeit, die Verschraubung nachzuziehen, falls keine weiteren aktiven Überwachungsfunktionen einen Schraubfehler festgestellt haben. Diese Variante der Nacharbeit bietet sich an, wenn die Taktzeit zu kurz ist, um die Schraube zu lösen und in einem Zweitanzug neu zu verschrauben. Der Nachteil liegt hier in der schwierigen Kontrollierbarkeit; somit kann eine sichere Qualität der Verbindung nicht mehr gewährleistet werden. Diese Form der Nacharbeit darf daher nicht bei sicherheitsrelevanten Verschraubungen eingesetzt werden.

Findefehler verhindern oft den Aufbau eines Drehmoments, so daß die Verschraubung bereits nach der Einschraubphase abgebrochen wird. Hier ist der Lösevorgang überflüssig. Die Nacharbeitsanweisung an den Mitarbeiter muß dann allgemein 'Schraubstelle prüfen' oder 'Schraube prüfen' lauten. Die weiteren Maßnahmen liegen wiederum in der Erfahrung des Werkers an dieser Montagestation. Wird hingegen durch den Einsatz der Überwachungsstrukturen der Fehler genauer eingegrenzt (z. B. fehlende Schraube), kann die exakte Nacharbeitsanweisung (z. B. Schraube einlegen) ausgegeben werden.

Hier wird deutlich, daß eine allgemeine Systematik, wie sie in Bild 5-15 aufgezeigt wird, nicht alle denkbaren und sinnvollen Anweisungen einschließen kann. Vielmehr wird hier eine prinzipielle Struktur angeboten, die für jede Verschraubung angepaßt werden muß. Die verschiedenen Strategien müssen einzeln zugeordnet werden. Dies ist für eine konkrete Verschraubung wesentlich einfacher durchzuführen, da die Anzahl der Fehler stark eingeschränkt ist.

Zur Vermeidung von sehr allgemeinen Nacharbeitsanweisungen ist daher die gründliche Untersuchung jeder kritischen Verschraubung und der typischen Fehlerursachen erforderlich. Je genauer diese Analyse durchgeführt wird, desto exakter und konkreter kann die Nacharbeitsanweisung des Diagnosesystems sein.

Zur Veranschaulichung der Zuordnung zwischen Schraubfehler und Nacharbeitsanweisung wird dies exemplarisch am Beispiel eines typischen Schraubfehlers aus dem

Bereich der Fahrzeugmontage vorgestellt. Tab. 5-2 zeigt diese Systematik, wie sie als Grundlage für die Umsetzung in der Anlagen- bzw. Schraubsteuerung notwendig ist.

Schraubfehler	Charakteristischer NIO-Schraubverlauf	Nacharbeitsanweisung
1) $M-1 < M(t_E) < M-2$ $\wedge W+2 < W(t_E)$ Nicht vollständig eingeschraubt		1 Lösen 2 Schraubstelle prüfen 3 ggf. Gewinde nacharbeiten 4 Schraube wechseln 5 neu verschrauben
2) $M-1 < M(t_E) < M-2$ $\wedge T+ < T(t_E)$ Nicht vollständig eingeschraubt		1 Lösen 2 Schraubstelle prüfen 3 ggf. Gewinde nacharbeiten 4 Schraube wechseln 5 neu verschrauben
3) $M(t_E) < M-1$ $\wedge T+ < T(t_E)$ Findefehler/ Bedienungsfehler		1 Belassen 2 Schraubstelle prüfen 3 ggf. Schraube einlegen/wechseln 4 neu verschrauben
4) $W(t_E) < W-2$ Kein erkennbarer Fehler		1 Lösen 2 Zweitanzug
5) $W(t_E) < W-2$ Bei Zweitanzug erneut kein erkennbarer Fehler		1 Lösen 2 Schraubstelle prüfen 3 ggf. Gewinde nach

Tab. 5-2: Exemplarische Zuordnung von Schraubfehler und Nacharbeitsanweisung

Die Generierung der Nacharbeitsanweisungen ist vor allem innerhalb des kurzfristigen prozeßnahen Regelkreises von Bedeutung, um einerseits die Qualität der Verschraubung und andererseits eine hohe Produktionsausbringung zu gewährleisten. Darüberhinaus sollten die Ergebnisse aus der Nacharbeit im übergeordneten Regelkreis zur Verfügung gestellt werden, so daß diese bei Entscheidungen zur langfristigen Prozeßoptimierung berücksichtigt werden können. Auch die Zuordnung der Anweisungen zu den Schraubfehlern muß mit Hilfe der auf Leitebene vorliegenden Informationen überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden.

5.8 Realisierung eines rechnergestützten Schraubprozeßregelkreises

Bei einer Prozeßregelung mittels Rechner ermittelt dieser aus den Prozeßdaten am Anfang und am Ende der Regelstrecke die günstigsten Führungsgrößen für die Regler zur Optimierung des Gesamtprozesses (Bild 5-16). Hierbei messen mehrere Meßgeber die jeweilige Regelgröße und beeinflussen über die Stellglieder den Prozeß. Nicht lineare Zusammenhänge zwischen den Werten der einzelnen Führungsgrößen lassen sich dabei berücksichtigen.

Im Bild 5-17 ist das Grundprinzip der Prozeßregelung für den diskontinuierlichen Schraubprozeß dargestellt. Vor dem eigentlichen Schraubprozeß stehen Informationen z.B. über die Lage der Bohrung in Bezug zur Sollposition, Tiefe und Durchmesser der Bohrung und Abmessungen der Schraube zur Verfügung. Da die Zielgröße, die Schraubenvorspannkraft, am Prozeßende nicht direkt meßbar ist, müssen aus den zugänglichen Größen wie Drehmoment, Drehwinkel, Einschraubtiefe oder Einschraubzeit Rück-

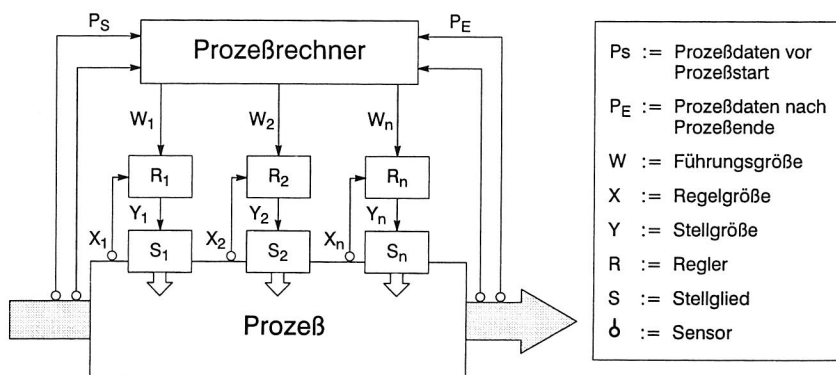


Bild 5-16: Prinzipdarstellung eines rechnergeführten Prozeßregelkreises

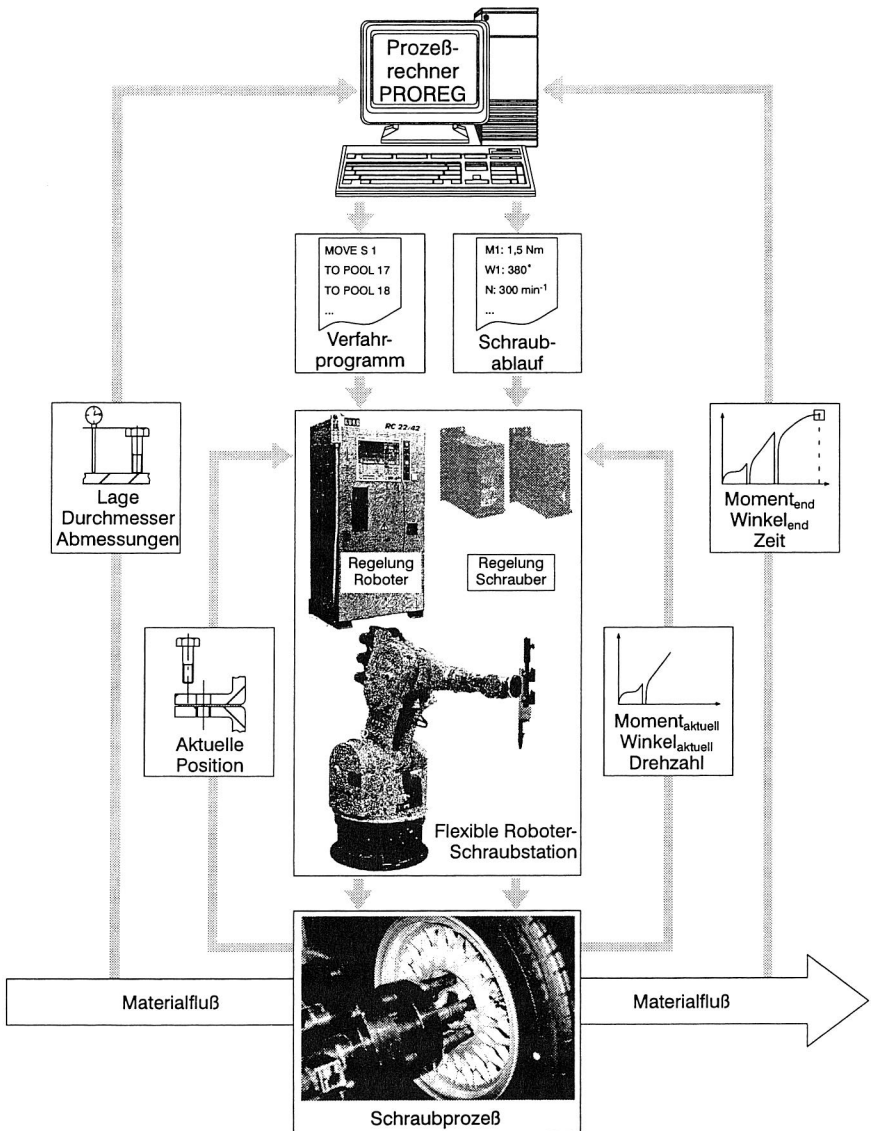


Bild 5-17: Rechnergestützter Prozeßregelkreis für das automatisierte Verschrauben

schlüsse auf die erfolgte Verschraubung gezogen werden. Hierbei ist die genaue Kenntnis der strukturellen Zusammenhänge – die mathematischen Beziehungen zwischen den genannten Prozeßgrößen – von wesentlicher Bedeutung. Sie sind zwar im wesentlichen bekannt, jedoch liegen eine Vielzahl von Einflüssen vor, die größtmäßig nicht oder nur schwer zu erfassen sind.

Gerade das bereitet beim Schraubprozeß Probleme. Die vorzugebende Zielgröße, z.B. das Anzugsmoment beim drehmomentgesteuertem Anziehen, läßt sich zwar durch

$$M_A = F_M \left(0,157 \times P + 0,577 \times d_2 \times \mu_G + \frac{D_{Km}}{2} \times \mu_K \right)$$

in Abhängigkeit von der geforderten Klemmkraft berechnen, jedoch werden die Reibwerte durch Schätzungen fest vorgegeben. Daher kann die erreichte Schraubenvorspannkraft je nach tatsächlich vorliegenden Reibungsverhältnissen von der Sollklemmkraft sehr stark abweichen. Ein Ziel muß daher sein, aus den übrigen Prozeßparametern genügend Informationen zu gewinnen um in einer Rückführung der Prozeßdaten neue Sollwerte vorzugeben um somit die erforderliche Schraubenvorspannkraft zu erreichen.

In jeder Stufe des Schraubvorganges kann durch die Sensorik ein Abbild des Prozesses entworfen werden. Die Bewertung der Sensorinformationen auf Grund der vorgegebenen binären Daten, Sollwerten und Toleranzbändern wird parallel zum Ablauf des Schraubvorganges vorgenommen. Erfolgt die Bewertung mit IO, so läuft der Schraubvorgang programmgemäß weiter. Erfolgt die Bewertung mit NIO, so werden in Abhängigkeit vom aufgetretenen Fehler geeignete Maßnahmen zur Behebung ergriffen. Hierbei sind die Steuerdaten für den Schrauber und Positionsdaten für den Roboter zu unterscheiden, die im Prozeßregelkreis zurückgeführt werden.

Es ist zu beachten, in wie weit in den laufenden bzw. schon abgeschlossenen Prozeß sinnvoll eingegriffen werden kann. Beim Nachziehen einer Schraube muß z. B. eine bereits bis zum Abschaltmoment festgezogene Schraube auf Grund der Fehlermeldung wieder ausgedreht und erneut angezogen werden. Die Gewinde- und Unterkopfreibung hat sich jedoch durch Glättungsvorgänge verändert, wodurch keine reproduzierbaren Voraussetzungen mehr herrschen.

Bei der Rückführung der Steuerdaten ist weiterhin zu unterscheiden, ob eine Maßnahme wie z. B. die Änderung der Sollwerte noch für die aktuelle Verschraubung wirksam werden soll, oder ob weitere Verschraubungen zur Trendanalyse durchgeführt werden müssen, bevor eine automatische oder auch manuelle Korrektur der Sollwerte erfolgt. Dabei ist jedoch darauf zu achten, daß durch einen Automatismus nicht zu schnell in den Prozeß eingegriffen wird, da sonst die Dynamik des Prozeßverlaufes bezüglich der Regeleingriffe unbeherrschbar wird. Eine mögliche Reaktion kann z. B. die Erhöhung des Sollmomentes beim Drehmomentgesteuertem Anziehverfahren sein, wenn durch erhöhte Unterkopfreibungswerte der Schraube, ausgelöst durch einen Chargensprung, mit Hilfe gezielter Überwachungsverfahren festgestellt wird, daß die

Endwerte der Verschraubungskurve das IO-Fenster tendenziell verlassen. Es muß gewährleistet sein, daß ein automatischer Regeleingriff nur erfolgt, wenn die Trendursache eindeutig identifiziert ist.

Die Ergebnisse derartiger Analysen und daraus folgender Vorschläge zu Parameteränderungen werden zentral am Prozeßrechner dem qualifiziertem Personal angezeigt, so daß die Entscheidung nicht automatisch getroffen wird, sondern auch spezifische Erfahrungen berücksichtigt werden können. Dabei muß gewährleistet sein, daß Änderungen nur in einem gewissen Bereich zulässig sind, und nur autorisiertes Personal diese veranlassen kann.

6 System zur Steuerung von automatisierten, flexiblen Schraubzellen

Im Kap. 2.3 wurden die grundlegenden Teilsysteme von teil- und vollautomatisierten Schraubstationen dargestellt, die durch ein übergeordnetes Steuerungssystem verknüpft werden müssen:

- Schraubspindel mit Leistungsteil und Prozeßsteuerung
- Handhabung der Schraubspindel
- Materialfluß von Schrauben und Werkstücken

Wie Untersuchungen gezeigt haben [107], werden die Ablaufsteuerungen dieser Stationen typischerweise von speicherprogrammierbaren Steuerungen übernommen. Diese koordinieren dabei den kompletten Materialfluß sowie die Montagegeräte, von einfachen Pick-and-Place-Geräten bis hin zu frei programmierbaren Handhabungssystemen. Die Regelung des Schraubwerkzeuges und damit des Schraubprozesses wird von einer separaten Steuer- und Meßelektronik durchgeführt, die die Signale der Meßwertgeber verarbeitet, bewertet und das Gesamtergebnis der Verschraubung ausgibt bzw. an die übergeordnete Ablaufsteuerung weiterleitet.

Gerade auf dem Gebiet der Schraubmontagetechnik ist es notwendig, die Prozeßparameter beim Zusammensetzen unterschiedlicher Produktkomponenten variabel und beeinflussbar zu halten, soll doch eine rasche Umstellung auf die Fertigung eines neuen Produktes möglich sein. Eine hohe Parametrierbarkeit der Zelle und die Möglichkeit, von einem zentralen Punkt aus in den Verschraubungsprozeß einzugreifen, um Ursachen eventuell auftretender Fehlverschraubungen zu beheben, lassen nicht nur eine höhere Anpassungsfähigkeit an den immer kürzeren Lebenszyklus eines Produktes, sondern auch eine gesteigerte Qualität der Verbindung erwarten.

Zudem sind in flexiblen Montagesystemen zum automatisierten Verschrauben komplexe Situationen und Reaktionen zu bewältigen, die den Einsatz von leistungsstarken Rechnersystemen auf Zellenebene erfordern. Um eine hohe Produktivität zu erreichen, ist eine optimale Abstimmung zwischen den Montage- und Handhabungsvorgängen und Peripherieabläufen erforderlich.

Bisherige Ablaufsteuerungen auf Basis von speicherprogrammierbaren Steuerungen sind nicht mehr ausreichend, um die vielfältigen Aufgaben, wie Werkstück- und Werkzeugtransport oder Prozeßsteuerung, -überwachung, -diagnose und -visualisierung zu übernehmen [95]. Gerade im Hinblick auf den Aufbau einer durchgängigen rechnerintegrierten Verfahrenskette (siehe Kap. 7) erweist sich dieser Systemaufbau wegen seiner geringen Flexibilität als nicht geeignet. Deshalb wurde eine neue Systemarchitektur auf Basis eines Zellenrechners realisiert, die im folgenden spezifiziert wird. Zunächst sind jedoch die Steuerungsfunktionen der Montagezelle durch eine Modularisierung der Montageaufgabe gezielt zu strukturieren, damit diese funktional getrennt den verschiedenen Steuerungshierarchieebenen zugeordnet werden können [99].

6.1 Untergliederung der Schraubaufgabe in Teilprozesse

Als Grundlage für den Aufbau einer hierarchisch gegliederten Zellensteuerung wird der gesamte Schraubablauf in Teilvorgänge untergliedert. Diese Strukturierung (Bild 6-1) erleichtert den Entwurf des Softwaresystems für die automatisierte Schraubzelle. Die Teilabläufe der Bereitstellung umfassen die notwendigen Vorgänge, um die ungeordnet bereitstehenden Verbindungsteile sowie die Werkstücke in richtiger Orientierung an den Montageort zu bringen. Diese Funktionen sind bei Schraubstationen, deren Bauteile manuell zugeführt werden, nicht oder nur rudimentär enthalten. Kernaufgabe der Handhabungstechnik ist die Positionierung des Schraubwerkzeuges über der jeweiligen Schraubstelle des Werkstückes. In der Regel wird hierzu zeitgleich am Fügeort die Schraube bereitgestellt.

Der eigentliche Schraubablauf läßt sich in acht Phasen unterteilen. Nach dem Einkuppeln des Schrauberbits in den Schraubenkopf muß die Schraube in das Bauteilgewinde

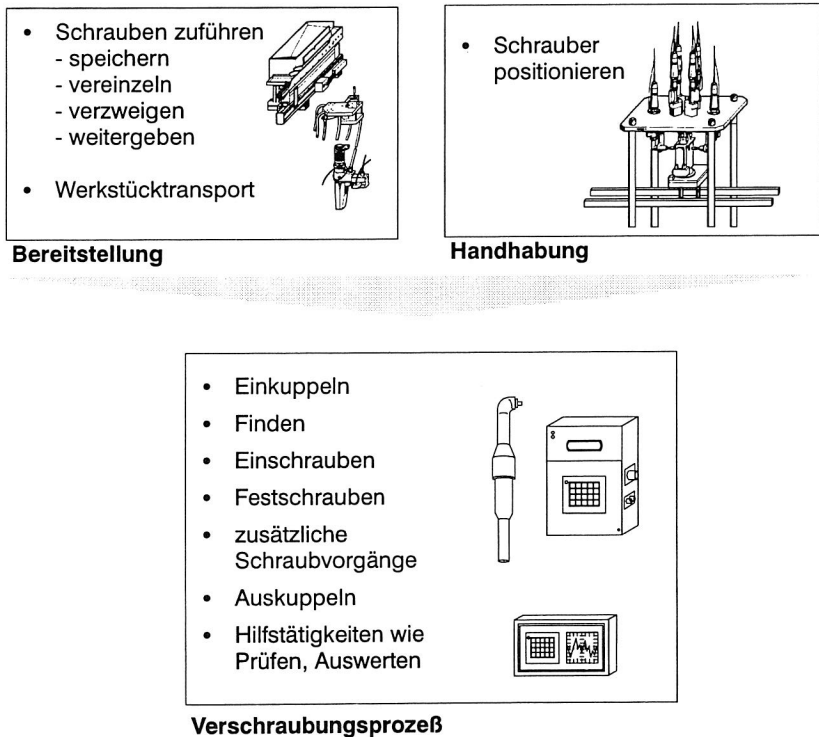


Bild 6-1: Unterteilung des automatisierten Schraubablaufs in Teilprozesse

finden. Ist dieser Teilablauf korrekt abgeschlossen, so wird die Schraube ein- bzw. festgezogen. Zusätzliche Schraubvorgänge, wie z. B. das Pulsen zum Ausgleich von Setzungserscheinungen, können folgen. Nach der Trennung von Werkzeug und Schraube (Auskuppeln) können Hilfstätigkeiten, wie das Anbringen von Schraubensicherungselementen oder die Markierung der fertigen Verbindung, ausgeführt werden.

Diese Schema einer automatischen Verschraubung ist als Muster zu betrachten, mit dessen Hilfe die Steuerungsvorgänge allgemein beschrieben werden können. Dabei können einzelne Phasen wegfallen, sich wiederholen oder in ihrer Reihenfolge vertauscht werden.

6.2 Systemkonzept zur Steuerung einer flexiblen Schraubzelle

6.2.1 Funktionshierarchien des Softwaresystems

Für das zu entwickelnde Steuerungssystem wird ein Architekturmodell mit sechs Ebenen zugrunde gelegt [95], [99]. Durch die Untergliederung kann jede Funktion einer Schicht als Softwaremodul realisiert und damit einem Prozeß zugeordnet werden. Bild 6-2 zeigt das an die Schraubtechnik angepaßte Hierarchiemodell.

In der Ebene 6 wird die Gesamtaufgabe "Zellenauftrag abwickeln" koordiniert. Die einzelnen Fertigungsaufträge sind zu übernehmen und in eine Auftragswarteschlange entsprechend der Priorität einzulasten. Auf der Ebene 5 ist das für alle Montagezellen zentrale Element der Ablaufsteuerung angeordnet. Sie bildet deshalb den Kernprozeß für die zeitliche und logische Koordinierung der vorgegebenen Arbeitsgänge und der logischen Befehle für das Handhabungs- und Materialflußsystem [95]. Daneben sind die Funktionen 'Identifizieren' und 'Überwachen' zu berücksichtigen.

Aufgabe der Ebene 4 und 3 ist es, eine Operation in eine Reihe von Einzelaktionen und diese wiederum in elementare Grundfunktionen zu zerlegen. Als Ausgabe der Ebene 3 entstehen einfache Gerätebefehle, die von vielen Steuerungssystemen verstanden werden. Die beiden untersten Hierarchieebenen sind gerätespezifisch ausgeführt, es erfolgt die Umwandlung der Gerätebefehle in die notwendigen Steuersignale. Umgekehrt werden die Signale der angeschlossenen Geber an die Steuerung zurückgegeben.

6.2.2 Universelles Konzept eines rechnergestützten Steuerungssystems

Zentrales Element der Steuerungssoftware bildet die Ablaufsteuerung, die wegen der Komplexität der Gesamtaufgabe auf einem Rechnersystem implementiert werden muß. Als Zellenrechner wird ein konventioneller PC unter dem Betriebssystem MS-DOS/Windows eingesetzt. Auf diesem ist die komplette Auftragsverwaltung und Ablaufsteuerung implementiert (Bild 6-3), d.h., von dieser Hierarchieebene aus werden alle Aktionen der Montagezelle koordiniert.

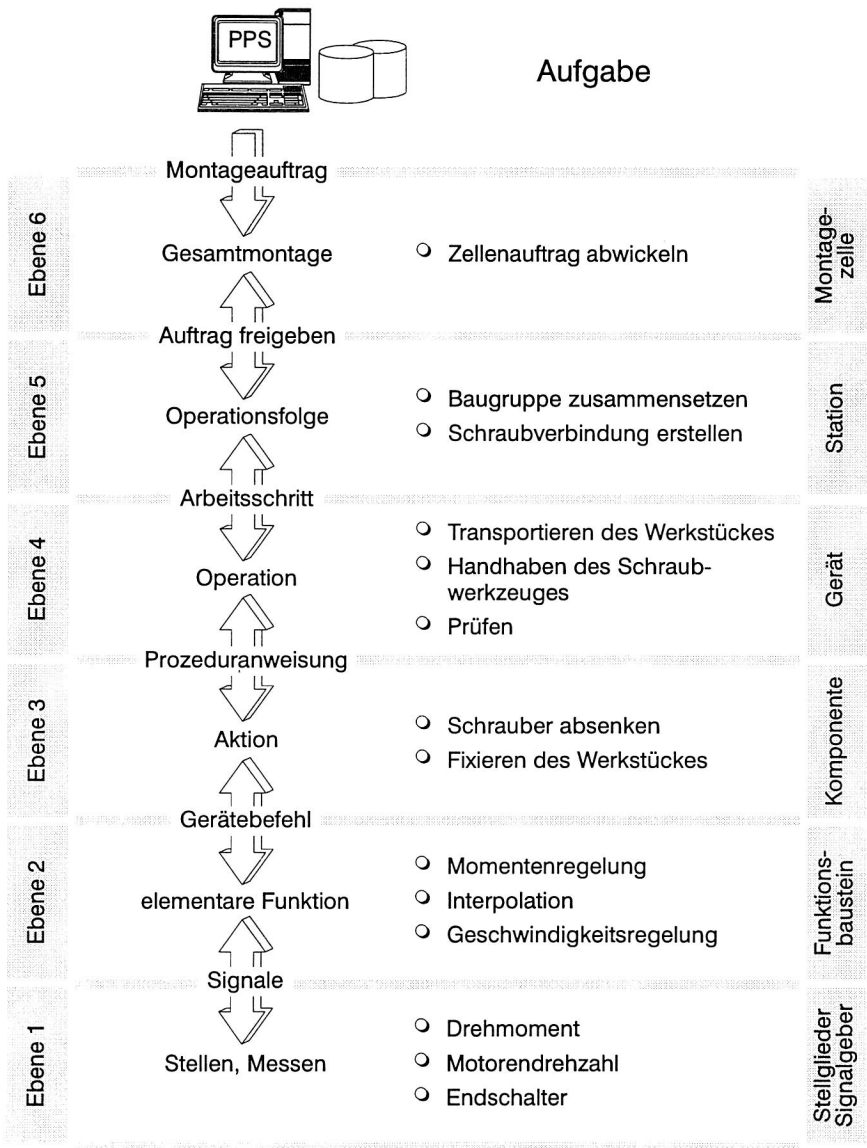


Bild 6-2: Funktionshierarchie einer flexibel automatisierten Schraubzelle nach [95]

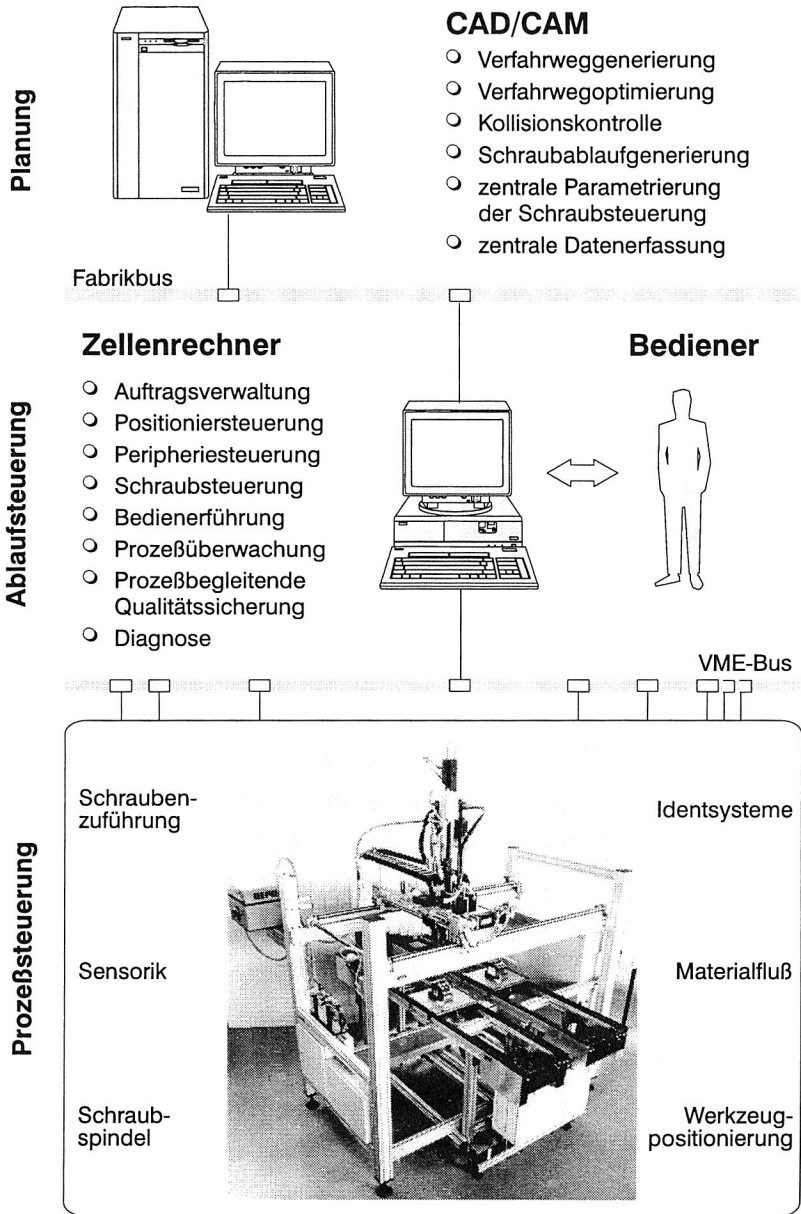


Bild 6-3: Systemaufbau der realisierten Montagezelle

Der Zellenrechner stellt außerdem die Schnittstelle zum Bediener in Form einer graphischen Windows-Bedienoberfläche zur Verfügung, um eine gezielte Bedienerführung und Diagnose zu ermöglichen. Er dient damit auch als Instrument zur prozeßbegleitenden Qualitätssicherung und als Medium zur Zwischenspeicherung von Prozeßdaten. Im weiteren wird das technologieorientierte Konzept der realisierten Steuerungssoftware ausgeführt.

Ausgehend vom logischen Aufbau der Montagezelle und den vorliegenden Arbeitsgängen werden entsprechende Handhabungs- und Fügevorgänge sowie der zelleninterne Transport angestoßen. Allerdings sind über eine Bedienerchnittstelle auch vorbereitende Maßnahmen, wie die Konfiguration der Montagezelle oder die Programmierung des Handhabungssystems und der Prozeßsteuerung zu ermöglichen (Bild 6-4).

Die hardwarenahen Funktionen der Zellensteuerung werden durch das Programm auf einer 68000'er Grundkarte realisiert (siehe Kapitel 6.3.2). Dieses stellt der übergeordneten Instanz, dem Zellenrechner, eine Reihe von Grundbefehlen für die einzelnen Teilaufgaben zur Verfügung. Der Zellenrechner muß aus diesen einfachen Grundfunktionen die komplexen Funktionen der Steuerung zusammensetzen, sodaß beispielsweise eine vollautomatische Auftragsbearbeitung möglich wird. Der Zellenrechner ist wiederum mit einer übergeordneten Instanz verbunden, von der er die Aufträge und Verfahrenprogramme erhält. Insgesamt ergibt sich somit eine Hierarchie, die dem Prinzip der schrittweisen Verfeinerung entspricht: Die Komplexität der Funktionen sinkt, je näher sich eine Instanz an der Hardware befindet. Die folgende Abbildung zeigt das Gesamtkonzept im Überblick (Bild 6-5).

Die Kommunikation erfolgt über eine serielle Leitung, auf die die Prozesse nicht unabhängig voneinander zugreifen können, sodaß eine Kontrollinstanz unbedingt erforderlich ist. Der Knoten FTP ist für die Übernahme der Verfahrenprogrammdateien vom übergeordneten Leitrechner verantwortlich. Er hat keine direkte Verbindung zu den Prozessen des Zellenrechners, da die Übertragung der Verfahrenprogramme unabhängig erfolgen soll. Die Verbindung wird deshalb über das Dateisystem des Betriebssystems hergestellt.

6.3 *Hardwarekomponenten zur Systemintegration auf Prozeßebene*

Als Testumgebung wurde der in Bild 6-3 skizzierte Aufbau einer typischen flexibel automatisierten Schraubstation gewählt. In den folgenden Kapiteln werden die verwendeten Hard- und Softwarekomponenten in der realisierten Systemumgebung beschrieben sowie der steuerungstechnische Aufbau aufgezeigt.

6.3.1 *Flexible Montagezelle für die Schraubmontage*

Es läßt sich eine Aufteilung in die drei wesentlichen Hardwarekomponenten Bereitstellung, Handhabung und Prozeßtechnik vornehmen.

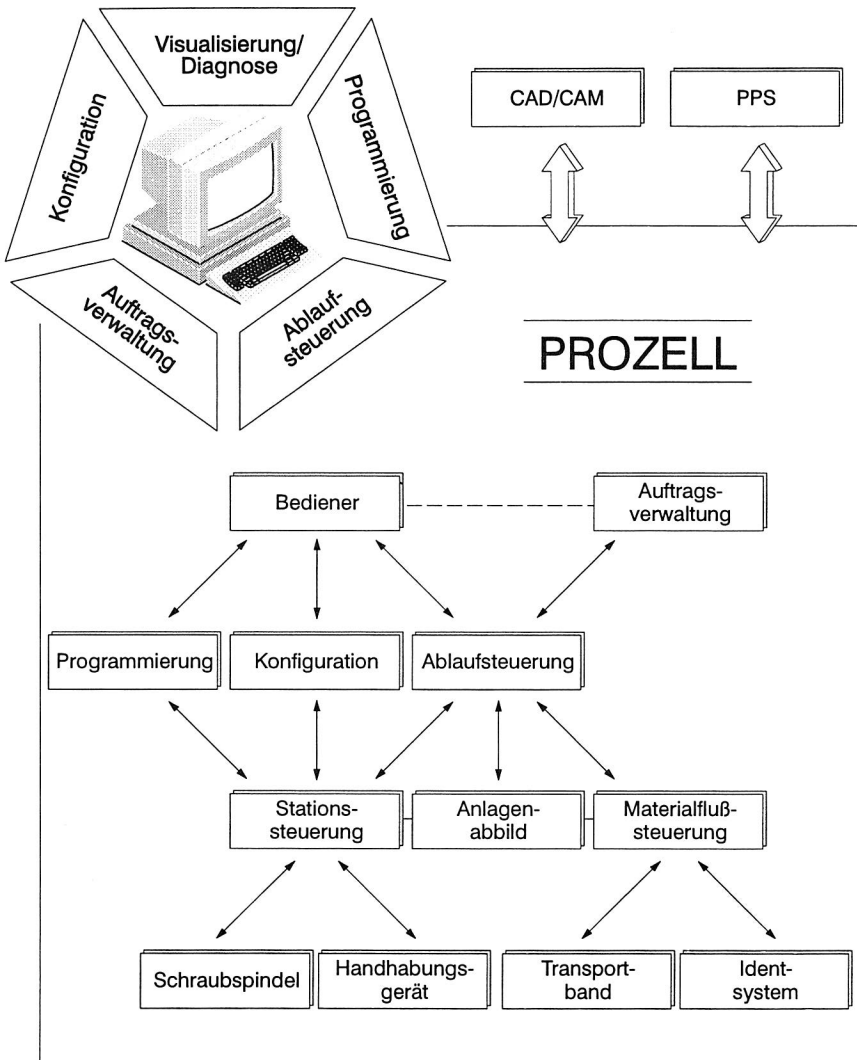


Bild 6-4: Aufbau des Softwaresystems und realisierte Module in PROZELL

Einrichtungen für den zelleninternen Materialfluß

Der Materialfluß vollführt den Transport der Schrauben und der Werkstücke innerhalb der Zelle. Die Vorrichtungen sind im Einzelnen:

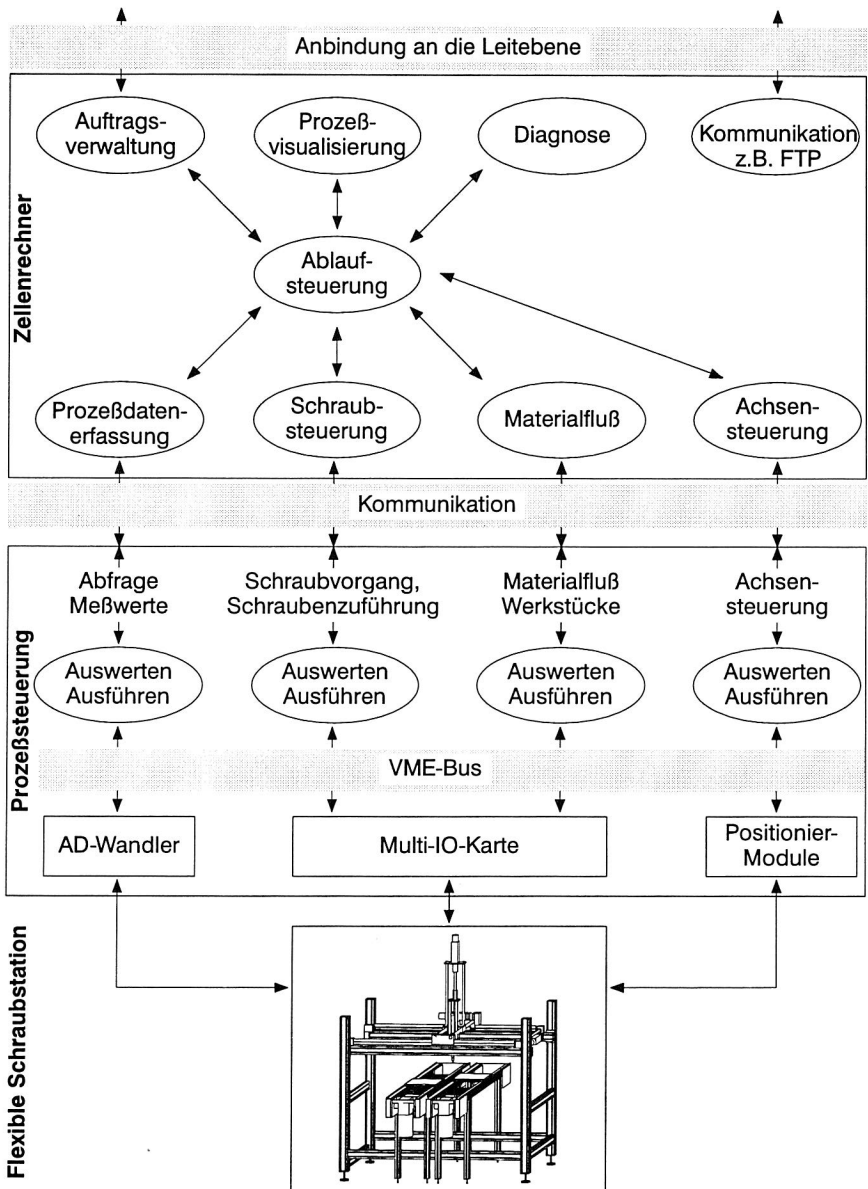


Bild 6-5: Softwarekonzept des Zellenrechners

- Übergabeeinheit vom zellexternen Materialfluß (FTS)
- Transport der Produkte auf Werkstückträgern über Doppelgurtbandsysteme in den Arbeitsraum
- Identifikation der Produkte über Datenträger
- Zentrieren der Paletten an der jeweiligen Montageposition über Spannvorrichtungen
- Speichern und Vereinzeln der Schrauben durch Vibrationswendelförderer mit Zuteileinheit
- Zuführung der vereinzelter Schraube in das Mundstück des Schraubers mit Hilfe von Druckluft; zugehörige Sensorik überwacht den Vorgang

Handhabung

Wie eine Untersuchung gezeigt hat [82], genügen in der überwiegenden Anzahl von Verschraubungsfällen Portalsysteme den Anforderungen bezüglich der Handhabungstechnik in automatisierten Schraubstationen, da der kartesische Arbeitsraum der Produktgeometrie der Werkstücke in der Regel sehr gut angepaßt ist.

- Positionierung des Schraubwerkzeugs über dem Fügeort durch ein dreiachsiges Portalsystem
- Jede Achse ist mit einem Drehstrom-Servomotor, sowie Gebern für Drehwinkel und Winkelgeschwindigkeit ausgestattet
- Die Geschwindigkeitsregelung der Achsen wird über einen Drehstrom-Pulsumrichter realisiert

Verschraubungsprozeß

- Verschrauben der Fügepartner durch elektronische Schraubspindel mit konventioneller Schraubersteuerung und zugehöriger Leistungselektronik
- Drehmoment und Drehwinkel werden über entsprechende Sensorik erfaßt
- Der Schrauber besitzt eine Vorrichtung zum Auswerfen der Schraube

6.3.2 Unterlagerte Prozeßsteuerung auf Basis des VME-Bus

Den Kern der unterlagerten Prozeßsteuerung bildet eine Steuerungskarte mit einem MC 68000-Prozessor. Die Grundkarte ist über den VME-Bus mit weiteren Steuerungsmodulen verbunden, die jeweils spezifische Steuerungsfunktionen übernehmen (Bild 6-6).

Der VME-Bus stellt ein wesentliches Konzept für den Aufbau modularer Mikrocomputersysteme dar. Er wurde von der Firma Motorola entwickelt und unterstützt die Busstruktur der 16/32-Bit-Mikroprozessorfamilie MC 68000. Da sich diese Familie zu einem Industriestandard bei 16- und 32-Bit-Mikroprozessoren entwickelt hat, ist der VME-Bus ein optimales Bussystem für eine Vielzahl von Mikroprozessor-Anwendungen. Folgende Leistungsmerkmale kennzeichnen den VME-Bus:

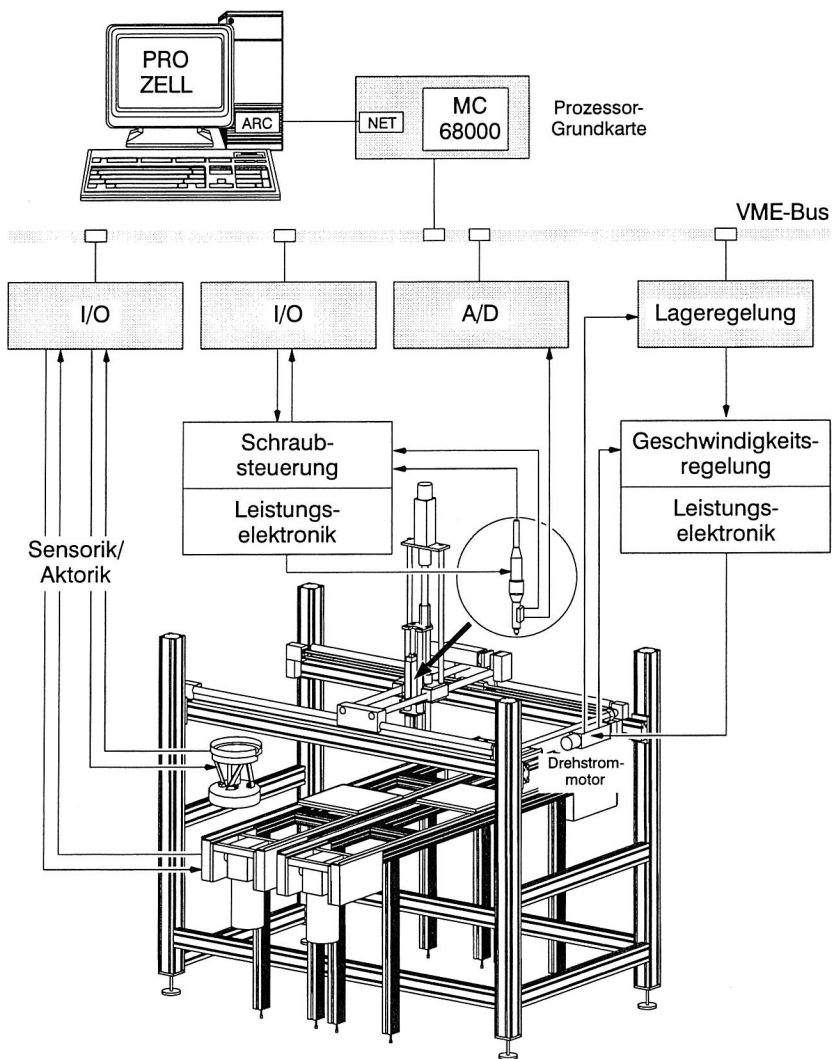


Bild 6-6: Hardwarekomponenten der Prozeßsteuerung

- Unterstützung von Mikroprozessor-Architekturen bis zu 32 Bit Wortbreite.
- Unterstützung von Multiprozessor-Systemen.
- Datendurchsatz im praktischen Betrieb 34 MByte/s.
- Vollständig asynchrones, multiplexfreies Busprotokoll.
- Prioritätsgesteuerte Busbelegung über vier Prioritätsebenen und zusätzlichem Daisy-Chain auf jeder Ebene.
- Unterstützung von zentraler oder verteilter Interrupt-Verarbeitung in sieben Prioritätsebenen.

Für den VME-Bus existiert eine breite Palette buskompatibler Produkte, die von unterschiedlichen Herstellern angeboten werden. Für die industrielle Automation stehen eine Reihe prozeßspezifischer Ein-/Ausgabe-Karten zur Verfügung. Der Umfang der Modulplätze kann dabei flexibel an die Gegebenheiten der jeweiligen Anwendung angepaßt werden. Der VME-Bus ist heute in der Industrie ein weitverbreitetes Bussystem für Multiprozessoranwendungen [90].

In der realisierten Testumgebung wurde deshalb die Achsststeuerung für die Schraubwerkzeugpositionierung ebenso wie die restlichen spezifischen SPS-Steuerungsfunktionen auf eine Prozessorkarte mit VME-Bus Schnittstelle verlagert.

Das Basisimodul zur Lageregelung der Achsen enthält hierzu im wesentlichen die Bewegungscontroller-Bausteine und die zugehörigen D/A-Wandler, die die Steuerungsspannung für die Leistungsteile der Servomotoren-Ansteuerung erzeugen. Über die Prozessorgrundkarte werden die Steuerbefehle von der übergeordneten Steuerungshierarchie an die Achsenmodule abgesetzt. Umgekehrt werden die Statuszustände der Achsen von dem Programm, das im Speicher der Grundkarte abgelegt ist, interpretiert und entsprechend umgesetzt.

Über Eingangs-/Ausgangskarten ist die Sensorik und Aktorik der kompletten Montagezelle angebunden. So wird beispielsweise der Prozeßablauf der elektronischen Einbauschraubspindel mit der zugehörigen Steuerungs- und Leistungselektronik über diese Module abgewickelt. Auch die Koordination der Prozeßschritte zur Teilezuführung der Schrauben mittels Sortierautomat und Vereinzelungseinheit werden auf der Grundkarte abgewickelt. Die Basis-Karte enthält hierzu neben der VME-Bus-Anbindung eine RS-232- bzw. eine ARC-Net-Schnittstelle, über die sie mit der übergeordneten Steuerungsinanz verbunden ist.

6.4 Systemstart und Auswahl der Betriebsart

Über das zentrale Steuerungsfenster (Bild 6-7) kann die gewünschte Betriebsart des Zellenrechners angewählt werden. Folgende Kernmodule von PROZELL lassen sich hierüber starten:

Im **Handbetrieb** können gezielt die Grundfunktionen der Montagezelle durch den Bediener angestoßen werden. So lassen sich beispielsweise die Achsen des Portalroboters einzeln grafisch-interaktiv bewegen und exakt positionieren, sowie die Materialflußaktionen bequem über die Benutzeroberfläche aktivieren.

Der **Testbetrieb** ermöglicht ein gezieltes Austesten der Montageprogramme des Handhabungsgeräts. Im **Automatikbetrieb** werden die erzeugten Aufträge gemäß Prioritätsvorgabe in eine Auftragswarteschlange eingereiht und vollautomatisch abgearbeitet.

Neben den drei Verfahrensmodi ermöglicht der **Teach-Modus** das Erstellen von neuen bzw. das Abändern von bestehenden Montageprogrammen. Die Konfiguration des Handhabungsgeräts der Montagezelle sowie die Eingabe der **technischen Daten** wird über den letzten Menüpunkt initiiert.

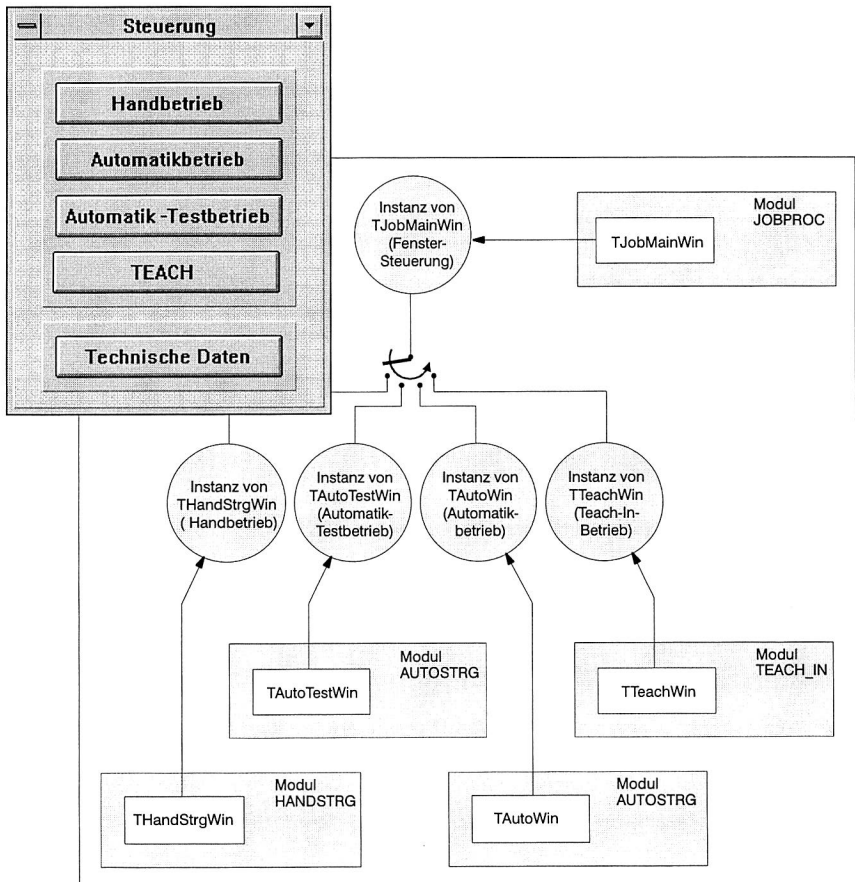


Bild 6-7: Objektorientierte Prozeßstruktur zur Auswahl der Betriebsart

6.5 Inbetriebnahme des Handhabungsgerätes

Mit diesem Programmtool ist es möglich, die grundsätzliche Konfiguration des Handhabungsgerätes in der Zellenrechnersoftware abzubilden. Neben der Eingabe der Anzahl der Linearachsen können auch Rotationsachsen vorgesehen werden (Bild 6-8). Um die Steuerbefehle an die unterschiedlichen Gerätesteuern absenden zu können (siehe hierzu auch Bild 6-2 – Ausgabe der Ebene 3), kann die Schnittstelle entsprechend konfiguriert und das jeweilige Kommunikationsprotokoll festgelegt werden.

Für jede ausgewählte Achse sind die technischen Daten vorzugeben. Neben grundlegenden Eingaben, wie die Festlegung des Arbeitsraums, maximal zulässigen Achsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen, können auch die Parameter der Lageregler der Positioniermodule hierüber sehr komfortabel eingegeben und verändert werden. Dies ist insbesondere bei der empirischen Lagerregler-Bestimmung bei der Inbetriebnahme von Handhabungsgeräten sehr hilfreich.

6.6 Handbetrieb der Montagezelle

Das Modul zur Handsteuerung erlaubt eine komfortable Bedienung der wichtigsten Steuerungskomponenten der Montagezelle (Bild 6-9). Für das Portalsystem werden die aktuellen Zustandswerte der Achsen, wie Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Status, dem Bediener angezeigt. Für das Einrichten des Handhabungssystems stellt das Modul folgende Befehle zur Verfügung:

- Referieren einer Achse
- Grafisch-Interaktives Verfahren einer Achse mit beliebiger Schrittweite
- Exaktes Positionieren einer Achse durch direkte Eingabe der Sollposition
- Anhalten der Achsen, wobei die Achsenantriebe ungeregelt bleiben

Neben dem Handhabungssystem lassen sich auch die Materialflußaktionen und die Prozeßsteuerung des Schraubwerkzeuges bequem über die Benutzeroberfläche aktivieren bzw. deren aktuelle Systemzustände abrufen.

6.7 Programmierung der Handhabungssysteme

Um die Montagezelle im vollautomatischen Betrieb ablaufen zu lassen, sind für das Handhabungssystem und die Schraubsteuerung entsprechende Prozeßabläufe bereitzustellen bzw. zu programmieren.

Zur Integration eines Handhabungsgerätes in die Systemumgebung einer flexibel automatisierten Schraubzelle genügt eine einfache und kostengünstige Positioniersteuerung. Wichtig ist jedoch, daß diese Steuerung universell einsetzbar ist und somit flexibel an die unterschiedlichen Zellenkonfigurationen und Handhabungsgerätetypen angepaßt werden kann. Zudem sollte die Positioniersteuerung eine Schnittstelle zur Planungsebene besitzen, um komplette und abgesicherte Bewegungsprogramme von dort übertragen zu können.

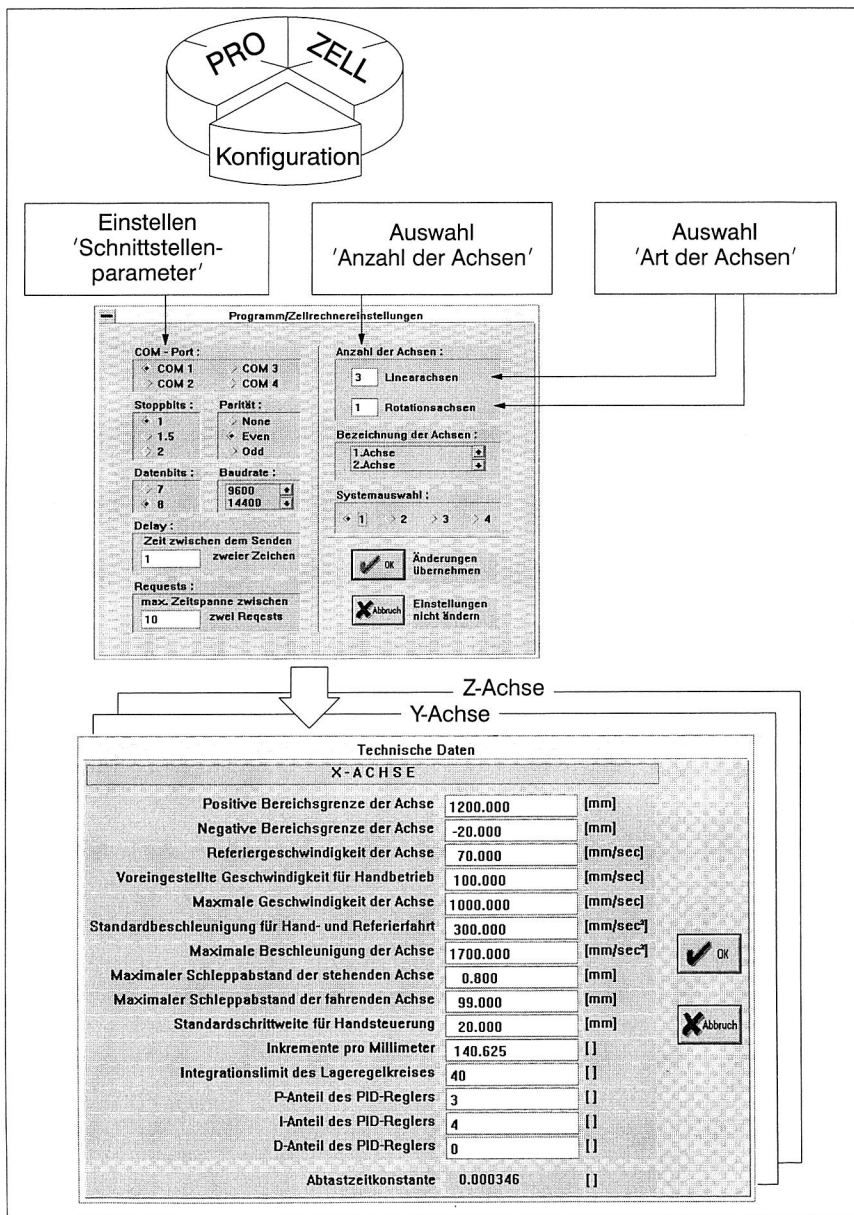


Bild 6-8: Konfigurationstool zur Festlegung der Achsenanzahl des Handhabungsgerätes und Eingabe der zugehörigen technischen Daten

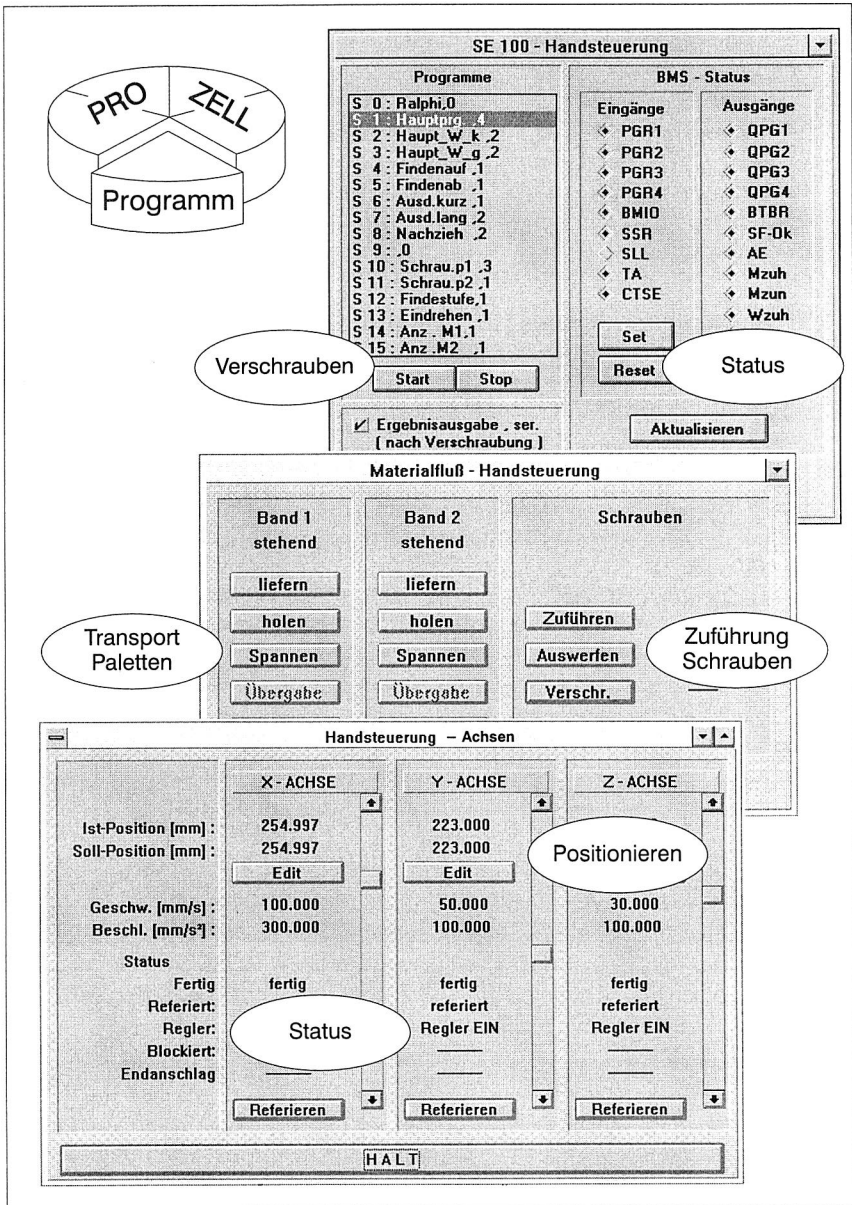


Bild 6-9: Steuerungsfenster für den Handbetrieb der automatisierten Schraubzelle

Da bisherige Positioniersteuerungen diesen Anforderungen nicht gerecht wurden, ist eine eigene Steuerung mit zugehörigem, erweiterbarem Befehlssatz für die spezifizierte MC 68000-Karte in Kombination mit einer übergeordneten PC-Logik entwickelt worden. D. h., die eigentliche Positioniersteuerung, sowie die Regelung und Überwachung läuft auf der Prozessor-Grundkarte ab. Diese übernimmt das Multitasking über die einzelnen Achsen, die Befehlsinterpretation und grundlegende Routinen wie die Eingabe der Daten, die Bewegungsausführung und -überwachung oder beispielsweise das Referieren. Der PC dient dagegen zur Eingabe von Parametern, Anzeige von Positionen oder dem Aufruf und der Abspeicherung von Bewegungsprogrammen.

6.7.1 *Entwickelter Befehlssatz für Positioniersteuerung*

Der Befehlssatz einer Verfahrprogramm-Datei (Vfp-Datei) ist so gewählt, daß eine möglichst breite Palette von Anwendungssituationen abgedeckt werden kann. Zudem sind die Funktionen unabhängig von den Eigenschaften des ausgewählten Handhabungsgerätes gehalten, wodurch eine Erweiterung oder Umgestaltung des Portalsystems erleichtert wird.

Für die Abwicklung eines Auftrags bedarf es Befehlen für die Positionierung der Achsen, sowie der Angabe von Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerten. Ferner müssen die Technologieparameter für den Schraubprozeß, wie z. B. die Anzahl der Schraubstufen, die Auswahl des Schraubprogramms und der zugehörigen Parameter (Anzugsmoment, Weiterdrehwinkel etc.) angegeben werden können. Bewegungen der Achsen und der Schraubvorgang selbst werden durch spezielle Befehle ausgelöst. Zudem werden noch weitere Anweisungen verwendet, um eine weitgehend universelle Programmierbarkeit zu gewährleisten. In Bild 6-10 sind die wichtigsten Grund- und Technologiebefehle sowie ein beispielhaftes Verfahrprogramm aufgeführt. Ein Verfahrprogramm kann in drei Teile untergliedert werden: Vorspann, Hauptteil und Nachspann.

Vorspann/Nachspann

Im Vorspann, einem standardisierten Anfang, werden Grundeinstellungen getroffen und die Betriebsmodi festgelegt. Außerdem werden die Unterprogramme für die Fehlerbehandlung und die Grundstellungsfahrt bereitgestellt. Die Verfahrprogramme beginnen alle einheitlich mit diesem Vorspann. Ebenso wird durch das standardisierte Programmende der Schrauber in die Grundposition zurückgeführt.

Hauptteil

Der Ablauf im Hauptprogramm erfolgt nach einem festen Schema. Nach der Übertragung der Achsbeschleunigung und -geschwindigkeit sowie der Zielposition wird die Bewegung durch den 'GO_ALL'-Befehl gestartet. Die Zeilen 10-15 und 12-22 stellen je eine komplette Achsbewegung dar. Ist die Schraubspindel über einer Schraubstelle positioniert, so können mit 'SCHRAUBPUNKT' entsprechende Technologie-Unterprogramme angestoßen und damit der Verschraubungsvorgang ausgelöst werden. Im

Grundbefehle

Befehl	Parameter
SET_ACC	<Achsennummer> <Beschleunigung>
SET_VEL	<Achsennummer> <Geschwindigkeit>
SET_POS	<Achsennummer> <Position>
GO_ALL	

Erweiterte Befehle

Befehl	Parameter
DATEI	<Dateiname>
ON_ERROR	<Fehlernummer>
SAVE_POS	<Dateiname> <Achsennummer>

Vorspann

- 1 STRECKENSTEUERUNG
- 2 REL_POS_MODE
- 3 DATEI WerPos.vfp
- 4 ON_ERROR 1 Abwurf.vfp
- 5 DATEI Home.vfp

Schraubstellenabhängiger Code

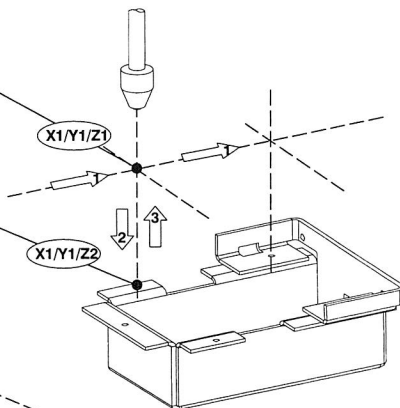
- 6 SET_ACC 0 300.000
- 7 SET_ACC 1 300.000
- 8 SET_ACC 2 300.000
- 9 EINSPRUNG
- 10 SET_VEL 0 200.000
- 11 SET_VEL 1 200.000
- 12 SET_VEL 2 200.000
- 13 SET_POS 0 40.000
- 14 SET_POS 1 30.000
- 15 SET_POS 0 -42.000
- 16 GO_ALL
- 17 SET_VEL 0 200.000
- 18 SET_VEL 1 200.000
- 19 SET_VEL 2 200.000
- 20 SET_POS 0 40.000
- 21 SET_POS 1 30.000
- 22 SET_POS 0 -22.000
- 23 GO_ALL
- 24 SCHRAUBPUNKT P1.scr
- 25 SET_VEL 0 200.000
- 26 SET_VEL 1 200.000
- 27 SET_VEL 2 200.000
- 28 SET_POS 0 40.000
- 29 SET_POS 1 30.000
- 30 SET_POS 0 -42.000
- 31 GO_ALL
- 32 EINSPRUNG
- 33 SET_VEL 0 200.000
- 34 ...

Nachspann

N DATEI Home.vfp

Technologiebefehle

Befehl	Parameter
SCHRAUBPKT	<Technologieprogr.>
EINSPRUNG	



Bewegungsprogramm für
komplette Schraubstelle

Bild 6-10: Aufbau eines Verfahrensprogramms mit zugehörigen Steuerungsbefehlen

vorliegenden Vfp-Beispiel finden wir damit zwei Achsbewegungen, einen Verschraubungsprozeß und eine weitere Achsbewegung.

Dies entspricht dem Ablaufschema in Bild 6-11. Zuerst wird die Position über der Einschraubstelle angefahren, dann die Schraubposition selbst. Anschließend startet der eigentliche Technologieprozeß. Zuletzt wird wieder die Ausgangsposition über der Schraubstelle angefahren. Die Zeilen 10-31 stellen ein Bewegungsprogramm für einen kompletten Verschraubungsvorgang einschließlich der Technologieunterprogramme dar. Der Hauptteil eines Vfp's besteht quasi aus einer Aneinanderreihung von Schraubstellen.

Die Achsen bewegen sich bei einem Positioniervorgang von einer Ausgangsposition zu einem neuen Zielort unabhängig voneinander. Die möglichen Geschwindigkeitsprofile der Bewegung einer Achse zeigt Bild 6-12.

Der Achsmotor wird mit der angegebenen Beschleunigung auf die vorgegebene Geschwindigkeit v_{sol} beschleunigt. Der Controller berechnet den Zeitpunkt, an dem die

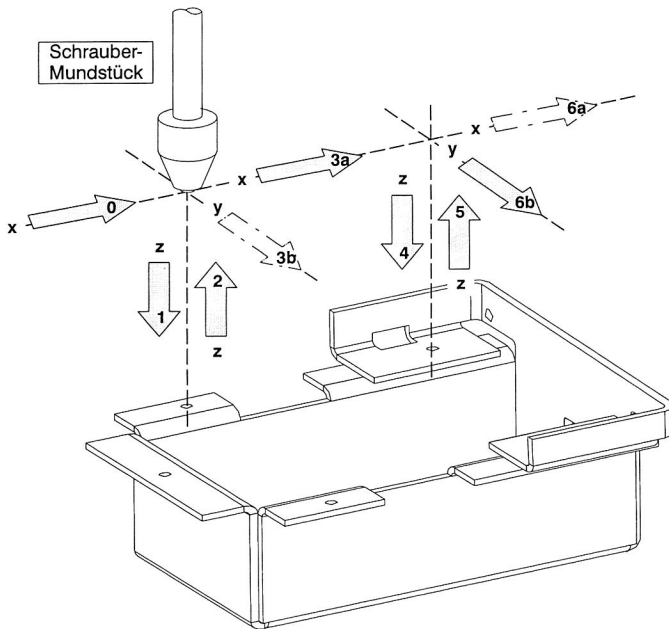


Bild 6-11: Typischer Zyklus einer Verfahrbewegung im automatisierten Schraubprozeß

Achse wieder mit der gleichen, jedoch negativen Beschleunigung abgebremst werden muß, so daß die Achse möglichst genau auf dem Zielpunkt zu stehen kommt. Dieser Bewegungsablauf erzeugt ein trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil (Profil 1). Ist die Geschwindigkeit sehr hoch oder die Beschleunigung klein gewählt, kann es passieren, daß die Achse die vorgegebene Geschwindigkeit gar nicht erreicht. Es entsteht das dreieckförmige Profil 2.

Typischerweise enden die Bewegungen der Achsen nicht zum gleichen Zeitpunkt, da sich das Schrauberwerkzeug zwischen Start- und Zielpunkt auf einer undefinierten Bahn bewegt. In der Regel ist jedoch eine Bewegung des Werkzeugs zumindest auf einer Geraden zwischen den beiden Punkten notwendig. Starten und enden die Bewegungen aller Achsen zu gleichen Zeitpunkten, so resultiert daraus annäherungsweise die gewünschte Gerade. Zur Synchronisation der Bewegungen aller Achsen müssen die Verfahrzeiten an die Achse mit dem längsten Zeitbedarf t_{\max} angepaßt werden. Dazu werden die Geschwindigkeiten der anderen Achsen entsprechend verringert.

Über den Befehl 'STRECKENSTEUERUNG' werden die Geschwindigkeitswerte automatisch bei jedem 'GO_ALL'-Kommando entsprechend verändert. Dazu wird wie folgt vorgegangen:

- Bestimmen der Verfahrzeiten für die anstehenden Bewegungen aller Achsen
- Auswahl der Achse mit der längsten Verfahrzeit t_{\max}
- Synchronisation der Geschwindigkeiten aller Achsen, so daß ihre Bewegungen nach t_{\max} Zeiteinheiten enden

Zur Bestimmung der Verfahrzeit t_v einer Achse müssen die in Bild 6-12 skizzierten Geschwindigkeitsprofile unterschieden werden. Für das Profil 1 berechnet sich die Zeit t_v

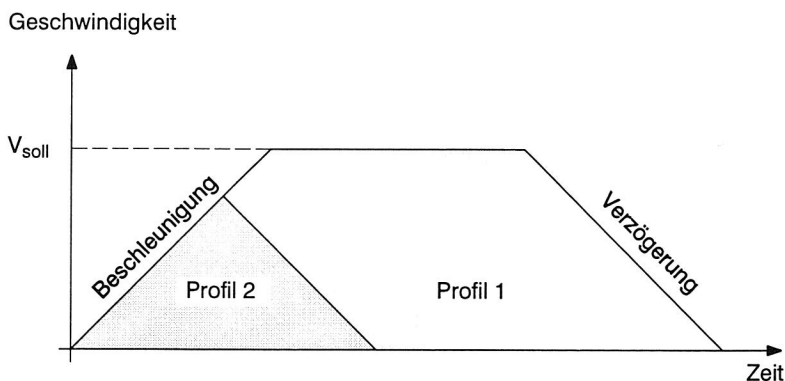


Bild 6-12: Mögliche Geschwindigkeitsprofile der Achsen

für die Bewegung der Achse aus den Formeln einer gleichmäßig beschleunigten und einer gleichförmigen Translation und lautet aufgelöst nach t_v :

$$t_v = \frac{v_{\text{soll}}}{a} + \frac{s}{v_{\text{soll}}}$$

Dabei ist v_{soll} der aktuelle Geschwindigkeitsparameter, der mit 'SET_VEL' gesetzt wurde, a der aktuelle Beschleunigungsparameter und s die zurückzulegende Strecke. Im Fall des Geschwindigkeitsprofils 2 bestimmt sich die Verfahrzeit aus:

$$t_v = 2 \times \sqrt{\frac{s}{a}}$$

Welches der beiden Profile vorliegt, kann mit Hilfe der maximal erreichbaren Geschwindigkeit v_{max} , bei konstanter Beschleunigung a bestimmt werden. Ist $v_{\text{max}} < v_{\text{soll}}$, so liegt das dreieckförmige Geschwindigkeitsprofil 2 vor, ansonsten entspricht es dem trapezförmigen Profil 1.

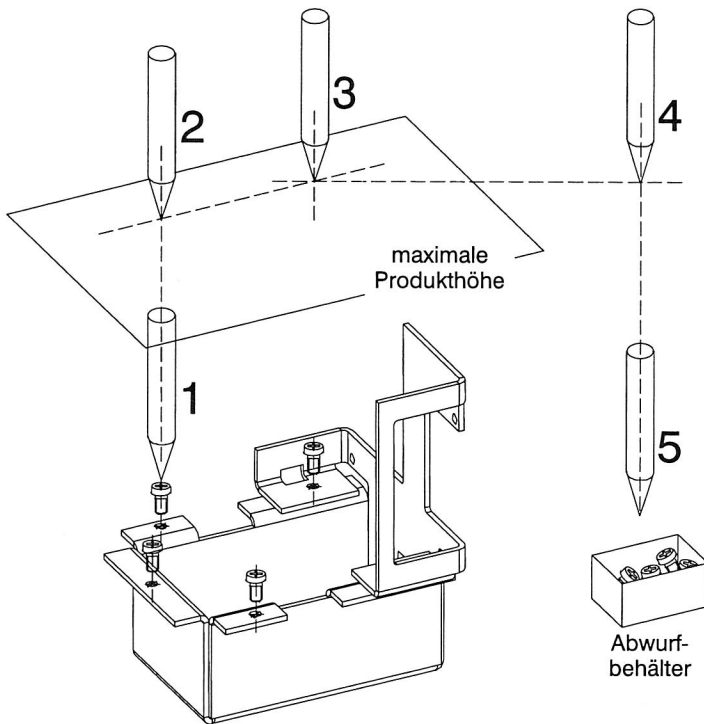
Die Besonderheit der Befehlsstruktur der entwickelten Positioniersteuerung besteht darin, innerhalb der Verfahrprogramme über den Befehl 'DATEI <Dateiname des Verfahrprogramms>' Unterprogramme aufzurufen zu können. Der Dateiname, der hier als Parameter übergeben wird, steht für eine Datei im Textformat, die wiederum den Befehlsvorrat enthält. Die Schachtelungstiefe der Aufrufe ist nur durch den freien Speicher begrenzt.

Tritt eine Störsituation auf, so kann sehr flexibel durch die Prozeßsteuerung reagiert werden. Soll beispielsweise eine Verschraubung wiederholt werden, so muß die Schraube zunächst an einer definierten Position vom Schrauber abgeworfen werden. Die Bewegungsbefehle, um diese Position zu erreichen, können natürlich nicht direkt in der Verfahrprogrammdatei gespeichert sein, da nicht alle Störfälle vorab bekannt sind.

Die Abwurfposition der Schraube kann von der Störstelle nicht auf direktem Weg angefahren werden, Kollisionen zwischen Werkzeug und Werkstück müssen insbesondere für die x-y-Ebene ausgeschlossen werden. Zunächst muß der Schrauber in eine Sicherheitsebene z_{sicher} gefahren werden, von der er über das Unterprogramm kollisionslos an die Abwurfstelle gesteuert werden kann.

Die Steuerung arbeitet die Bewegungsbefehle des Verfahrprogramms ab dem Verschraubungsbefehl (Position 1) in umgekehrter Reihenfolge wieder ab, so daß das Werkzeug die gleiche Bahn beschreibt, wie es zur Schraubstelle gefahren ist (Bild 6-13). Die Rückwärtsbewegung wird dabei solange fortgesetzt, bis die Steuerung auf das Kommando 'EINSPRUNG' trifft. Eine Kollision ist bei dieser Bewegungsbahn ausgeschlossen. Hat der Schrauber die Position (2) erreicht, kann er problemlos nach oben gefahren (Position 3) und zur Abwurfstelle (Position 4+5) gesteuert werden.

Durch 'ON_ERROR' lassen sich in Abhängigkeit von der Fehlersituationen spezifische Verfahrprogramme abrufen. Ist das Abwurfprogramm abgearbeitet, nimmt die Steuerung das Verfahrprogramm an der Einsprung-Marke wieder auf (Pos. 2), an der sie es



- 1 Werkzeug über Schraubstelle
- 2 bis EINSRUNG-Befehl Verfahrenprogramm
- 3 Werkzeug aus Arbeitsraum
- 4 Position über Abwurfbehälter
- 5 Abwurfposition für **defekte Schraube**

Bild 6-13: Bewegungsbahn des Schraubers zur Abwurfposition bei einer Selbstentstörung

verlassen hat. Hierdurch wird das Werkzeug wieder zur Schraubstelle geführt (Pos. 1) und der Montagevorgang kann wiederholt werden.

6.7.2 Teachen von Verfahrenprogrammen

Das Nachbearbeiten eines Verfahrenprogramms kann auf verschiedene Arten erfolgen. Eine Möglichkeit besteht darin, die Vfp-Datei in einen Texteditor zu laden, um eine Aktualisierung vorzunehmen. Hierbei ist allerdings keine Möglichkeit gegeben, die Veränderungen auf Gültigkeit zu überprüfen und sofort zu testen. Die Datei-Editierung entspricht der Zugriffsebene 1 (siehe Tab. 6-1), allerdings ohne jede Verifikation. Der Texteditor ist deshalb nur als Werkzeug für Bediener mit Expertenwissen gedacht.

Zugriffsebene	Möglichkeiten
1. Zeilenweiser Zugriff	einzelne Programmzeilen können beliebig manipuliert werden (löschen, editieren, einfügen), sofern die Befehlssyntax eingehalten wird
2. Zugriff auf Aktionsebene	nur komplette Aktionen (z. B. Achsbewegung) können manipuliert werden; die Abfolge der Befehlszeilen innerhalb der Aktion kann nicht geändert werden
3. Zugriff auf Schraubstellenebene	nur eine komplette Schraubstelle kann manipuliert werden, wie z. B. die Einschraubposition; nicht veränderbar ist die Sequenz der einzelnen Aktionen oder Befehlszeilen

Tab. 6-1: Übersicht über die Zugriffsebenen zur Verfahrenprogramm-Editierung

Eine weitere Möglichkeit bietet die Editierung von Programmzeilen im Teach-In-Betrieb. Da hierbei die Verfahrenprogrammabwicklung aktiv ist, können Änderungen sofort getestet werden.

In der Zugriffsebene 3 kann nur eine komplette Schraubstelle, wie sie in Bild 6-10 gezeigt ist, eingefügt, gelöscht oder bearbeitet werden. Die Vorwärtsbewegung im Verfahrenprogramm erfolgt deshalb 'Schraubstellenweise', d.h. bei der Weiterbewegung um einen Bewegungsschritt wird eine komplette Schraubstelle mit den drei Achspositionen und einem Technologievorgang abgearbeitet.

Da die Vfp's im Hauptteil aus einer Aneinanderreihung von Schraubstellen bestehen, wird im Teach-In-Betrieb dem Benutzer nur der Zugriff auf Ebene 3 eingeräumt. Damit sind alle relevanten Teile des Verfahrenprogramms erfaßbar und validierbar, so daß die Regeln bzgl. des Vfp-Aufbaus strikt eingehalten werden.

Die Bedienoberfläche des Teach-Fenster ist in Bild 6-14 dargestellt. Es ist in vier Bereiche aufgeteilt:

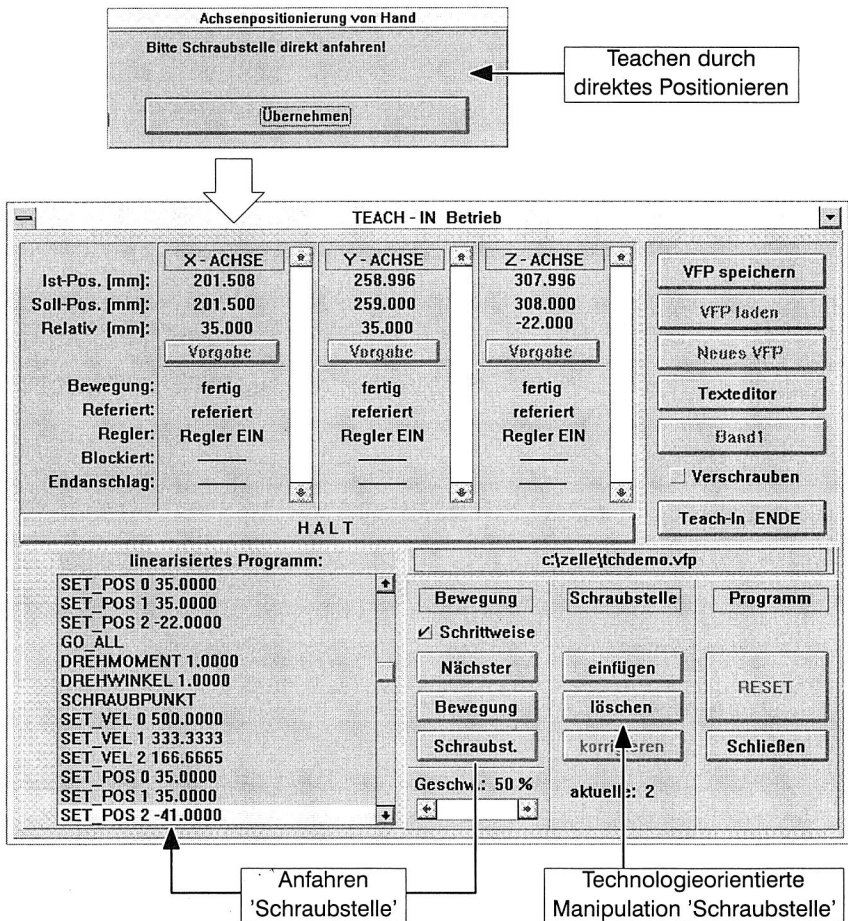


Bild 6-14: Erfassen einer neuen Position mittels Handpositionierung

- oben links:
Anzeigefenster der Achsststeuerung mit Scroll-Bar zur Achsenpositionierung
- oben rechts:
Laden und Abspeichern der Verfahsprogramme, sowie Eingabe von Default-Werten
- unten links:
Listbox des aktuell geladenen Verfahsprogramms
- unten rechts:
dreiteiliges Hauptfenster für die Teach-Funktionen

Im Hauptfenster werden die wesentlichen Funktionen für den Teach-Betrieb gesteuert. Den wichtigsten Bewegungsvorgang bietet die Teilfunktion 'Schraubst.', mit der eine komplette Schraubstelle abgearbeitet wird und das Programm an einem definierten Punkt zur technologieorientierten Manipulation der Verschraubungsposition anhält:

- Position über Einschraubstelle anfahren
- Schraubposition anfahren
- Verschrauben
- Schrauber hochfahren bis zur Sicherheitshöhe

Durch 'einfügen' startet der Ablauf zum Erfassen der neuen Schraubstelle. Es wird ein Fenster initiiert, in dem der Bediener die Aufforderung erhält, den Schrauber direkt über dem Schraubgewinde zu platzieren (Bild 6-14). Die Position kann auf zwei verschiedene Arten angefahren werden:

- grafisch interaktive Eingabe über Scroll-Bar: der Rollbalken kann mit der Maus auf eine neue Position gesetzt werden
- alphanumerische Eingabe durch direkte Eingabe der Zielposition

Zur Orientierung wird dem Bediener im Anzeigefeld die Relativposition der Achse angezeigt. Durch 'Übernehmen' wird die neue Schraubstelle in das Verfahsprogramm eingefügt und der Schraubstellen-Zähler hochgesetzt. Das Teachen einer kompletten Schraubstelle ist beendet.

Im Teach-In-Modus ist es auch möglich, ein von Grund auf neues Verfahsprogramm-Gerüst zu erzeugen, das nur den Vorspann und den Nachspann, sowie Standardeinstellungen enthält. Der Hauptteil kann dann durch die Funktion 'Teachen' gestaltet werden.

6.8 Programmierung der Schraubsteuerung

Für den Zellenrechner der automatisierten Schraubzelle wurde eine komfortable Programmierungsumgebung zur Eingabe der Technologieparameter der eingesetzten Schraubsteuerung geschaffen. Die Programme setzen sich aus jeweils bis zu 8 Schraubstufen (Module) zusammen, die der Reihe nach abgearbeitet werden (Ablauf). In der Schraubsteuerung können bis zu 50 Module definiert werden.

In der Modul-Box werden die Modulnamen des aktuellen Kanaldatensatzes aufgelistet. Sollen die Parameter eines Modules editiert werden, ist nur der entsprechende Modul-

name in der Liste zu markieren und der zugehörige Button zu aktivieren (Bild 6-15). Im Dialogfenster des Schraubablaufs kann die Modulzusammensetzung, aber auch Name und Nummer eines Schraubprogrammes verändert werden. Eine Modulzuweisung geschieht sehr einfach durch Markieren und Bestätigen des entsprechenden Moduls in der Auswahlliste. Ist ein entsprechender Ablaufdatensatz zusammengestellt, so kann der Kanaldatensatz durch 'Kanal Senden' in die Steuerung geladen werden.

6.9 Generieren von Montageabläufen

Der komplette Verfahrensablauf eines Montageprogramms besteht aus einer sequentiell abzuarbeitenden Liste von Elementarabläufen, wie z. B. 'Verschraube Position A', 'Nachziehen Position B', 'Löse Position C'. Ein Elementarablauf stellt wiederum eine sequentiell auszuführende Liste aus Bewegungs- und Schraubprogrammen dar.

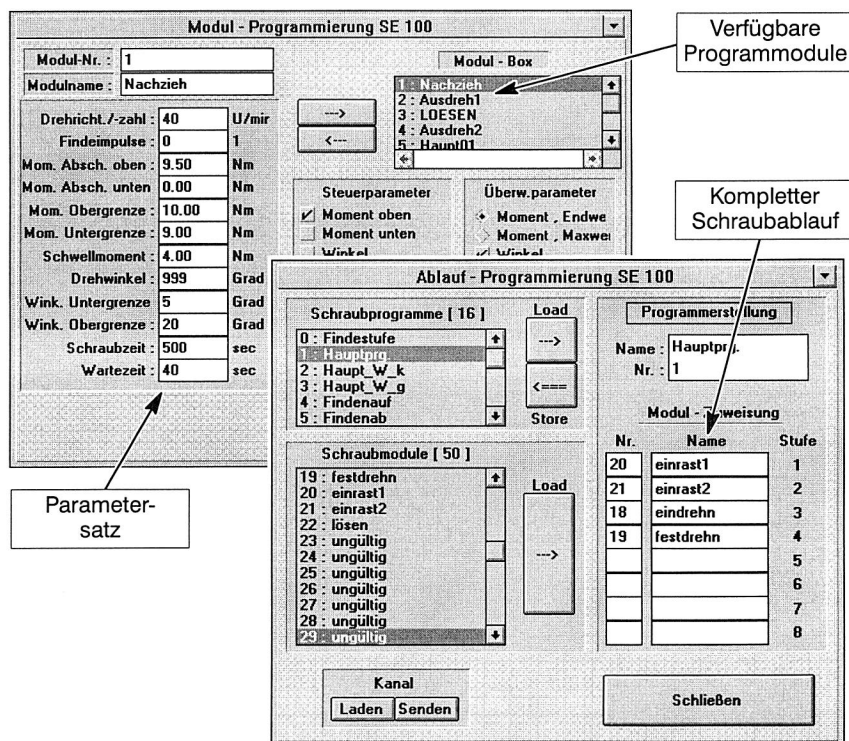


Bild 6-15: Programmierung der Schraubsteuerung

Im Programmiertool von PROZELL wurde eine Möglichkeit vorgesehen, diese kompletten Verfahrensabläufe dialoggeführt sehr einfach und schnell zu erstellen (Bild 6-16). Durch Markierung der zur Verfügung stehenden Grundbewegungs- und Technologieprogramme, die in zwei separaten Listen dem Bediener angeboten werden, lassen sich die Elementarabläufe erzeugen. Nach dem gleichen Schema werden komplette Montageprogramme aus den spezifizierten Elementarabläufen generiert.

Tritt ein Verschraubungsfehler während der Abarbeitung eines Montageprogramms auf, so wird eine speziell auf diese Störung zugeschnittene Fehlerstrategie angestoßen. Unter einer Fehlerstrategie wird in PROZELL wieder eine elementare Ablafliste aus Handhabungs- und/oder Schrauberprogrammen verstanden (Bild 6-17).

Die Strategie gestaltet sich je nach erkanntem Prozeßfehler sehr unterschiedlich und kann für jedes Technologieprogramm in Abhängigkeit vom Fehler frei definiert werden; d. h., jedes Verschraubungsprogramm kann mit einem Satz an Fehlerstrategien und jeder Prozeßfehler mit einem eigenen Strategieablauf versehen werden.

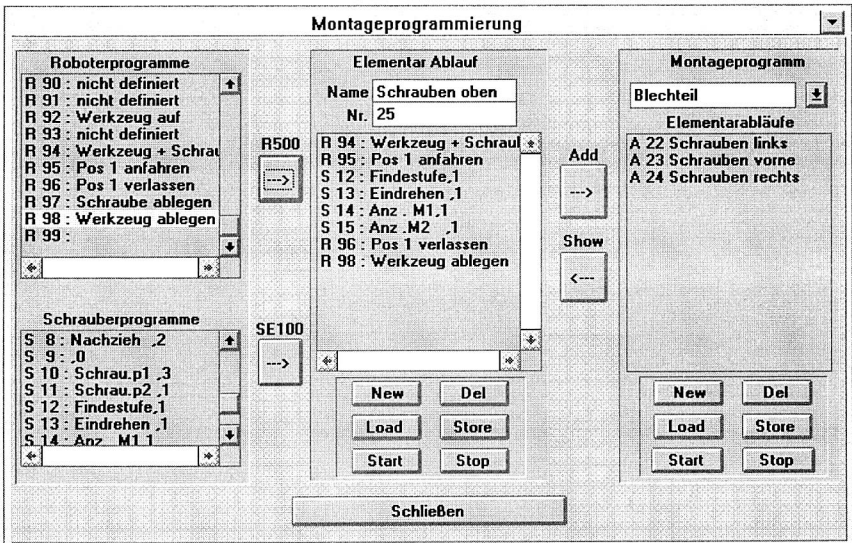


Bild 6-16: Erzeugen von kompletten Montageabläufen aus definierten Bewegungs- und Schraubprogrammen

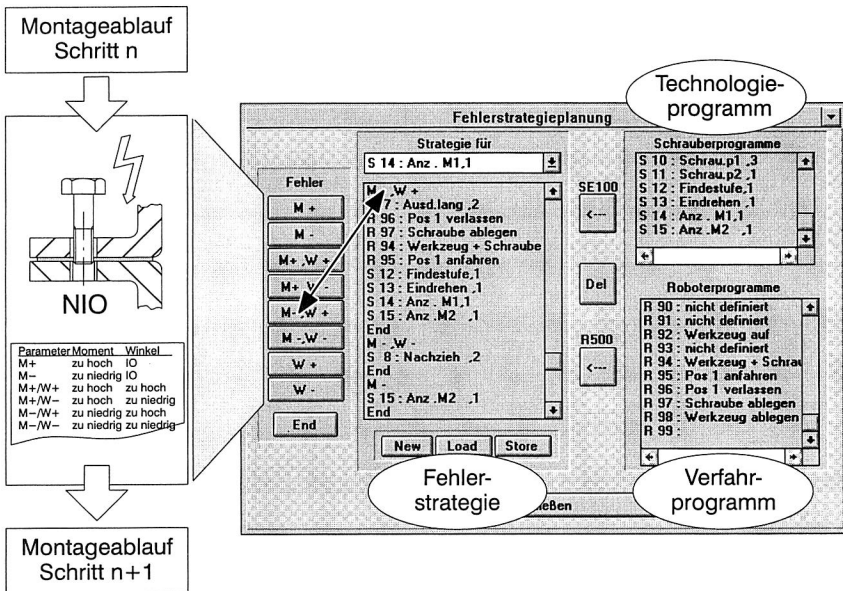


Bild 6-17: Spezifische Fehlerstrategieplanung in Abhängigkeit vom registrierten Verschraubungsfehler

6.10 Automatikbetrieb

Im Automatikbetrieb wird der gesamte Prozeßablauf durch den Zellenrechner gesteuert. Die Aufträge werden selbständig nacheinander abgearbeitet; die Bearbeitungsreihenfolge in der Auftragswarteschlange wird durch die Priorität des jeweiligen Auftrags und den Zeitpunkt des Auftragsengangs bestimmt. Ein Fertigungsauftrag wird aktiviert, sobald der vorherige rückgemeldet ist:

1. Das Werkstück wird ausgeschleust und intern auf ein geeignetes Transportband übergeben. Die Information über die Arbeitspositionen, an denen ein Auftrag bearbeitet werden kann, befindet sich in den Auftragsdaten.
2. Die Palette wird zum Arbeitsplatz gefahren, durch die Schreib-/Lesestation verifiziert und positioniert.
3. Das Montageprogramm wird abgearbeitet
4. Nach Aktualisierung des mitgeführten Datenträgers durch die Schreib-/Lesestation wird das bearbeitete Werkstück an die interne Umsetzstation gefahren.

- Die Palette wird an den zellextern Materialfluß übergeben. Gleichzeitig wird der Auftrag zusammen mit den Prozeßergebnissen und dem Fehlerprotokoll in die Liste der bearbeiteten Aufträge aufgenommen.

Der Auftrag ist beendet, der Arbeitsraum ist frei und der Algorithmus kann erneut gestartet werden.

Während der automatischen Auftragsbearbeitung können zahlreiche Störungen auftreten. Auf diese wird von der Ablaufsteuerung des Zellenrechners sehr differenziert reagiert. Soweit es möglich ist, wird in der Montagezelle eine Selbstentstörung in Abhängigkeit des erkannten Prozeßfehlers und der programmierten Fehlerstrategie (Bild 6-17) initiiert. Wie in Kapitel 6.7.1 gezeigt wird, kann beispielsweise eine defekte Schraube in ein Behältnis abgelegt und der Verschraubungsvorgang wiederholt wer-

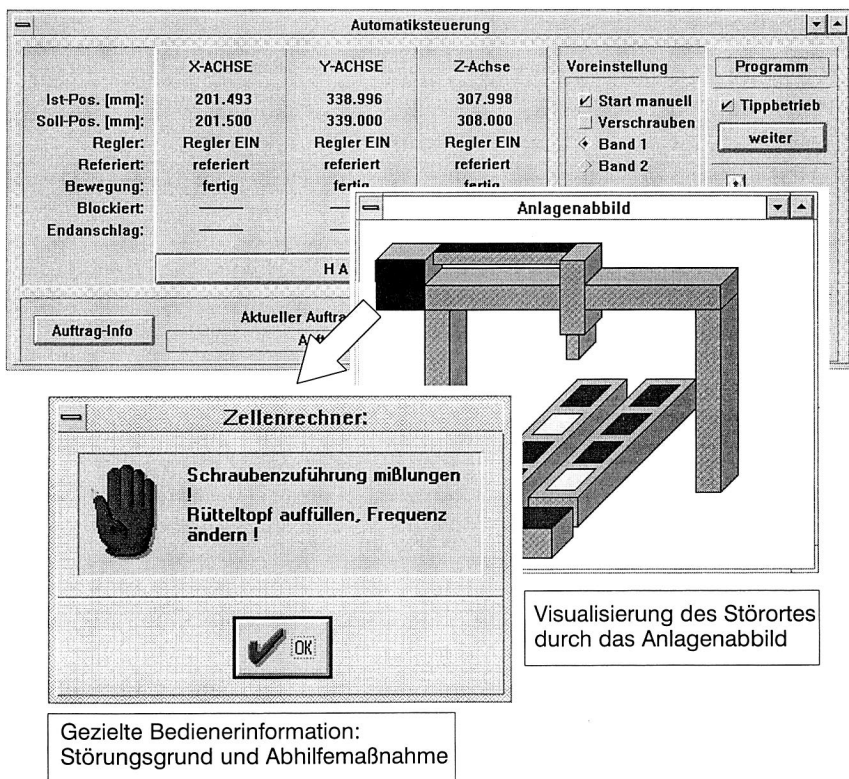


Bild 6-18: Störsituation im Automatikbetrieb

den. Mit diesen automatischen Entstörmaßnahmen kann die Anlagenverfügbarkeit von flexiblen Schraubzellen entscheidend verbessert werden.

Kann eine Störung nicht automatisch behoben werden, so erfordert dies einen manuellen Bedieneingriff. Bild 6-18 zeigt einen Ausschnitt aus der Oberfläche des Montagezellenrechners. Das Prozeßabbild der Montagezelle lokalisiert eine Störung an den Achsen zur Positionierung des Schraubers. Durch ein Bildschirm-Fenster werden dem Bediener gezielt Informationen über die Störquelle und Hinweise zur Fehlerbehebung mitgeteilt. Über ein spezielles Bildschirmfenster kann der Benutzer außerdem die Betriebszustandsdaten der Montagezelle abfragen.

Zur prozeßbegleitenden Dokumentation und als Grundlage für die Nachbearbeitung wird ein Auftragsprotokoll erstellt. Prozeßstörungen, die sich auf das Ergebnis der Verschraubung auswirken können (z. B. Wiederholverschraubung), werden im Fehlerprotokoll des Fertigungsauftrages mit zugehöriger Fehlernummer und Schraubposition eingetragen (Bild 6-19). Fehler, die keine Auswirkung auf das Schraubergebnis haben (z. B. 'Schraube zuführen' mißlungen, weil Rütteltopf leer) werden nicht protokolliert.

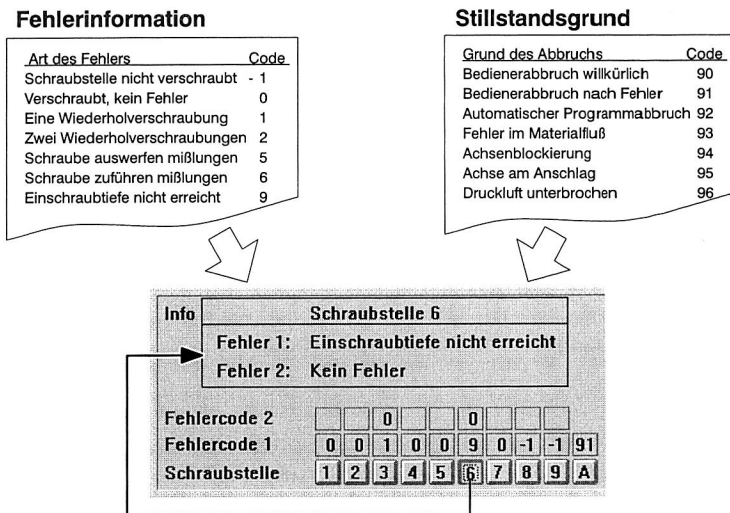


Bild 6-19: Fehlerinformationen und Stillstandsgründe im Automatikbetrieb

7 CAD/CAM-Prozeßkette für die automatisierte Schraubmontage

In den vorausgehenden Kapiteln werden die Grundlagen für den Bereich der operativen Ebene aufgezeigt, die notwendig sind, eine durchgehende, technologieorientierte Verfahrenskette für das automatisierte Verschrauben aufzubauen. Erst durch die Verknüpfung der Prozeß- mit der Planungsebene hin zu einem Konstruktionssystem lassen sich durch die Realisierung einer geschlossenen Verfahrenskette alle Vorteile rechnergestützter Produktionssysteme nutzen [109].

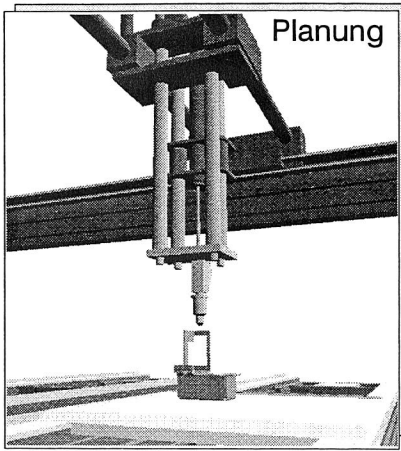
7.1 Anforderungen an das CAD/CAM-Konzept

Bereits durch die Gestaltung eines Produktes in der Entwicklungs- und Konstruktionsphase wird ein Großteil des notwendigen Montageablaufes und -verfahrens festgelegt. Für eine kostenminimale Fertigung ist es daher unerlässlich, bereits in der Planungsphase die zur Herstellung des Artikels notwendigen Montagesituationen umfassend zu berücksichtigen, da Anpassungen am Produkt bei Serienanlauf in der Regel mit hohem Kosten- und Zeitaufwand verbunden sind [16], [33].

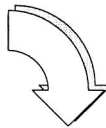
Aus diesen allgemeinen Zielsetzungen und den Forderungen nach Durchlaufzeitverkürzung und Qualitätsabsicherung von Prozessen, ergeben sich konkret folgende Optimierungsaufgaben:

- Verkürzung der Konstruktionszeit von Produkten, insbesondere bei Variantenkonstruktionen
- Sicherung von Technologiewissen für die automatisierte Schraubtechnik
- Automatisierte Erstellung von Programmabläufen und Ableitung der Prozeßparameter
- Automatische Überprüfung von Montageabläufen
- Verkürzung der Inbetriebnahmezeiten

Im Bild 7-1 sind die Module zusammengefaßt, die für die rechnergestützte Verfahrenskette realisiert und miteinander verknüpft werden müssen. Ausgehend von der Bauteilkonstruktion, bei der die Position und Lage der Schraubstellen festgelegt wird, muß überprüft werden, ob und mit welchem Betriebsmittel das Produkt montiert werden kann. Mittels eines Postprozessors werden aus den Konstruktionsdaten der einzelnen Schraubstellen spezifische Schraub- und Verfahsprogramme erzeugt, die von der Steuerung der Schraubzelle in entsprechende Aktionen der Achsen und des Schraubwerkzeuges umgesetzt werden. Durch die Simulation des Montageprozesses und eine automatische Kollisionskontrolle wird sichergestellt, daß es während der Bauteilmontage nicht zu einer Kollision zwischen Werkzeug und Werkstück kommt.



- Bauteilkonstruktion und -optimierung
- Konzeption von Systemalternativen
- Detaillierung und Auswahl der Betriebsmittel
- Simulation des Montageprozesses
- Ermittlung der Montagereihenfolge
- Erstellung des Verfahrensprogramms
- Kollisionskontrolle



- Ansteuerung des Handhabungssystems und der Peripherie
- Parametrierung der Schraubsteuerung
- Verschrauben des Werkstücks
- Prozeßdatenerfassung und -auswertung
- Überwachungs- und Diagnoseinformation

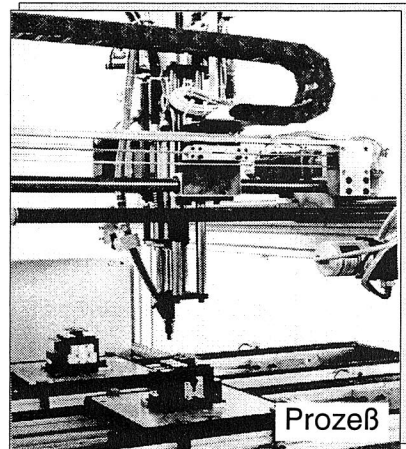


Bild 7-1: Kernaufgaben zum Aufbau einer rechnergestützten Verfahrenskette für die automatisierte Schraubmontage

7.2 Struktur des Konstruktionssystems mfk

Eine Verkürzung von Produktentwicklungszeiten und eine Reduktion der Entwicklungskosten erfordert 'Simultaneous Engineering', um von Beginn an möglichst fertigungs- und montagegerechte Konstruktionen zu gewährleisten. Dabei ist dem Konstrukteur

eine angemessene Rechnerunterstützung an die Hand zu geben, um das komplexe und umfangreiche Fertigungswissen verarbeiten zu können [57].

7.2.1 Grundkonzept

Das Konstruktionssystem mfk bietet dem Anwender durch seine objekt- und wissensorientierte Arbeitsweise und eine frühzeitige Bereitstellung von aktuellen Informationen eine durchgängige Unterstützung während des gesamten Konstruktionsprozesses [86].

Im Bild 7-2 ist das Grundkonzept des Konstruktionssystem mfk dargestellt. Dieses stellt dabei kein CAD-System im eigentlichen Sinne dar, sondern setzt über vorhandene Programm- und Befehlsprozessschnittstellen auf herkömmlichen Systemen auf. Das CAD-Programm übernimmt die Visualisierung der Bauteile und ermöglicht die Kommunikation mit dem Bediener.

Synthese

Kern des Konstruktionssystems bilden das Synthese- und das Analysemodul, die beide auf das gemeinsame Produktmodell zugreifen. Durch das Synthesemodul werden zur Vereinfachung der Konstruktionserstellung konstruktive Elemente und Konstruktionsmodule bereitgestellt. Für das Fügeverfahren Schrauben werden beispielsweise diverse Einschraublöcher definiert, die mit und ohne Gewindebohrung versehen sein können (Bild 7-3). Die Konstruktionselemente werden zu höherwertigen Konstruktionsbausteinen zusammengesetzt, die eine spezifische Funktion im jeweiligen Fertigungsverfahren erfüllen. Für die Fügeverbindung Schrauben werden drei typischen Hauptvertreter abgeleitet:

- Schraube-Mutter-Verbindung
- Einschraubverbindung mit Durchgangsloch
- Einschraubverbindung mit Grundloch

Analyse

Um eine Konstruktion bezüglich Fertigungs- und Montagegerechtigkeit überprüfen zu können, ist im Konstruktionssystem mfk ein Analysetool vorgesehen. Dieses unterteilt sich in das Informationsmodul und die eigentliche Wissensbasis (Bild 7-2). In [50] wird ein allgemeingültiger Ablauf einer Analyse in vier Phasen festgelegt:

- Analysevorbereitung:
Sie hat die Funktion, die für die Durchführung der gewählten Analyseaufgabe notwendigen Informationen aus dem Produktmodell zu selektieren
- Diagnose:
Hierdurch werden Fehler diagnostiziert oder Sollwerte erzeugt, die bei der Durchführung von Berechnungen ermittelt werden

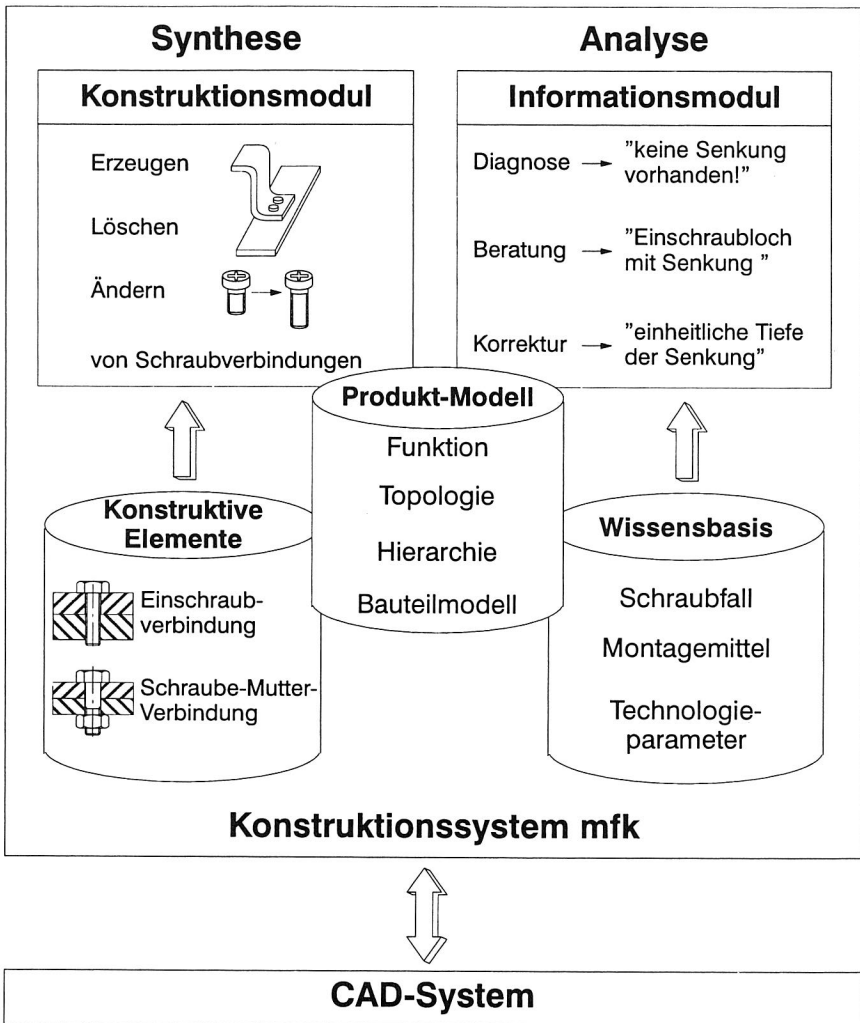


Bild 7-2: Grundstruktur des Konstruktionssystem mfk [56] am Beispiel der Technologie 'Schrauben'

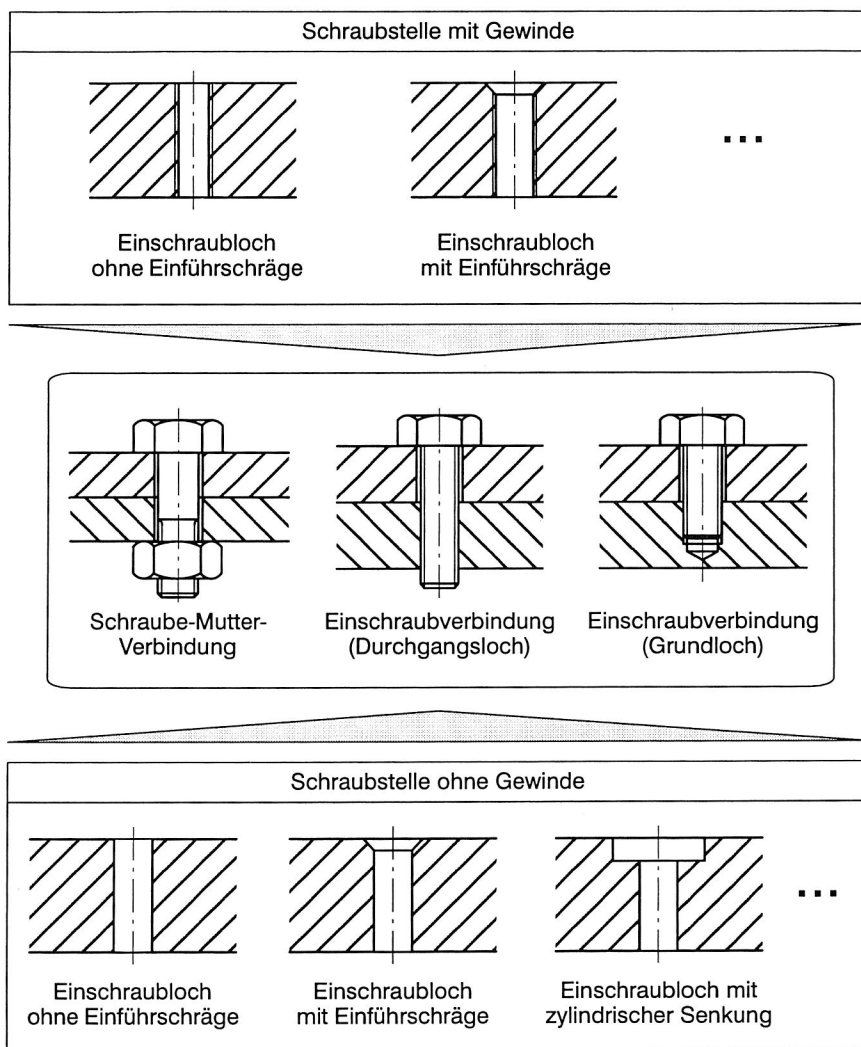


Bild 7-3: Beispiele unterschiedlicher Verbindungsarten und Gestaltungsvarianten der Einschraublöcher

- **Beratung:**
Mit der Beratung werden alternative Verbesserungs- und Lösungsvorschläge ermittelt
- **Korrektur:**
Die Fehlerbehebung wird auf Wunsch automatisch durchgeführt

Das Informationsmodul greift bei allen Analysephasen auf die Wissensbasis zurück, die das notwendige Wissen in strukturierter Form zur Verfügung stellt. Bei den Wissensarten ist dabei zwischen dem Expertenwissen und der eigentlichen Wissensverarbeitung zu unterscheiden [48].

Produktmodell

Integrierende Komponente im Konstruktionssystem bildet das Produktmodell mit seiner festgelegten Datenstruktur. Konstruktive Zusammenhänge werden dabei durch hierarchisch voneinander abhängigen Datensätzen repräsentiert. Die im Produktmodell enthaltenen Datensätze besitzen prinzipiell den gleichen Aufbau und setzen sich wie folgt zusammen:

- Identifizierungsteil
- Positionierungsteil
- Beschreibungsteil

Zur einfacheren Verarbeitbarkeit ist ein Datensatz, unabhängig vom jeweiligen Element, 20 Stellen lang.

Als repräsentatives Beispiel für die Fügetechnik Schrauben wird in Bild 7-4 der Aufbau der Datenstruktur anhand des Konstruktionsbausteins 'Einschraubverbindung' aufgezeigt. Der Konstruktionsbaustein wird aus den drei Elementen

- Schraubstelle im Oberteil
- Schraubstelle im Unterteil
- Schraube

aufgebaut, deren Datensätze wiederum die gleiche Grundstruktur vorweisen. Diese Elemente müssen eindeutig einer Verschraubung zugeordnet werden. Hierzu wird diesen Elementen im Bauteilmodell ein Datensatz vorangestellt, der die Zuordnung realisiert. Die Elemente werden quasi zu einem 'Konstruktionsbaustein' zusammengefaßt.

Bei der Schraubstelle handelt es sich um ein Element zur Funktionserfüllung einer Verschraubung. Es setzt sich aus mehreren Gestaltelementen, wie z. B. Bohrung und Fase, zusammen. Entsprechend den Konventionen des Konstruktionssystems mfk ist es damit ein 'Konstruktionselement'. Im Identifizierungsteil wird gekennzeichnet, welchen Fasentyp die Schraubstelle besitzt (4. Stelle) und ob es sich um ein Ober-, Unter- oder Einzelteil handelt (5. Stelle).

Auch bei der Schraube handelt es sich um ein Konstruktionselement. Der Typ der Schraube kann nach DIN exakt bestimmt werden. Als Parameter des Beschreibungs-

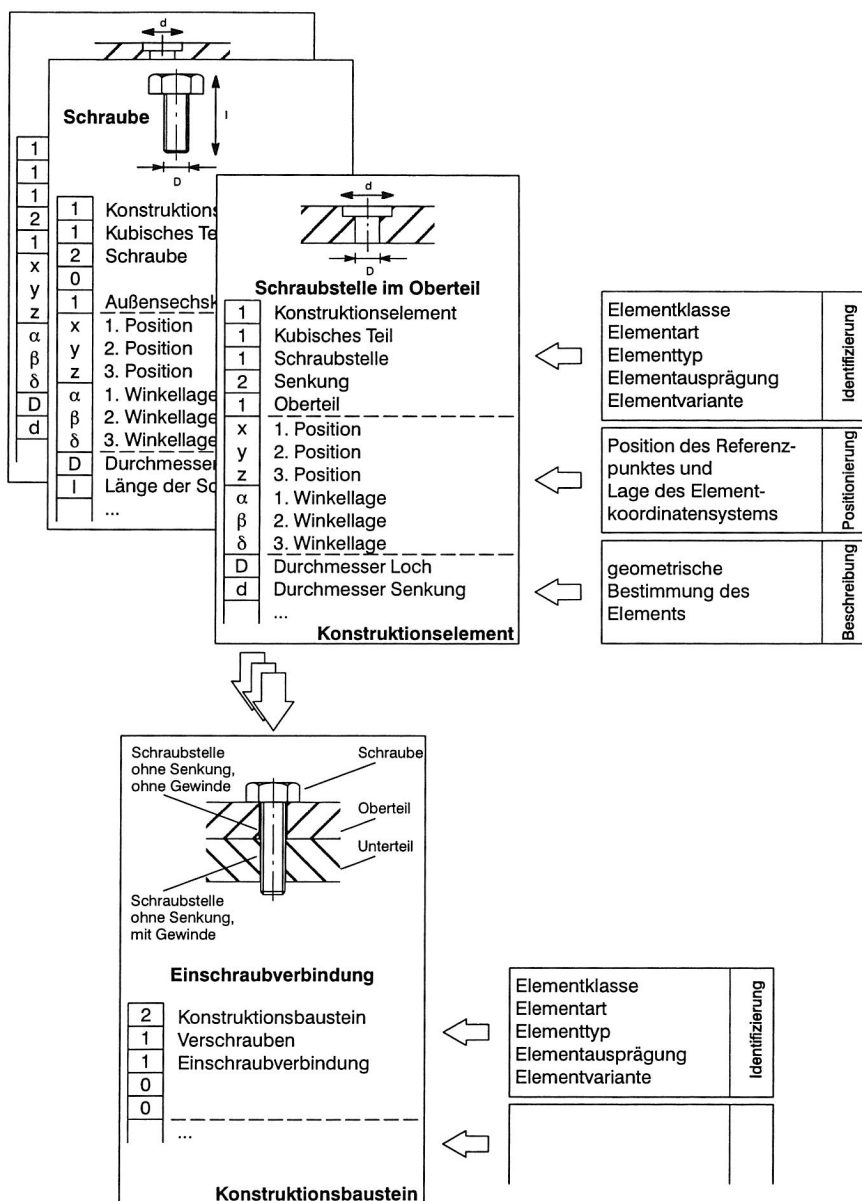


Bild 7-4: Datenstruktur im Konstruktionssystem mfk am Beispiel einer 'Einschraubverbindung'

teils sind Durchmesser und Länge der Schraube einzugeben. Alle übrigen Parameter, wie z. B. Kopfhöhe, werden aufgrund des ausgewählten Schraubentyps aus der Wissensbasis ermittelt.

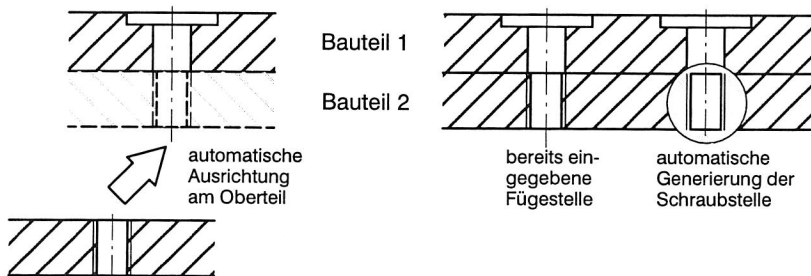
Im folgenden werden wichtige Features des Konstruktionssystems mfk dargestellt, die für die Fügeverbindung Schrauben zur Verfügung stehen und dem Konstrukteur eine einfache, anwendungsorientierte Arbeitsweise ermöglichen, um von vornherein möglichst fertigungs- und montagegerechte Konstruktionen zu erstellen.

7.2.2 Erzeugen von Schraubverbindungen

Besonderer Wert wird auf die komfortable Generierung und Platzierung der Schraubstellen gelegt. Durch den Anwender sind zunächst nur die beiden Bauteile zu identifizieren, die miteinander verbunden werden sollen, sowie die Verschraubungsart festzulegen. Für die Positionierung der Schraubstelle werden zwei Alternativen angeboten:

- X- und Y-Abstand vom Schnittpunkt zweier zu identifizierenden Kanten
- X- und Y-Abstand von einer bereits vorhandenen Schraubstelle

Handelt es sich um die erste Fügestelle, die für den Bauteilverbund eingegeben wird, so muß bei beiden Bauteilen jeweils nur die Position der Verschraubung angegeben werden (Bild 7-5). Das Programm richtet beide Baugruppen automatisch nach dieser Verschraubung aus. Sind die beiden Bauteile bereits über eine weitere Schraubstelle miteinander verbunden, wird dies vom Programm erkannt. Durch Angabe der Schraubstellenposition auf der einen Baugruppe wird automatisch die Position auf dem anderen Teil abgeleitet.



Fall a: Bauteile sind noch nicht verschraubt
Eingabe der ersten Schraubstelle

Fall b: eine Schraubverbindung existiert
Eingabe der zweiten Schraubstelle

Bild 7-5: Alternativen bei der Eingabe und Positionierung von Schraubstellen

Ermitteln der Geometrieparameter für den jeweiligen Schraubentyp

Nach der Positionierung der Schraubstelle werden durch das Konstruktionssystem mfk mit Hilfe der Wissensbasis diejenigen Schraubentypen vorgeschlagen, die für die aktuelle Verbindung geeignet sind. Für jede Schraubstelle werden zunächst nur unternehmensspezifische Schraubentypen zur Verfügung gestellt. Parameter, die nicht abgeleitet werden können, müssen vom Konstrukteur interaktiv eingegeben werden.

Neben dem Attribut 'Position der Schraubstelle' sind weitere Geometrieparameter, wie Länge, Durchmesser und Richtung der Durchgangsbohrung, zugehöriger Fasentyp, -tiefe, -durchmesser, und gegebenenfalls Mutterattribute, zu ermitteln. In der Datenbasis sind hierzu jedem Schraubentyp die Parameter der jeweiligen Schraubstelle zugeordnet. Die minimalen und maximalen Schraubenlängen werden abgeleitet und Plausibilitätsprüfungen, wie z. B.

- Fasendurchmesser größer als Schraublochdurchmesser
- Fasentiefe kleiner als Dicke der oberen Schraubstelle

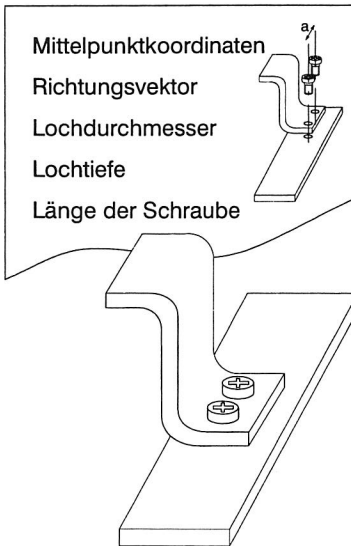
werden durchgeführt. Sind alle Eingaben vollzogen und geprüft, so werden die parametrisierten Konstruktionselemente automatisch an das Bauteil angepaßt und in das Ober- und Unterteil eingebracht.

Generierung und Zuordnung der Technologieparameter

Durch die Festlegung der Schraube werden neben den geometrischen Attributen gleichzeitig die technologischen Parameter bestimmt, die der Schraubstelle zugeordnet werden müssen. Die technologischen Attribute beschreiben die Parameter, die für den Verschraubungsvorgang benötigt werden. Zu diesen gehören beispielsweise das Anzugsmoment, die erforderliche Drehzahl und ein Überwachungsparameter wie der Weiterdrehwinkel. Außer den in Bild 7-6 dargestellten Attributen hat der Benutzer die Möglichkeit, weitere Attribute zu definieren. Alle Attribute werden der jeweiligen Schraubstelle zugewiesen, um sie später bei der Montage gezielt wieder abrufen zu können.

Nach Beendigung des Konstruktionsprozesses muß durch den Anwender festgelegt werden, ob es sich um eine untergeordnete, funktionsrelevante oder gar sicherheitskritisch Verschraubung handelt. Durch die Auswahl der Verschraubungsklasse werden die benötigten Technologieparameter eingelesen und die zugehörigen Berechnungsprogramme zur Ausführung gebracht. Die Programme ermitteln hierbei entweder direkt das gesuchte Ergebnis oder fragen den Anwender dialoggeführt nach Hilfsgrößen, die zur Berechnung benötigt werden. Alle neu ermittelten Daten werden in der Wissensbasis hinterlegt, so daß weitere Berechnungsprogramme auf diese zugreifen können. Der Benutzer hat jederzeit die Möglichkeit, Technologiedaten interaktiv einzugeben oder die Berechnungen abubrechen.

Geometrische Attribute



Technologische Attribute

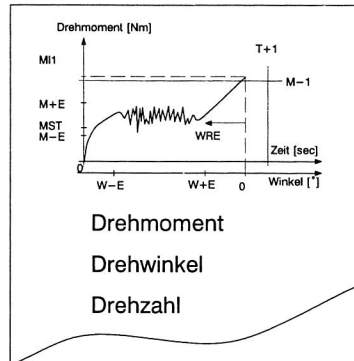


Bild 7-6: Gegenüberstellung der geometrischen und technologischen Attribute, die einer Schraubstelle zugeordnet sein können

7.3 Kopplung von Konstruktionssystem und Planungssystem

Um Konstruktionsdaten zwischen dem CAD-System ICEM und Unigraphics auszutauschen, bietet sich zum einen die Kopplung über die IGES-Schnittstelle, die von beiden Systemen unterstützt wird, an. Nachteilig ist hierbei, daß über die IGES-Schnittstelle nur 3D-Drahtmodelle übertragen werden können. Zudem werden im Planungstool PROPLAN neben den Geometriedaten auch die technologischen Schraubstellenattribute benötigt, um komplette Prozeßparametersätze an die Montagestation weiterleiten zu können.

Da aus diesen Gründen die IGES-Schnittstelle nicht genutzt werden konnte, ist ein separater Post-Prozessor entwickelt worden, der das Bauteilmodell aus dem Konstruktionssystem mfk direkt für Unigraphics aufbereitet und bereitstellt. Zudem wurde der Prozessor so gestaltet, daß eine Ganz-Körperdarstellung des Werkstücks ermöglicht wird. Der Programmgenerator wurde im CAD-System Unigraphics unter der Programmiersprache GRIP realisiert. Er ist dabei allgemeingültig gehalten, so daß jede Bauteildatei aus dem Konstruktionssystem mfk in Unigraphics visualisiert werden kann (Bild 7-7).

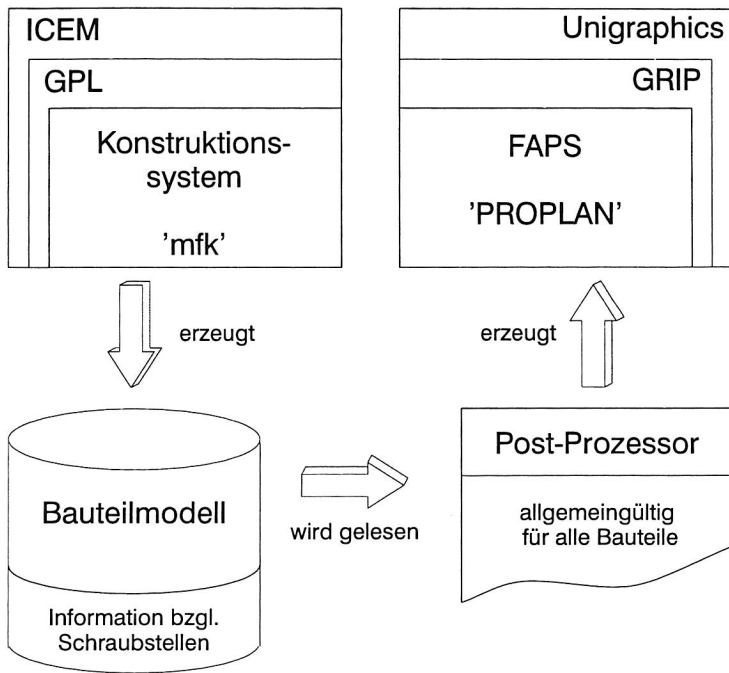


Bild 7-7: Aufbereitung der Bauteildaten des Konstruktionssystems mfk für das Planungstool PROPLAN

7.4 Rechnergestützte Hilfsmittel für die Technologieplanung

Bild 7-8 zeigt alle Konstruktions- und Planungstools, die für die rechnergestützte Verfahrenskette entwickelt wurden. Wie im Kapitel 7.2.2 gezeigt, wird die Modellierung der Werkstücke, und damit die Festlegung aller Schraubstellen, mit dem Konstruktionssystem mfk erreicht. Mit den Tools der Arbeitsvorbereitung wird dem Konstrukteur eine gezielte Technologieberatung ermöglicht. An das Planungssystem PROPLAN werden somit nur die Parametersätze von bereits optimierten Konstruktionen übertragen.

PROPLAN bereitet die vorliegenden Geometrie- und Technologieparameter auf und generiert hieraus komplette Bewegungsprogramme für flexible Handlingsysteme und Schraubablaufprogramme für elektronische Schraubsteuerungen. Das Planungstool greift dabei auf die unter Unigraphics modellierten Betriebsmittel zurück. In den folgenden Kapiteln werden die beiden Programme zur Verfahrenweggenerierung und Systemoptimierung spezifiziert.

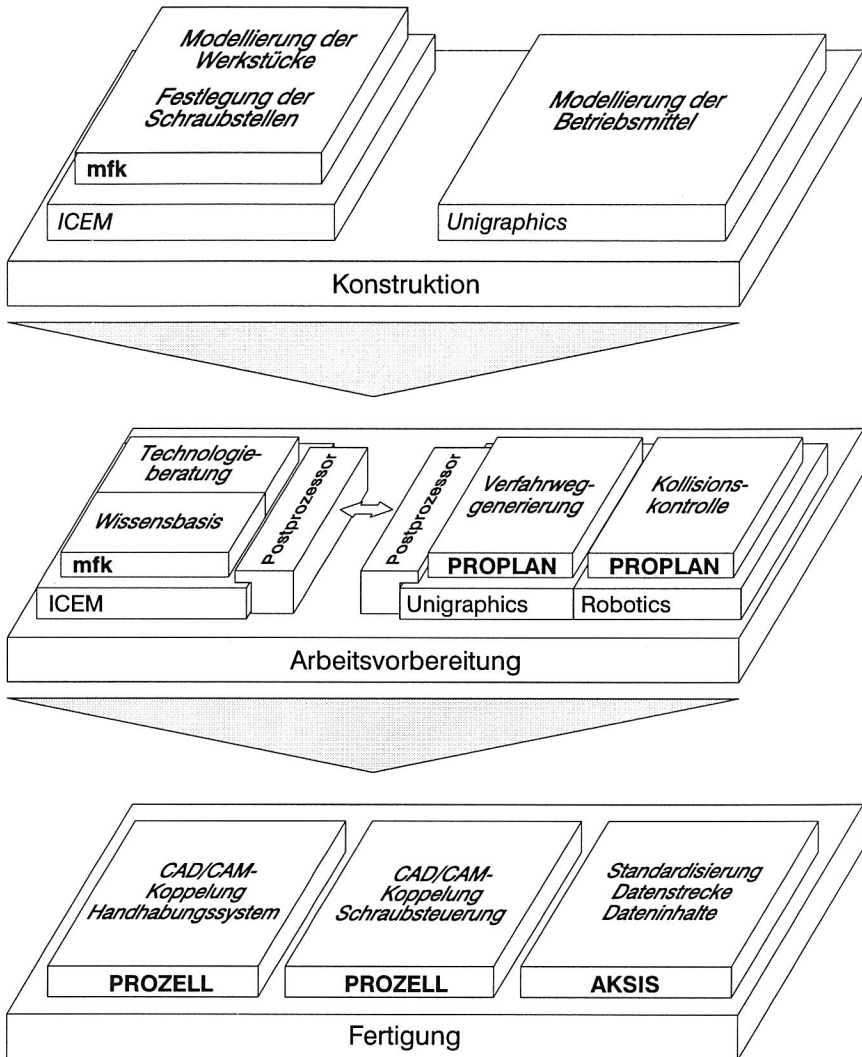


Bild 7-8: Zusammenspiel der entwickelten Planungstools der rechnergestützten Verfahrenskette zum automatisierten Verschrauben

7.4.1 Generierung von Verfahrenprogrammen für automatisierte Systeme

Basierend auf den geometrischen und technologischen Kriterien werden die notwendigen Anforderungen an das Montagesystem definiert und die Schraubprozeßparameter festgelegt. Der Planer wählt zunächst rechnergestützt das Betriebsmittel und das zugehörige Schraubwerkzeug aus, mit dem die Verschraubung erfolgen soll. Die im Unternehmen zur Verfügung stehenden Montagemittel für das automatisierte Verschrauben, z. B. teilautomatisierter Arbeitsplatz mit Handschrauber oder vollautomatisierte Montagezelle mit frei positionierbaren Schraubsystem, werden anhand von Kriterien, die in einer Wissensbasis hinterlegt sind, überprüft und ausgewählt. Hierbei steht ihm das System REKOSS [82] zur Verfügung, das eine automatische, auf die Schraubstellen bezogene, Werkzeug- und Systemauswahl ermöglicht.

In Abhängigkeit der ermittelten Montagestation müssen noch die Betriebshilfsmittel zugeordnet werden. Vorrangig einzusetzende Standard-Werkstückträger sind dabei in der Datenbasis abgelegt. Die Basisdatei enthält die Größe des Werkstückgrundträgers, die Anzahl der Aufnahmepositionen, sowie die Geometrie und Position der Werkstückaufnahmen auf dem Träger.

Bevor ein Verfahrenprogramm für das Handlingsystem der automatisierten, flexiblen Schraubzelle (siehe Kapitel 6) erstellt werden kann, sind eine Reihe von Plausibilitätskontrollen nötig, um die Durchführbarkeit des Verschraubungsvorgangs zu überprüfen. Dazu benötigt man zum einen die technische Daten, wie Größe des Arbeitsraumes der Montagestation, technische Parameter des Handhabungssystems und die Positionen der zur Verfügung stehenden Montageplätze innerhalb der Montagezelle. Diese Werte werden aus Konsistenzgründen von der Zellenebene bereitgestellt. Folgende Sachverhalte sind zu überprüfen:

- (a) Werden die technischen Randbedingungen eingehalten?
- (b) Liegen alle Schraubstellen innerhalb des Arbeitsraumes des Handhabungssystems?
- (c) Kann es zu einer Kollisionen zwischen Werkzeug und Werkstück kommen?

Während der Punkt (a) sehr einfach überprüft werden kann, ist Punkt (b) in Abhängigkeit des ausgewählten Montageplatzes und der Position des Bauteils auf dem Werkstückträger zu betrachten (Bild 7-9). Für die Überprüfung von Punkt (c) reichen die technischen Daten des Zellenrechners alleine nicht aus. Um mögliche Kollisionen zwischen Werkstück und Werkzeug zu erkennen, muß der Verfahrensweg simuliert werden. Der Planer kann anhand des angezeigten Verfahrensweges erkennen, wo es zu einer Kollision zwischen Werkzeug und Werkstück kommen kann (Bild 7-10).

Generierungsalgorithmus eines Verfahrenprogramms

Das zu erzeugende Verfahrenprogramm muß das Schrauberwerkzeug nacheinander über den einzelnen Schraubstellen positionieren und den Schraubvorgang initiieren.

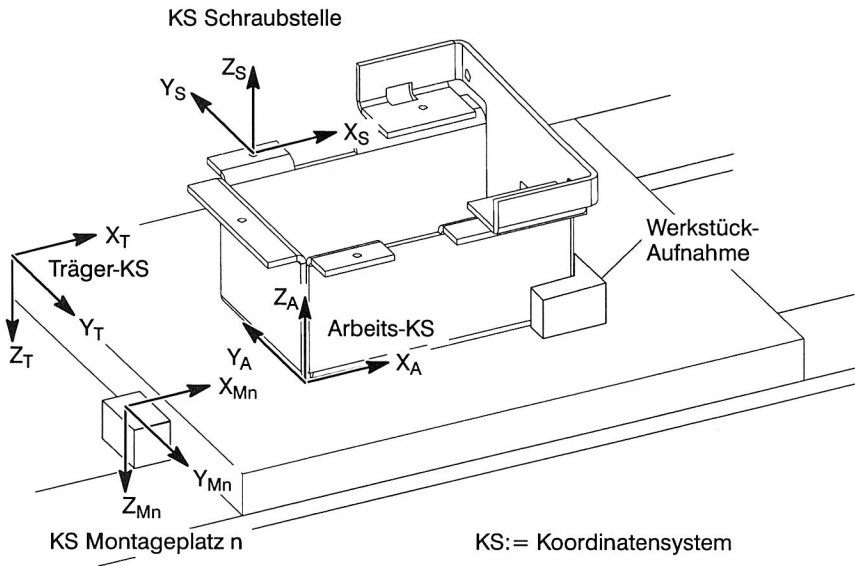


Bild 7-9: Überprüfung des Arbeitsraums in Abhängigkeit der verschiedenen Koordinatensysteme

Wie im Kapitel 6.7.1 gezeigt, muß das Verfahrprogramm für die flexible Schraubzelle folgende Grundstruktur aufweisen:

- Standardisierter Anfang (Vorspann)
- Anfahren und Verschrauben jeder einzelnen Schraubstelle (Schraubstellen-abhängiger Code)
- Standardisiertes Ende (Nachspann)

Zunächst werden die Geometrie- und Technologiedaten der ersten Schraubstelle, für die das Bewegungsprogramm erzeugt werden muß, in der Beschreibungsdatei gesucht. Kern des Postprozessors bildet der folgende Algorithmus:

- (a) Einsprung-Marke setzen; durch sie kann das Verfahrprogramm gezielt unterbrochen und wieder fortgesetzt werden, falls bei der Verschraubung ein Prozeßfehler auftritt und beispielsweise die Schraube abgeworfen werden muß
- (b) Positionieren des Schrauberwerkzeugs über der Einschraubstelle (maximale Produkthöhe + Sicherheitsabstand)
- (c) Positionieren des Werkzeugs direkt über der Schraubstelle (incl. Mindestabstand Zuführzange)

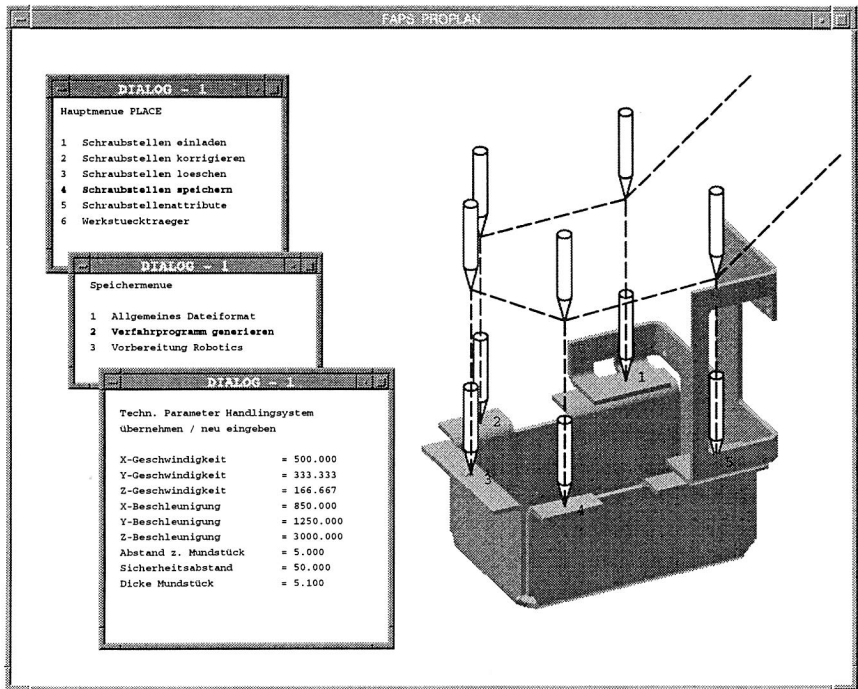


Bild 7-10: Automatische Generierung und Darstellung des Verfahrweges für das Handlingsystem einer flexiblen Schraubzelle

- (d) Technologieparameter an die Schraubsteuerung übertragen (Anzugsdrehmoment, Weiterdrehwinkel etc.)
- (e) Schraubvorgang starten
- (f) Schraubwerkzeug wieder an die Position (a) fahren

Nach dem Schritt (f) wird die Produktbeschreibungsdatei nach den Daten der nächsten Schraubstelle durchsucht und die Generierungsschritte des Algorithmus wiederholt. Der Vorgang wird solange durchgeführt bis für alle Schraubstellen der Programmcode erzeugt wurde.

In Unigraphics steht ein NC-Bohr-Modul zur Verfügung, mit dem sich der Verfahrweg bei automatischen Bohroperationen optimieren und anzeigen läßt. Dieses Tool wurde für das automatisierte Verschrauben modifiziert. So kann man im NC-Modul den Start- und den Endpunkt des Verfahrweges so definieren, daß sie der Home-Position des Handhabungsgerätes entsprechen. Zudem ist die Definition eines Sicherheitsabstan-

Bei komplexen und komplizierten Verschraubungsanwendungen ist eine exakte Kollisionsuntersuchung unumgänglich. Hierfür bietet sich der Einsatz des Simulationsprogramms Robotics an.

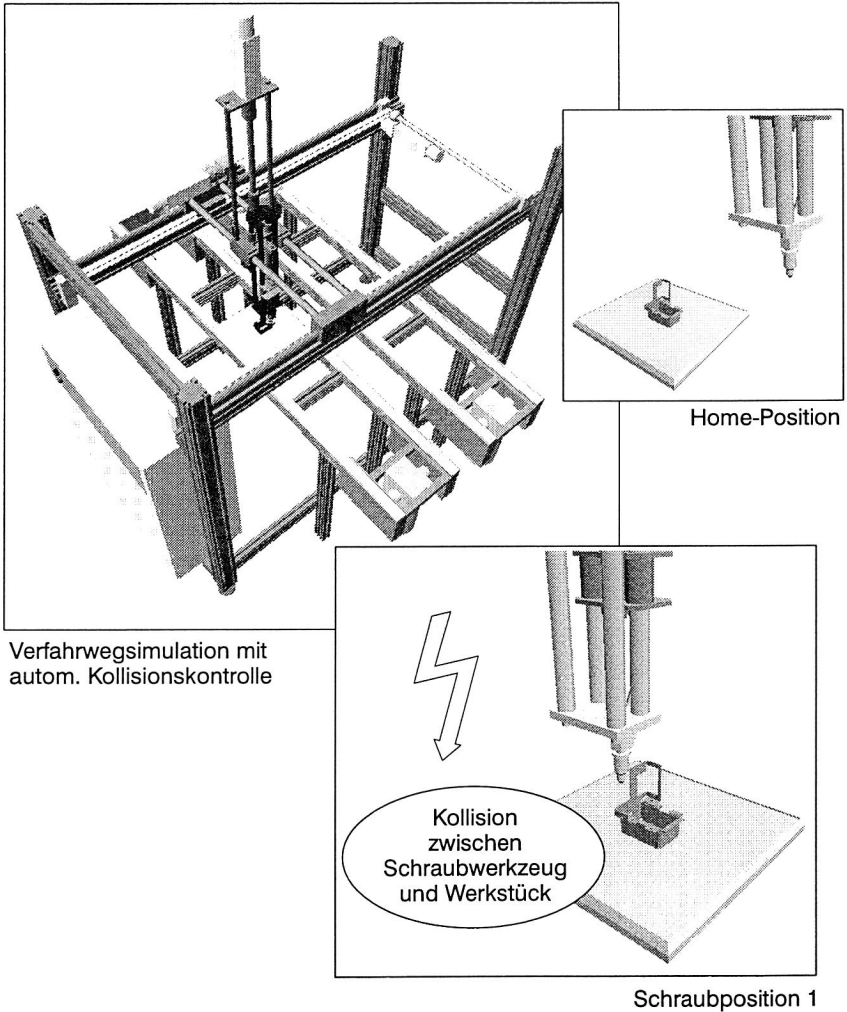


Bild 7-12: Visualisierung des Bewegungsablaufes und Online-Kollisionsüberprüfung

Die mit Unigraphics modellierten Werkstücke und Betriebsmittel können direkt in Robotics übertragen und dargestellt werden. Auch die entsprechende CLSF-Datei, die den Fahrweg enthält, kann aus Unigraphics übernommen werden. Nach dem Start des Simulationsprogramms, wird der Werkstückträger an seine Montageposition gefahren und das Bewegungsprogramm des Handlingsystems angestoßen. Online wird eine Kollisionsberechnung zwischen den Bewegungsachsen und dem Werkstück durchgeführt. Kommt es zu einer Berührung von Schraubwerkzeug und dem Bauteil (Bild 7-12), so stoppt der Prozeß und die Animation wird zur weiteren Analyse durch den Planer angehalten.

8 Zusammenfassung

Die Schraubverbindung hat auch heute noch einen großen Stellenwert bei den Fügeverfahren. Allerdings haben sich die Anforderungen an diese Verbindungstechnik in den letzten Jahren stark gewandelt. Zum einen erfordert der internationale Wettbewerb eine kostenoptimale Produktion von Wirtschaftsgütern und damit auch eine wirtschaftliche Montage von Schraubverbindungen. Zum anderen haben sich aufgrund von gestiegenen Qualitätsansprüchen und dokumentationspflichtigen Schraubverbindungen die Anforderungen an die Prozeßsteuerung wesentlich erhöht. Ziel der vorliegenden Dissertation war es deshalb, die Schraubtechnik einer ganzheitlichen Betrachtung zu unterziehen, Schwachstellen festzustellen und Lösungsansätze vorzustellen, die künftig einen prozeßoptimierten Betrieb dieser Verbindungstechnik gewährleisten sollen. Der Schwerpunkt wurde dabei auf die Steuerungstechnik gelegt und neue Wege bei der Montage von Schraubverbindungen aufgezeigt.

Um die Zielgröße bei der Schraubmontage, die Erreichung einer definierten Schrauben-Vorspannkraft, möglichst genau zu erreichen, ist es gerade für sicherheits- und funktionsrelevante Verschraubungen erforderlich, intelligente Schraubtechnik einzusetzen. Basierend auf einer differenzierten Analyse elektronischer Schraubsteuerungstechnik wurden die Defizite bestehender Systeme ermittelt und Einsatzfelder für intelligente Schraubtechnik festgelegt. Zudem wurde das Leistungsprofil einer modular aufgebauten, standardisierten Schraubsteuerung definiert, um den unterschiedlichen Anforderungen bezüglich des Einsatzfalls gerecht zu werden. Durch eine Standardisierung der Datenstrecken und Dateninhalte kann außerdem eine einfache Kopplung zu übergeordneten Auswerte- und Archivierungssystemen erreicht werden, die insbesondere bei dokumentationspflichtigen Schraubverbindungen erforderlich sind.

Häufig werden neben elektronisch gesteuerten Schraubspindeln noch einfache Schrauber mit mechanischer Abschaltung für sicherheitskritische Verschraubungen eingesetzt. Problematisch gestaltet sich hierbei die Anwendung der neuen VDI-Richtlinie 2862, die die Mindestanforderungen an Schraubsysteme, die in der Automobilindustrie eingesetzt werden, festlegt. Mit dem System PRODIAG wurde ein adaptierbares Prozeßdatenerfassungs- und Analysesystem entwickelt. Durch seine einfache Konfigurierbarkeit läßt sich das Tool an eine Vielzahl von Schraubsteuerungen und Meßgeräten zur Datenerfassung anbinden, die noch keine standardisierten Dateninhalte oder Schnittstellen aufweisen. Neben einer Online-Analyse zur aktuellen Trendverfolgung können mit PRODIAG alle Prozeßdaten archiviert und einer Langzeitauswertung unterzogen werden. Zudem besteht die Möglichkeit einer einfachen Kopplung zu zentralen QS-Systemen.

Durch den Aufbau von prozeßnahen und bereichsübergreifenden Regelkreisstrukturen können interne und externe Störungseinflüsse bei der Schraubmontage eliminiert werden und damit eine Verbesserung der Qualität der Schraubprozesse erreicht werden. Darüber hinaus muß durch eine strukturierte Bereitstellung von Expertenwissen eine langfristige Optimierung durch Vermeidung von Schraubfehlern und Beseitigung ihrer

Ursachen gewährleistet werden. An Hand einer umfassenden Analyse von Verschraubungsfehlern am Beispiel der Endmontage von Automobilen wurden die Störungseinflüsse ermittelt und prägnante Fehlerbilder zugeordnet. Hierbei wurden unterschiedliche Analysestrukturen zur Ermittlung von Verschraubungsfehlern verglichen und ihre Eignung zum Aufbau eines Diagnosesystems überprüft.

Bisherige Ablaufsteuerungen auf Basis von speicherprogrammierbaren Steuerungen sind nicht mehr ausreichend, um die vielfältigen Aufgaben, wie Prozeßsteuerung und -überwachung, in automatisierten Montagestationen zu übernehmen. Deshalb wurde ein universelles Steuerungskonzept auf PC-Basis entwickelt. Das System PROZELL eignet sich insbesondere zur Steuerung von vollautomatisierten, hochflexiblen Montagezellen zum Verschrauben. Eine hohe Parametrierbarkeit der Zelle und die Möglichkeit, bei Prozeßstörungen von einem zentralen Punkt aus in den Montageprozeß einzugreifen, lassen nicht nur eine gesteigerte Qualität der Verbindung erwarten, sondern auch eine höhere Anpassungsfähigkeit an den immer kürzeren Lebenszyklus eines Produktes.

Durch das offene Steuerungskonzept wurde zudem eine Schnittstelle zur Anbindung der Prozeßebene an die Planungsebene geschaffen. Erst durch die Realisierung von durchgängigen, technologieorientierten Verfahrensketten läßt sich eine ganzheitliche Optimierung von Fertigungs- und Montageprozessen erreichen. Als viertes Optimierungstool wurde deshalb das Planungssystem PROPLAN umgesetzt und die Kopplung zu einem Konstruktionssystem realisiert. Damit stehen umfangreiche, rechnergestützte Hilfsmittel zur Verfügung, die eine gezielte Technologieberatung ermöglichen und somit den Planungsprozeß absichern, sowie die Inbetriebnahmezeiten verkürzen.

Literatur

- [1] Alpek, F.; Jerzsabek, P.; Nagy, Z.; Szalay T.; Szélig, K.; Sallay, P.:
Überwachungsaufgaben der Montagezelle im CIM-Pilotsystem der TU Budapest. In: Elektrotechnik und Informationstechnik 110 (1993) 3, S. 127-134.
- [2] Bauer, C.-O. (Hrsg.):
Handbuch der Verbindungstechnik. Hanser Verlag, München, Wien 1991.
- [3] Bauer, C.-O.; Hinsch, Ch. (Hrsg.) u. a.:
Produkthaftung. Herausforderung an Manager und Ingenieure. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1994.
- [4] Bauer, C.-O.:
Produkthaftung Verbindungstechnik. Anforderungen aus der Produkthaftung an den Konstrukteur. Beispiel: Verbindungstechnik. In: Konstruktion 42 (1990) S. 261-265. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1990.
- [5] Bauer C.-O.:
Probleme und Lösungen beim automatischen Schrauben. In: Werkstatt und Betrieb 122 (1989) 6, S. 441-444.
- [6] Bauer, C.-O.:
Produkthaftung und Qualitätssicherung. Schadensfall. Teil 2. In: Drahtwelt 76 (1990) 2, S. 106-117.
- [7] Bauer, G.:
Schraubtechnik – Verfahren und Werkzeuge. In: die automatisierte Montage mit Schrauben S. 37-76. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim 1994.
- [8] Bauer G.:
"Nachknicken" – Sinnvoll oder nicht? Teurer, aber beruhigend. In: Der Betriebsleiter (1991) 3, S. 52-53.
- [9] Bauer, G.:
Automatisiert weil lösbar. Entwicklungsstand und Trends bei der Schraubmontage mit Hilfe von Industrierobotern. In: Maschinenmarkt 96 (1990) 22, S. 44-51.
- [10] Bauer, G.:
Punktgenau. Schraubersteuerung mit Sensoren ermöglicht Anziehmomente bis zur Streckgrenze. In: Maschinenmarkt 99 (1993) 9, S. 64-66.
- [11] Bauer, G.; Schweikert, K.; Klug, H. G.:
Schraubtechnik: Mehr Sicherheit durch Überwachung. In: VDI-Z 130 (1988) 5, S. 65-68.
- [12] Bischoff, J.; Groß, A.; Hartwig, A.; Hennemann, O.-D.; Krüger, G.:
Fügetechniken im Vergleich. In: kleben & dichten 38 (1994) 4, S. 10, 13-16.

- [13] Boubekri, N.; Nagaraj, S.:
An Integrated Approach for the Selection and Design of Assembly Systems. In: Integrated Manufacturing Systems Vol. 4 (1993) 1, S. 11-17.
- [14] Bredthauer, H.:
Schrauben mit Gefühl. In: Produktion 11 (1992) 48, S. 17.
- [15] Büttner, J.; Hennig, K.:
Stabile Prozesse. In: Industrie Anzeiger 25 (1993) 50, S. 48-52.
- [16] Deutscher Schraubenverband (Hrsg.):
ICS-Handbuch. Automatische Schraubmontage. Mönnig Verlag, Iserlohn 1997.
- [17] Dorn, L.:
Vergleich der Klebetechnik mit herkömmlichen Fügeverfahren. In: VDI-Z 133 (1991) 7, S. 80-85.
- [18] Dratschmidt, F.; Ehrenstein, G.W.:
Kunststoff-Schraubenverbindungen unter dynamischer Belastung. In: Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung. DV-Bericht 121 "Maschinenelemente und Lebensdauer" (1995) S. 81-93.
- [19] Dratschmidt, F.; Ehrenstein, G.W.:
Society of Plastics Engineers. Autec 1995: Convergence Proceedings (Vol. I) p. 1257-1263.
- [20] Drews, R.:
Das Rundum-Konzept. Reproduzierbare Montagequalität bei Schraubverbindungen. In: KEM 3 (1996) S. 84-85.
- [21] Feldmann, K.; Steber, M.:
Sichere Schraubmontage durch rechnerintegrierte Prozeßführung. In: Produktionsautomatisierung (1993) 1, S. 39-42.
- [22] Feldmann, K.; Steber, M.:
Screw Fastening in 'Flexible Automated Assembly with Computer-Integrated Process Control. In: Annals of the CIRP, Vol 41 (1992) 1, S. 41-44. Publ. by 'Technische Rundschau', Berne, Stuttgart, Hallwag Publishers, 1992.
- [23] Feldmann, K.; Steber, M.:
Computer-Integrated Process Control in Automatic Screw-Fastening Systems. Production Engineering – Research and Development in Germany. Annals of the German Academic Society for Production Engineering Vol. II/1 (1994), S. 149–152, Hanser Verlag München, Wien, New York.
- [24] Fischer, G. E.:
Montage von Schrauben mit Industrierobotern. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1990. Dissertation.

- [25] Fischer, G. E.:
Leistung lohnt sich wieder. Leistungsgewicht von Druckluft- und Elektroschrauben im Vergleich. In: Roboter 9 (1991) 2, S. 84-86; 88.
- [26] Fischer, G. E.; Schweizer, M.:
Trend zu automatischen Vorrichtungen. In: Technische Rundschau 85 (1993) 19, S. 36-39.
- [27] Grammer, B.:
Individuell angepaßt. Schaubsysteme: Großprojekt im Verbund. In: Industrie Anzeiger (1994) 12, Sonderdruck.
- [28] Grampp, K.:
Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien. (Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 40). Hanser Verlag, München, Wien 1995. Dissertation.
- [29] Groebel, U. (Hrsg.):
Angewandte Technik. Wegweiser zu Schrauben und Schraubmontage. Verlag für Technikliteratur. Hagen 1994.
- [30] Groebel, U. (Hrsg.):
Angewandte Technik. Wegweiser für Schrauben und Schraubenmontage. Verlag für Technikliteratur. Hagen 1990.
- [31] Groebel, K.-P. (Hrsg.):
Schrauben + Schraubenmontage. In: Angewandte Technik. Limeshain 1990.
- [32] Großberndt, H.:
Montageoptimierung - eine ganzheitliche Aufgabe von Hersteller und Anwender. In: Handelsblatt (22.9.1993) 183, S. B2.
- [33] Großberndt, H.:
Kleinschrauben für die automatische Montage. Die Anlagenverfügbarkeit hängt an kleinen Dingen. In: Der Zuliefermarkt (1991) 7, S. 115-122.
- [34] Großberndt, H.:
Automatische Schraubenmontage als interdisziplinäre Aufgabe. In: Werkstatt und Betrieb 125 (1992) 1, S. 56-59.
- [35] Großberndt, H.:
Optimum. Anziehverfahren und Werkstück bestimmen Geräteauswahl bei der automatisierten Schraubenmontage. In: Maschinenmarkt 98 (1992) 45, S. 42-48.
- [36] Großberndt, H.:
Produktion optimieren. Anlagenverfügbarkeit erhöhen bei der Schraubenmontage mit Hilfe der Fehleranalyse. In: Maschinenmarkt 99 (1993) 3, S. 30-33.

- [37] Grotewohl, A.:
Analyse der Großserienmontage von Schraubverbindungen. In: Automobil-Industrie 35 (1990) 5, S. 515-530.
- [38] Hake, F. O.:
Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen. (Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 16). Hanser Verlag, München, Wien 1991. Dissertation.
- [39] Hellmann K.-H.:
Entwicklung der Schraubtechnik. In VDI-Z 131 (1989) 5, S. 89-93.
- [40] Hellmann K.-H.:
Entwicklung einer flexiblen Schraubzelle unter besonderer Berücksichtigung von pneumatischen Bauelementen. Technische Hochschule Aachen, Dissertation 1988.
- [41] Hofschneider, M.; Beyer, S.:
Kritische Betrachtungen zu Null-Fehler-Forderungen bei Schrauben für die automatische Montage. In: Automatische Schraubmontage. 2. Workshop, Siegen (1995), Deutscher Schraubenverband e.V., Düsseldorf.
- [42] Horikami, K.; Itsuzaki, Y.; Nakao, M.; Nakamura, M.; Takano, M.; Okumura, K.:
Vision for Screw Fastener Robot. In Tagungband: International Symposium on Industrial Robots, Tokyo (ISIR) 24 (1993) S. 97-104.
- [43] Immisch, D.:
Kleine Drehmomente sicher im Griff. Schraubmontage. Elektroschrauber mit schlanken Rotoren arbeiten präziser. In: Handelsblatt (9.9.1992) Nr. 174.
- [44] Immisch, D.:
Parallel verschrauben. Montagetechnik: Drehmoment kontrollieren. In: Industrie Anzeiger 48 (1994) S. 25-28.
- [45] Immisch, D.:
Der richtige Dreh. Zu hohe Einschraubgeschwindigkeit führt bei Kunststoffen zum Aufschmelzen. In: Maschinenmarkt Würzburg 100 (1994) 45, S. 52-53.
- [46] Keferstein, C.P.:
Tiefen- und Drehmomentsensor zur Prüfung von Innengewinden. In: Bonfig, K. W. (Hrsg.), Sensorik, Bd. 3. expert-Verlag, Enningen 1993, S. 515-532.
- [47] Klos M.:
Neue Informationsmedien für die automatische Schraubmontage. In: Automatische Schraubmontage. 2. Workshop, Siegen (1995), Deutscher Schraubenverband e.V., Düsseldorf.

- [48] Klos M.:
Computergestützte Verarbeitung von Expertenwissen am Beispiel eines Informations- und Beratungssystems für die automatische Montage von Schraubverbindungen. VDI Fortschrittsberichte Reihe 20 Nr. 212, VDI-Verlag, Düsseldorf 1996. Dissertation.
- [49] Koch, M.:
Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie. (Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 41). Hanser Verlag, München, Wien 1995. Dissertation.
- [50] Krause, D.:
Rechnerunterstütztes Konzipieren und Entwerfen mit Integration von Analysen, insbesondere Berechnungen. VDI Fortschrittsberichte Reihe 20 Nr. 78, VDI-Verlag, Düsseldorf 1993. Dissertation.
- [51] Kroh, R.:
Ultraschallverfahren zum Messen der Vorspannkraft auf dem langen Weg zur Serienreife. In: Maschinenmarkt 101 (1995) 30, S. 20.
- [52] Maier C.:
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern. (iwb Forschungsberichte Band 3) Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1989. Dissertation.
- [53] Malek, S. S.:
Multivariable Effects on an Automatic Screw-Torquing Process. In: Journal of Manufacturing Systems. Vol 12 (1993) 6, S. 457-462.
- [54] Malsem von, S.:
Orten mit Ultraschall. Schraubtechnik: Klemmkraft direkt messen. In: Industrie Anzeiger (1993) 42, Sonderdruck.
- [55] Mann, T.:
Rechnergestützte Planung flexibel automatisierter Montagestationen in der variantenreichen Serienmontage am Beispiel der Montage von Pkw-Motoren. Universität Karlsruhe 1994. Dissertation.
- [56] Meerkamm, H.; Krause, D.; Rösch, St.:
Analysemöglichkeiten für Blechbiegeteile im Konstruktionssystem mfk. In: CIM Management 10 (1994) 2, S. 41-44.
- [57] Meerkamm, H.; Rösch, St.; Storath, E.:
In: Gausemeier, J. (Hrsg.): *CAD '94. Produktdatenmodellierung und Prozessmodellierung als Grundlage neuer CAD-Systeme*. Fachtagung der Gesellschaft für Informatik e. V. Paderborn 17./18.3.1994, S. 459-470.

- [58] Meerkamm, H.; Rösch, St.; Storath, E.; Steber, M.:
A Design System 'Sheet Metal Parts' as a Basis for a Concurrent Engineering Approach. Sheet Metal 1996, proceedings of the 4th international conference, held at the University of Twente, The Netherlands, 1-3 April 1996.
- [59] Model, P.; Kratz, R.:
Qualitätssicherung in der Schraubmontage. Statistische Auswertungen und Trendermittlungen. In: Automobil-Industrie 34 (1989) 1, S. 65-68.
- [60] Meretz, H., Seeheim-Jugenheim:
Schraubenverbindungen - neue Ergebnisse aus Forschung und Praxis. In: Werkstatt und Betrieb 124 (1991) 8, S. 653-656.
- [61] Milberg J.; Koepfer T.;
Leanproduktion – Produktionsstrategie der Zukunft? VDI Jahrbuch 93/94, VDI-Verlag, Düsseldorf 1993.
- [62] Müller, J.:
Die Schraube sitzt. In: Qualitätstechniken 39 (1994) 1, S. 51.
- [63] N.N.:
Die gute Verbindung. In: Automobilproduktion Dezember 1992, S 132-136. Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1992.
- [64] N.N.:
So kommen die Räder an's Auto. Montage mit sensorisch geführten Robotern. In: Roboter 12 (1994) 2, S. 10-12.
- [65] N.N.:
Schrauben mit System. In: Industrie Anzeiger (1992) 8, S. 72-74.
- [66] N.N.:
Elektronische Regelung für Impulsschrauber. In: Automobil-Produktion (1991) 9, S. 200-203.
- [67] N.N.:
Sparimpulse für die Montage. EC-Impulsschrauber als Kostendämpfer. In: Roboter 12 (1994) 4, S. 54-55.
- [68] N.N.:
Entwicklung zum "Schraubzentrum". In: Flexible Automation (1994) 1, S. 32.
- [69] N.N.:
EDV bringt Intelligenz in den Schrauber. In: VDI-N, Wolfsburg (1992) 9.
- [70] N.N.:
Elektroschrauber werden netzwerkfähig. In: VDI Nachrichten (1993) 34, S. 17.

- [71] N.N.:
Überwachtes Schrauben. Qualitätssicherung bei Schraubautomaten. In: *Roboter* 8 (1990) 4, S. 58-59.
- [72] N.N.:
Diagnose von Verschraubungen. Systeme zur Qualitätssicherung der Stichprobenprüfung. In: *Kontrolle* (1991) 4, S. 10-16.
- [73] N.N.:
Mehr Qualität durch Verbund. In: *Automobil-Produktion* (1993) 2, S. 54-55.
- [74] N.N.:
Marktübersicht: Druckluftschrauber. In: *Drucklufttechnik Mainz*, a14 (1995) 1-2, S. 52-54.
- [75] N.N.
Kurzauswertung der Fragebogenaktion zur Schraubtechnik. Robert Bosch GmbH 1991.
- [76] N.N.
Handschauber spielen auch zukünftig eine entscheidende Rolle in der Montage. In: *ZWF* 87 (1992) 1, S. 33.
- [77] N.N.
Elektronische Regelung für Impulsschrauber. In: *Automobil-Produktion*, September 1991.
- [78] N.N.:
Standardisierung in der Schraubtechnik – SIS-Spezifikation. Ausgabe A/1 v. 12.03.1997.
- [79] N.N.:
Die Mechanik der Schraubverbindung. In: *DK* (1988) 1, S.:12-19.
- [80] N.N.:
Eurotension – Spannungsgesteuerte Verschraubung. Firmenmitteilung, Fa. Georg Renault (1993).
- [81] N.N.
Statistische Analyseverfahren für Schraubwerkzeuge. Taschenbuch Fa. Atlas Copco (1991).
- [82] Pfeiffer, Rolf:
Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik. (Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 10). Hanser Verlag, München, Wien 1990. Dissertation.

- [83] Pfeiffer, R., Steber, M.:
Meßdaten flexibel an Schraubstationen erfassen. In: Werkstatt und Betrieb 122 (1989) 10, S. 872-876.
- [84] Pfeifer, T.; Westkämper, E.; Weule, H. u. a.:
Die Realisierung von Qualitätsregelkreisen – zentrales Moment der integrierten Qualitätssicherung. Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium 1990, VDI-Verlag Düsseldorf, 1990.
- [85] Rathmill, K.:
Robotic Assembly. International Trends in Manufacturing Technology. IFS (Publications) Ltd, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1985.
- [86] Rösch, S.:
Konstruktionssystem für ein rechnerunterstütztes Konzipieren und Entwerfen komplexer Blechteile. Universität Erlangen-Nürnberg 1996. Dissertation.
- [87] Rothaupt, A.:
Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung. (Fertigungstechnik - Erlangen; Bd. 44). Hanser Verlag, München, Wien 1995. Dissertation.
- [88] Rudolf H.:
Schraubtechnik – Grundlagen, Schraubsysteme, Anziehverfahren. Die Bibliothek der Technik, Band 62. Verlag Moderne Industrie Landsberg (1992).
- [89] Rudolf H.:
Neue Schraubverfahren und Schraubenlagen. In: Automatische Schraubmontage. 2. Workshop, Siegen (1995), Deutscher Schraubenverband e.V., Düsseldorf.
- [90] Rudyk, M.:
Spezifikation des VMEbusses. In: Elektronik, Sonderheft 229, S. 5-13.
- [91] Siegfried, F.:
Prozeßsteuerung und Überwachung: Diagnosesysteme zur Reduzierung von Schwachstellen. In: Ondratschek, D., Taschenbuch für Lackierbetriebe. Vincentz Verlag; Hannover 1992, S. 312-321.
- [92] Scharf, P.:
Die automatisierte Montage mit Schrauben. Anforderungen, alternative Fügeverfahren, Wirtschaftlichkeit. expert Verlag, Renningen-Malmsheim 1994.
- [93] Scharf, P.:
Informationssystem für die automatische Schraubmontage. In: Wissenschaft und Technik (1993) 6, S. 68-71.

- [94] Schatz, V.:
Buch mit sieben Siegeln? Qualität in der Schaubmontage. In: iam (1990) 5, S. 18-21.
- [95] Scheller, J.:
Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen. (Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 18). Hanser Verlag, München, Wien 1991. Dissertation.
- [96] Schnepf, P.:
Zielkostenorientierte Montageplanung. (Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 47). Hanser Verlag, München, Wien 1995. Dissertation.
- [97] Schröder, F.:
Ausgetretene Pfade verlassen. Neue Press- und Schraubtechnik stärkt Kölner im internen Ford-Wettbewerb. In: Produktion 16 (1996) 8, S. 26.
- [98] Schweizer, M., Leicht Th.:
Roboter ermöglicht Just-in-Time-Montage. Mechanische Vorfertigung von Industrieelektronikgehäusen. In: Transfer (1994) 15, S. 24-26.
- [99] Sommer, E.:
Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen. (Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 21). Hanser Verlag, München, Wien 1992. Dissertation.
- [100] Solvie, M.:
Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen. (Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 52). Hanser Verlag, München, Wien 1995. Dissertation.
- [101] Stapel, A.:
Automobilhersteller setzt auf Impulsschrauber. Steckgrenzgesteuertes Schraubenanziehen in der Handmontage. In: Schweizer Maschinenmarkt 93 (1993) 21, S. 20-21.
- [102] Stapel, A.:
Die Ära der intelligenten Schrauber hat begonnen. In: Der Betriebsleiter, Wiesbaden 35 (1994) 1-2, S. 62-63.
- [103] Steber, M.:
Gesichertes Schrauben in der Montageautomatisierung. Seminarunterlagen zu "Rationelle Montage- und Handhabungstechnik durch angepaßte Automatisierung", Motek '91, S. 1-13, Sinsheim 1991.
- [104] Steber, M.:
Einheitliche Datenstandards für den Qualitätsprozeß. In: Handelsblatt (14.9.1994) Nr. 178, S. 30.

- [105] Steber, M.:
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der Montageautomatisierung. Seminarunterlagen zum VDI-Seminar "Rationalisierung in der Geräte- und Baugruppenmontage", Hrsg. v. VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB), Fürth, 1994.
- [106] Steber, M.:
Gesicherte Prozesse bei der automatisierten Montage von Schraubverbindungen. Seminarunterlagen zum Fachseminar zur 13. MOTTEK 1994 "Rationelle Montage durch neue Organisationsformen und angepaßte Automatisierung", Sinsheim 1994.
- [107] Steber, M.:
Datenstandards nicht nur für die Automobiltechnik. In: Markt und Technik (1995) 10, S. 92 u. 95.
- [108] Steber, M.:
Qualitätsverbesserung und Kostensenkung bei der Montage von Schraubverbindungen durch konsequente Standardisierung der Datenschnittstellen. In: Automatische Schraubmontage. 2. Workshop, Siegen (1995), Deutscher Schraubenverband e.V., Düsseldorf.
- [109] Steber, M.:
Rechnergestützte Verfahrenskette für die Montagetechnologie Schrauben. In: wt Produktion und Management 85 (1995) 5, S. 268.
- [110] Steber, M.:
Prozeßregelung und -überwachung optimiert die automatisierte Schraubmontage. Unterlagen zum Seminar des VDI-Bildungswerk "Auslegung und Betrieb modularer Montagesysteme", Hrsg. v. VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB), 1995, 12 S.
- [111] Steber, M.:
Robuste, angepaßte Prozeßgestaltung bei der automatisierten Schraubmontage durch intelligente Steuerungstechnik. Seminarunterlagen zum FAPS-TT-Seminar "Rationelle Gerätemontage durch innovative Systemlösungen", Erlangen, 30.1.1996.
- [112] Steber, M.; Klos, M.:
Zweimal W – Flexible Serienmontage mit einer automatischen Schraubstation. In: Flexible Automation 5 (1996) S. 40 u. 42.
- [113] Steeg, B.:
Automatisierte Montage mit gewindefurchenden Schrauben bei thermoplastischen Kunststoffen. Universität-Gesamthochschule Siegen 1989. Dissertation.

- [114] Steeg, B.:
Automatisiertes Verschrauben - heutige Probleme und Lösungsansätze. In: Ejot Forum. Technische Aufsätze, Nr. 3. Bad Laasphe 1992.
- [115] Steinert, H.:
Verklebungen und Metalleinlagen in Kunststoffen bereiten Probleme. In: Blick durch die Wirtschaft 32 (1989) 224, S. 8.
- [116] Steinhilpert, W., Hennerici, H., Fritzsche, R.:
Simulation von Schraubenanzugsverfahren. Prüfstandgestützte Empfehlungen. In: Der Konstrukteur 24 (1993) 5, S. 50-53.
- [117] Tönshoff, H. K., Büttner, J.:
Wissensbasierte Diagnose in der Montage - Ein wichtiges Hilfsmittel zur Qualitätssicherung. In: Tagungsband CAT 93, Ident Vision-Quality (Messe Stuttgart 25.-28.05.1993) S. 359-367.
- [118] Tönshoff, H. K.; Büttner, J.:
Wissensbasierte Diagnose in der Montage. Ein wichtiges Hilfsmittel zur Qualitätsverbesserung. In: QZ 37 (1992) 3, S. 165-168.
- [119] Thomala, W.:
Gewichts- und kostenoptimierte Schraubenverbindungen. In: Mat.-wiss. u. Werkstofftechnik, Weinheim 26 (1995) S. 32-50.
- [120] Thoren, F.; Rauthe, R.:
Die fehlerlose Schraubmontage - Strategien und Ausblick. In: VDI Berichte (1994) 1155, S. 13-19.
- [121] Thoren, F.:
202 Schraubkanäle für den W 202. Bosch-Schraubtechnik im Automobilbau. In: ATZ/MTZ-Sonderheft Fertigungstechnik 1995/1995.
- [122] Trepe, E.:
Verfahren zum divergenzgesteuerten Anziehen von Schraubenverbindungen. In: Fertigungstechnik und Betrieb 39 (1989) 11, S. 687.
- [123] Veitinger, H.:
Ohne Umweg. Direktes Messen der Vorspannkraft mit Ultraschallsensor auf dem Schraubenkopf. In: Maschinenmarkt 100 (1994) 15. Sonderdruck.
- [124] VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (Hrsg.):
Einsatz von Schraubsystemen in der Automobilindustrie – VDI 2862 (Entwurf). Beuth Verlag, Berlin 1996.
- [125] Vohl, B.:
Elektronische Steuerung und Überwachung von Verschraubungsprozessen in der Großserienfertigung. In: VDI Berichte (1989) 766, S. 117-139.

- [126] Wagner, U.:
Der DIN-Meßbus hat sich bewährt. In: Markt und Technik - Wochenzeitung für Elektronik (1994) 42, S. 51-52.
- [127] Warnecke, H.-J.; Fischer, G. E.:
Entwicklung eines Compliance-Elements zur Montageautomatisierung. In: Robotersysteme (1990) 6, S. 129-139.
- [128] Warnecke, H.-J.:
Die Summe aus Prozeßaufwand und Logistikaufwand muß minimiert werden. In: Blick durch die Wirtschaft 17. Oktober 1991.
- [129] Werthe B.
Qualitätssicherung in der Schraubmontage. In: Schraubenverbindungen – Neue Ergebnisse aus Forschung und Praxis. 3. Informations- und Diskussionsveranstaltung, Darmstadt (1991), Deutscher Schraubenverband e.V., Düsseldorf.
- [130] Werthe, B.:
Automatische Schraubmontage in der Automobilindustrie aus der Sicht eines Qualitätssicherers. In: Automatische Schraubmontage. 2. Workshop, Siegen (1995), Deutscher Schraubenverband e.V., Düsseldorf.
- [131] Werthe, B.:
Sparimpulse für die Montage. In: Automobil-Produktion (1993) 2, S. 62-63.
- [132] Widmann, H.:
Ausfallrate senken. In: Industrie Anzeiger 26 (1994) S. 52-53.
- [133] Wiegand H.; Kloos K.-H.; Thomala W.
Konstruktionsbücher Band 5: Schraubenverbindungen. Springer Verlag Berlin, 1988.
- [134] Zöllner, B.:
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion. (Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 45). Hanser Verlag, München, Wien 1995. Dissertation.
- [135] Zwick, A.:
Lösbar verbinden und Kosten sparen. In: Handelsblatt (14.5.1997) Nr. 91, S. 42.

Lebenslauf

Michael Steber

geboren am 10.07.1962 in Memmelsdorf/Ofr.

verheiratet mit Petra Steber, geb. Bayer, 1 Kind

1968 - 1972	Grundschule in Bamberg
1972 - 1981	Dientzenhofer-Gymnasium in Bamberg, math.-naturwiss. Zweig
1981 - 1982	Grundwehrdienst
1982 - 1988	Studium der Fertigungstechnik an der Universität Erlangen-Nürnberg Abschluß 10/1988: Dipl.-Ing.
1988 - 1996	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik an der Universität Erlangen-Nürnberg. Leiter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
1991 - 1996	Oberingenieur am o. g. Lehrstuhl
seit 02/1996	Fertigungsleiter bei Fa. Wöhner GmbH & Co. KG, Rödental

Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 2

Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektierung von Montagesystemen

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartoniert.

Band 4

Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 5

Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 6

Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 7

Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 9

Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 10

Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik

216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 11
Herbert Fischer
**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung**
201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartonierte.

Band 12
Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartonierte.

Band 13
Frank Vollertsen
**Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden
verschleißfesten Stahls**
XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartonierte.

Band 14
Stephan Biermann
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das
Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern**
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartonierte.

Band 15
Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartonierte.

Band 16
Frank Oswald Hake
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für
automatisierte Montagezellen**
XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartonierte.

Band 17
Herbert Reichel
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch
rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartonierte.

Band 18
Josef Scheller
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für
rechnergeführte Montagezellen**
198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartonierte.

Band 19
Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartonierte.

Band 20
Joachim Schmid
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß
mit Industrierobotern**
XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartonierte.

Band 21
Egon Sommer
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende
Industrieroboter in Montagezellen**
188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartonierte.

Band 22
Georg Geyer
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten
in der Montage**
192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartonierte.

Band 23

Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)

186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 24

Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung

VI + 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 25

Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation

188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 26

Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen

141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 27

Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung

195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 28

Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozeßkette für die Herstellung von Blechblegteilen

149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 29

Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen : Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen

186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 30

Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen

180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 31

Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen

XI + 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 32

Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen

XI + 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 33

Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage

175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 34

Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung

XIV + 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 35
Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener
Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV + 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 36
Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993. Kartoniert.

Band 37
Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
In einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 38
Robert Schmidt-Hebbel
**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender
Durchgangslöcher**
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 39
Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994. Kartoniert.

Band 40
Konrad Grampp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an
Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 41
Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 42
Armin Gropp
**Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem
gepulsten Nd:YAG-Laser**
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 43
Werner Heckel
**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung
mit dem Lichtschnittverfahren**
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 44
Armin Rothhaupt
**Modulares Planungssystem zur Optimierung
der Elektronikfertigung**
180 Seiten, 101 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 45
Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 46
Bodo Vormann
**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung
komplexer Blechblegteile**
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartonierte.

Band 47
Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
144 Seiten, 75 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 48
Rainer Klotzbücher
**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung
in flexiblen Fertigungssystemen**
156 Seiten, 62 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 49
Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
144 Seiten, 96 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 50
Jörg Franke
**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)**
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995. Kartonierte.

Band 51
Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995. Kartonierte.

Band 52
Michael Solvie
Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996. Kartonierte.

Band 53
Robert Hopperditzel
Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartonierte.

Band 54
Thomas Rebhahn
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996. Kartonierte.

Band 55
Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartonierte.

Band 56
Uwe Schönherr
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen
mit kooperierenden Robotern**
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996. Kartonierte.

Band 57
Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartonierte.

Band 58
Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 59
Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 60
Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 61
Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
182 Seiten, 100 Bilder. 1997. Kartoniert

Band 62
Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert

Band 63
Peter Steinwässer
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung
190 Seiten, 87 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 64
Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 65
Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997. Kartoniert

Band 66
Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung
168 Seiten, 96 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 67
Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulnwickeln.
186 Seiten, 125 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 68
Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 69
Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 70

Norbert Neubauer

Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen

120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 71

Michael Steber

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen

In der automatisierten Montage

168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.