Forschungsberichte

Band 161

Wolfgang Zeller

Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen

herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Herbert Utz Verlag

Forschungsberichte iwb

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
Technische Universität München
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2001

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2002

ISBN 3-8316-0100-3

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 - Fax: 089/277791-01

Geleitwort des Herausgebers

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung. Denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren und Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Produktentwicklung über die Planung von Produktionssystemen hin zu den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb*-Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

1.1 Ausgangssituation 1
1.2 Zielsetzung 4
1.3 Vorgehensweise 4

2 Stand der Forschung und Technik 6

2.1 Einführung 6
2.2 Grundlagen der Sicherheitstechnik 7
2.2.1 Begriffe 7
2.2.2 Methoden 8
2.3 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen 10
2.4 Rechtliche und normative Randbedingungen 12
2.4.1 Richtlinien der europäischen Gemeinschaft 12
2.4.2 Harmonisierte Normen und weitere Regelwerke 14
2.5 Konstruktive Maßnahmen und trennende Schutzeinrichtungen 15
2.6 Antriebs- und steuerungstechnische Sicherheitsmaßnahmen 18
2.6.1 Einführung 18
2.6.2 Sichere Signalaufnahme 19
2.6.3 Sichere Übertragungs- und Verbindungstechnik 19
2.6.4 Sichere Verarbeitung 20
2.6.5 Sichere Signalausgabe und Funktionsdurchführung 25
2.6.6 Sichere Antriebsfunktionen 28
2.6.7 Benutzerunterstützende Maßnahmen zur Prozessüberwachung und Arbeitsvorbereitung 30
2.7 Organisatorische Sicherheitsmaßnahmen 32
2.8 Konstruktionsprozess von spanenden Werkzeugmaschinen 34
2.8.1 Einführung 34
2.8.2 Konstruktion der Sicherheitskreise 34
2.8.3 Methodische Unterstützung des Konstruktionsprozesses 35
2.8.4 Konstruktionsbegleitende Vorherbestimmung von Produkteigenschaften 37
2.9 Zusammenfassung und Ableitung des Handlungsbedarfs 38

3 Zielsetzung und Anforderungsanalyse 40

3.1 Zielsetzung der Arbeit 40

3.2 Anforderungsanalyse 40
3.2.1 Anforderungen an die Bedienung von Werkzeugmaschinen 41
3.2.2 Rechtliche Anforderungen und Risikoanalyse 42
3.2.3 Vorherbestimmung des sicherheitsrelevanten Verhaltens 45
3.2.4 Anforderungen an die Produktivität und zur Kostensenkung 46

4 Sicherheitskonzept der Antriebs- und Steuerungstechnik 47

4.1 Struktur eines gesamtheitlichen Sicherheitskonzepts 47
4.2 Gliederung der notwendigen Bedienhandlungen in Betriebsarten 48
4.2.1 Produktionsbetrieb 50
4.2.2 Einrichten und Test 53
4.2.3 Überwachung, Störungsbeseitigung und Optimierung 57
4.2.4 Werkstattorientierte Fertigung 61
4.2.5 Sonderbetrieb Produktion bei offener Schutztür 65
4.3 Gestaltung der Bedienerschnittstelle 66
4.4 Busbasierte Informationsübertragung im Maschinenfeld 68
4.4.1 Sichere standardisierte Feldbussysteme 69
4.4.2 Feldkomponenten zur Ein- und Ausgabe sicherheitsrelevanter Informationen 71
4.4.2.1 Sicherheitstechnisch erweitertes E/A-Modul für Feldbussysteme 71
4.4.2.2 Anbindung sicherheitsrelevanter Sensoren 73
4.4.2.3 Anbindung sicherheitsrelevanter Aktoren 74
4.4.2.4 Beschaltung von Sicherheitskomponenten nach dem Schnittstellenkonzept des E/A-Moduls 75
4.5 Steuerungsintegrierte Sicherheitsfunktionen 77
4.5.1 Sicherheitsmaßnahmen für steuerungsintegrierte Sicherheitsfunktionen 77
4.5.2 Verknüpfung sicherheitsrelevanter Daten 78
4.6 Konzeptionelles Vorgehen zur Konstruktion der Sicherheitskreise 79
4.7 Zusammenfassung 81

5 Vorherbestimmung des Verhaltens von NC-Antrieben..... 82

5.1 Systemeigenschaften von NC-Antrieben unter sicherheitsrelevanten Aspekten 82
5.2 Teilsysteme der Sicherheitstechnik für die Modellbildung 84
5.2.1 Modellbildung der Antriebsmechanik 86
5.2.2 Modellbildung der Gegenkräfte und -momente 89

5.2.3 Modellbildung der elektrischen Antriebstechnik 91
5.2.3.1 Drehstrommotor mit selbstgeführtem Stromrichter 92
5.2.3.2 Digital realisierte Antriebsregelungstechnik 95
5.2.3.3 Sichere Antriebsfunktionen 97
5.2.3.4 Messsysteme für Lagen und Winkellagen 98
5.2.3.5 Bewegungssteuerung 98
5.2.4 Modellbildung der Informationstechnik 99
5.2.4.1 Aufnahme und Ausgabe sicherheitsrelevanter Informationen 99
5.2.4.2 Busbasierte Informationsübertragung 100
5.2.4.3 Verarbeitung durch programmierbare elektronische Steuerungen 101
5.3 Integrierte Simulation des Gesamtsystemverhaltens 101
5.4 Vorgehensweise zur Bestimmung des sicherheitsrelevanten Verhaltens .. 102
5.4.1 Simulation des Verhaltens im Betriebsfall 104
5.4.2 Simulation des Verhaltens im Fehlerfall 105
5.4.3 Bewertung der Simulationsergebnisse 105
5.5 Zusammenfassung 106

6 Prototypische Umsetzung und Verifikation des Sicherheitskonzepts 107

6.1 Übertragung des Sicherheitskonzepts 107
6.2 Beschreibung der Versuchsmaschinen 108
6.2.1 Horizontaler zweiachsiger Antriebsversuchsstand 108
6.2.2 Vertikale dreiachsige Fräsmaschine für den Werkstattbetrieb 109
6.2.3 Horizontales vierachsiges Bearbeitungszentrum 110
6.3 Ergebnisse der prototypischen Umsetzung 112
6.3.1 Benutzergerechte Bedienungsschnittstelle 112
6.3.2 Antriebs- und steuerungsintegrierte Sicherheitsfunktionen 114
6.3.3 Sichere busbasierte Informationsübertragung 116
6.4 Vorherbestimmung des sicherheitsrelevanten Verhaltens der NC-Antriebe 117
6.4.1 Modellbildung der Antriebsmechanik 117
6.4.2 Modellbildung der elektrischen Antriebs- und Steuerungstechnik 123
6.4.3 Benutzeroberflächen zur Durchführung der Simulation 128
6.5 Verifikation des Sicherheitskonzepts 131
6.5.1 Sicherheitsrelevantes Verhalten im Betriebsfall 131

6.5.2 Sicherheitsrelevantes Verhalten im Fehlerfall 134

7 Technische und wirtschaftliche Bewertung 138

7.1 Ansätze zur Bewertung des Sicherheitskonzepts 138
7.2 Erweiterung der Maschinenfunktionalität 138
7.3 Kostenbewertung 139
7.4 Reduzierung des Entwicklungsrisikos 143
7.5 Schlussfolgerung 144

8 Zusammenfassung und Ausblick 145

8.1 Zusammenfassung 145
8.2 Ausblick 147

9 Literaturverzeichnis 148

10 Anhang 167

10.1 Liste der notwendigen Bedienhandlungen 167
10.2 Betriebsarten von spanenden Werkzeugmaschinen 170

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

1 Kleine und große lateinische Buchstaben

Größe	Einheit	Bezeichnung
$\underline{\underline{A}}$		Systemmatrix
$\underline{\underline{A}}_{red}$		Systemmatrix des ordnungsreduzierten Systems
b	mm	Spanungsbreite
$\underline{\underline{B}}$		Eingangsmatrix
$\underline{\underline{B}}_{red}$		Eingangsmatrix des ordnungsreduzierten Systems
$\underline{\underline{C}}$		Messmatrix
$\underline{\underline{C}}_{red}$		Messmatrix des ordnungsreduzierten Systems
$\underline{\underline{D}}$	$(N \cdot s)/m$	Dämpfungsmatrix
$\underline{e}$		Erregervektor
$\underline{\underline{E}}$		Einheitsmatrix
F_{an}	N	angreifende Kraft
f_L	Hz	Frequenz des lastseitigen Drehfeldes
f_N	Hz	Frequenz des netzseitigen Drehfeldes
F_c	N	Schnittkraft (cutting force)
F_C	N	Reibkraft infolge COULOMBscher Reibung
F_f	N	Vorschubkraft (feed force)
F_{gegen}	N	Gegenkraft am Vorschubschlitten
F_H	N	Haftkraft
F_R	N	Reibkraft
F_T	N	extern aufgebrachte Tischkraft

h	mm	Spanungsdicke
i_{soll}	A	Stromsollwert
J	$kg \cdot m^2$	Massenträgheitsmoment
$\underline{\underline{K}}$	N/m	Steifigkeitsmatrix
m	kg	Masse
M_{an}	Nm	angreifendes Moment
M_c	Nm	Schnittmoment
M_C	Nm	Reibmoment infolge COULOMBscher Reibung
M_{gegen}	Nm	Gegenmoment an der Hauptspindel
M_H	Nm	Haftmoment an der Hauptspindel
M_{Mot}	Nm	Motormoment an der Rotorwelle
M_R	Nm	Reibmoment
M_S	Nm	extern aufgebrachtes Spindelmoment
$\underline{\underline{M}}$	kg	Massenmatrix
n_{DOF}		Anzahl der Freiheitsgrade je Knotenpunkt
$n_{e,x}$	$\sqrt{m/N}$	Kenn-Nachgiebigkeitswurzel (axial)
$n_{e,\varphi}$	$\sqrt{rad/N}$	Kenn-Nachgiebigkeitswurzel (rotatorisch)
n_{FE}		Anzahl der Übertragungszyklen bis zur Fehlererkennung
n_{ist}	$1/s$	Drehzahlistwert
n_{KP}		Anzahl der Knotenpunkte des FE-Modells
n_{orig}		Systemordnung des Originalsystems
n_{red}		Systemordnung des ordnungsreduzierten Systems
n_{soll}	$1/s$	Drehzahlsollwert

n_{vor}	$1/s$	Drehzahlvorsteuerwert
$\underline{q}$		Vektor der Systemknotenverschiebungen
Δt_{EA}	s	Gesamtverzögerungszeit des E/A-Moduls
Δt_{EASys}	s	Systemzykluszeit des E/A-Moduls
Δt_{FB}	s	Übertragungszeit des Bussystems
$\Delta t_{Pin\ 2}$	s	Schaltzeit des Kontakts an Pin 2 des E/A-Moduls
$\Delta t_{Pin\ 4}$	s	Schaltzeit des Kontakts an Pin 4 des E/A-Moduls
Δt_{ZFA}	s	parametriertes Zeitfenster der Antivalenzbewertung
u_d	V	feldbildender Spannungsanteil
u_q	V	momentenbildender Spannungsanteil
u_{ZK}	V	Zwischenkreisspannung
$\underline{u}$		Eingangsvektor
$\underline{u}_{red}$		Eingangsvektor des ordnungsreduzierten Systems
v_{rel}	m/s	Relativgeschwindigkeit
x	m	Weg
$\underline{x}$		Zustandsvektor
$\underline{x}_{red}$		Zustandsvektor des ordnungsreduzierten Systems
$\underline{y}$		Ausgangsvektor
$\underline{y}_{red}$		Ausgangsvektor des ordnungsreduzierten Systems

2 Kleine und große griechische Buchstaben

Größe	**Einheit**	**Bezeichnung**
φ	rad	Winkellage

μ_V	$(N \cdot s)/m$	Koeffizient für viskose Reibung
ω_{rel}	rad/s	Winkelgeschwindigkeit

3 Mathematische Sonderzeichen

Zeichen	Bezeichnung
Δ	zeitliche Dauer, Differenzwert
max	größter Wert
min	kleinster Wert
$sign$	Signum-Funktion
$\dot{x}$	erste Ableitung der Variable x nach der Zeit
$\ddot{x}$	zweite Ableitung der Variable x nach der Zeit
$\sum$	Summe

4 Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
AC	Axis Control
AE	Acoustic Emission
ASM	Asynchronmaschine
BG	Berufsgenossenschaft
BIA	Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit
BWS	Berührungslos wirkende Schutzeinrichtung
CAD	Computer Aided Design
CEN	Europäisches Komitee für Normung
CENELEC	Europäisches Komitee für Normung in der Elektrotechnik

CNC	Computerized Numerical Control
DC	Gleichgröße
DP-RAM	Dual Port - Random Access Memory
DESINA	Dezentralisierte Standardisierte Installationstechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DKE	Deutsche Elektrotechnische Kommission
E/A	Eingabe / Ausgabe
ED	Einschaltdauer
E/R	Einspeisung / Rückspeisung
ELFE_FE	Electric Feed Drives_Finite Elements
EN	Europäische Norm
FEM	Finite Elemente Methode
FMEA	Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse
HSA	Hauptspindelantrieb
HVBG	Hauptverband der Berufsgenossenschaften
IEC	International Electrotechnical Commission
ISA	Industrie Standard Architektur
MC	Motion Control
MKS	Mehrkörper-System
MMC	Man Machine Control
NC	Numerical Control
PC	Personal Computer
PLC	Programmable Logical Control
PROFIBUS	Process Field Bus
SBH	Sicherer Betriebshalt

SERCOS	Serial Realtime Communication System
SG	Sichere Geschwindigkeit
SH	Sicherer Halt
SM	Synchronmaschine
TÜV	Technischer Überwachungsverein
VBA	Visual Basic for Applications (Programmiersprache)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDW	Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V.
VSA	Vorschubantrieb
WSW	Werkstückwechsel
WZW	Werkzeugwechsel

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Für den Anwender von Werkzeugmaschinen stehen Produktivität und Flexibilität der zum Einsatz gebrachten Fertigungssysteme mit an vorderster Stelle bei der Senkung der Stückkosten. Die stetige Steigerung der technischen wie organisatorischen Verfügbarkeit und die zunehmenden Leistungsmerkmale der Maschinen, wie Beschleunigung und Bahngeschwindigkeit, tragen hierzu bei (REINHART & DIESCH 1999). In diesem Zusammenhang ist es verständlich, dass die Beziehung zwischen dem Hersteller und dem Anwender von Werkzeugmaschinen in zunehmendem Maße von der gemeinsamen Lösung produktionstechnischer Aufgabenstellungen geprägt wird (REINHART & SCHNAUBER 1997).

Diese explizite Kundenorientierung seitens der Hersteller von Werkzeugmaschinen ist nicht nur im Bereich hochautomatisierter Fertigungseinrichtungen, z. B. bei Transferstraßen, zu erkennen. Flexible Fertigungssysteme wie Fräs-, Bohr- oder Drehbearbeitungszentren bedürfen aufgrund der gesunkenen Losgrößen und häufigen Produktwechsel der zu fertigenden Teile ebenfalls einer hohen Anpassungsfähigkeit an betriebsinterne Abläufe und Fertigungsverfahren (SCHMIDT & ZOHM 1999, KLOCKE U. A. 1999). Die früheren Bestrebungen zur vollautomatisierten und damit mannlosen Fabrik sind der Erkenntnis gewichen, dass eine durch Fachwissen, Kreativität und Verantwortungsbewusstsein geprägte Bedienung einer Maschine durch den Menschen gerade unter den Rahmenbedingungen des Standorts Deutschland den Anforderungen des globalisierten Wettbewerbs am Besten gerecht wird. Der direkte Umgang des Bedieners mit dem Fertigungssystem Werkzeugmaschine ist dabei hinsichtlich der Vorgabe von Abläufen wie auch deren Grenzen in wesentlichen Teilen durch die Sicherheitstechnik bestimmt (APFELD & UMBREIT 1999).

Es entspricht der menschlichen Erfahrung, dass der Umgang mit Werkzeugen und im Besonderen mit Maschinen Gefahren in sich birgt. So entwickelten sich bis zum heutigen Tag sicherheitstechnische Maßnahmen und Einrichtungen zu einem wesentlichen Aspekt bei der Herstellung und beim Betrieb von Maschinen. Zweifellos ist die sichere Gestaltung von Werkzeugmaschinen mit zusätzlichen Kosten verbunden. Bereits bei der Planung und Konstruktion ist der primäre Ansatz zur Vermeidung von Gefahren im späteren Betrieb der Maschine ein zentrales Konstruktionsprinzip (PAHL & BEITZ 1997). Überall dort, wo die Vermeidung von Gefahren nicht möglich ist, kommen ergänzende sicherheitstechnische Maßnahmen zum Einsatz. Nachdem an derartige Sicherheitseinrichtungen erhöhte Anforderungen bzgl. deren Wirksamkeit auch im

Fehlerfall gestellt werden, sind die Aufwände für die Realisierung hoch. Der Einsatz bewährter Bauelemente und Wirkprinzipien, die konstruktionsbedingte Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit selbst im Fehlerfall und Maßnahmen zur Fehlererkennung sind die Ursache für die parallele Entwicklung der sicherheitsrelevanten und der nicht-sicherheitsrelevanten Steuerungstechnik an spanenden Werkzeugmaschinen (BIROLINI 1997).

Die allgegenwärtige Notwendigkeit zur Kostensenkung bei der Herstellung von Fertigungssystemen befindet sich im Bereich der Sicherheitstechnik dabei in einem Spannungsfeld aus moralischen, rechtlichen, technischen und ökonomischen Gesichtspunkten. Die Senkung bereits erreichter Sicherheitsstandards ist gesellschaftspolitisch wie volkswirtschaftlich betrachtet außerhalb jeglicher Diskussion. Vielmehr ist in der Weiterentwicklung sicherheitstechnischer Maßnahmen durch die Umsetzung neuer Wirkprinzipien ein Ansatz zur Kostenreduzierung zu erkennen, der zudem den heutigen Stand an Wirksamkeit und Funktionalität überschreitet. Dies kommt der oben erläuterten Kundenorientierung des Werkzeugmaschinenherstellers und der stärkeren Einbeziehung des Bedieners in die Produktionstechnik entgegen.

Ein wesentliches Merkmal der Sicherheitstechnik ist es, dass eine weitreichende Trennung zwischen den entscheidenden und den von diesen Entscheidungen betroffenen Personen besteht. Während der Maschinenhersteller bzw. dessen Mitarbeiter innerhalb der Planung und Konstruktion die Gefahren der Maschine erfassen, bewerten und durch sicherheitstechnische Maßnahmen in ihrem Risiko reduzieren, ist es der Bediener beim Anwender der betreffenden Fertigungssysteme, welcher den Gefahren ausgesetzt ist. Der Gesetzgeber hat durch die EG-Maschinenrichtlinie und die damit verbundene Eigenzertifizierung durch den Maschinenhersteller einen großen Teil der Verantwortung für die sichere Gestaltung der Maschine in die Hände des Herstellers gelegt (EWG 1998). Diese Freiräume bei der Maschinenentwicklung gilt es im Hinblick auf eine Differenzierung gegenüber Wettbewerbern zu nutzen.

Fertigungsabläufe beim Anwender von Werkzeugmaschinen werden immer dann von Sicherheitseinrichtungen beeinflusst, sofern Belange des Personenschutzes betroffen sind. Dies ist um so häufiger der Fall, wenn prozess- oder fertigungsbedingt die Fachkenntnisse qualifizierter Maschinenbediener erforderlich sind. Ein restriktives Fernhalten des Bedieners vom Arbeitsraum bei Bewegungen der Maschine durch trennende Schutzeinrichtungen mag im ersten Augenblick zu einem wirksamen und gleichsam kostengünstigen Schutz des Bedieners führen. Die den täglichen Anforderungen der Maschinenbedienung entgegenstehenden sicherheitstechnischen Einrichtungen führen letztendlich aber zu rechtswidrigen Manipulationen, wie sie gerade an Schutztüren bzw. deren Überwachungseinrichtungen in der Praxis häufig zu beobachten sind. So

verkehrt sich die Zielsetzung eines möglichst umfassenden Personenschutzes in sein Gegenteil, indem Sicherheitseinrichtungen dauerhaft umgangen werden. Die damit verbundenen Gefahren sind gerade deshalb groß, da die gesamte zur Verfügung stehende Antriebsdynamik uneingeschränkt zum Schaden des Bedieners wie auch weiterer Personen im Umfeld der Maschine wirksam werden kann. Die Gefahr steigt zudem in dem Maße, wie die Leistungsfähigkeit moderner Werkzeugmaschinen im Zuge der technischen Weiterentwicklung zunimmt (PRITSCHOW U. A. 1999A).

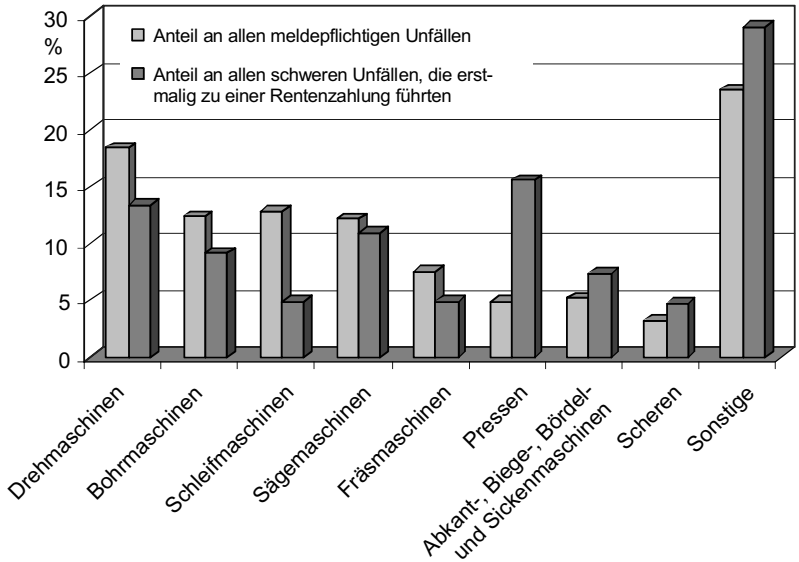

Bild 1.1: Unfälle an Maschinen der Metallbe- und -verarbeitung bei betrieblichen Tätigkeiten im Jahr 1993 (HVBG 1994)

Betrachtet man die statistische Auswertung der Unfallzahlen in metallverarbeitenden Betrieben, so stehen Schadensereignisse beim Umgang mit Pressen im Hinblick auf die Schwere der Verletzung und insbesondere spanende Werkzeugmaschinen in ihrer Gesamtheit in der Häufigkeit des Unfallgeschehens an vorderster Stelle. Der Umstand, dass im Jahr 1993 dabei in 73 % der Unfälle die oberen Gliedmaßen des Maschinenbedieners betroffen waren und dies wiederum in drei Viertel aller Unfälle beim Bedienen der Maschine geschah, verdeutlicht die von bewegten Maschinenelementen und Werkzeugen ausgehenden Gefahren (siehe Bild 1.1). Diesen Unfällen gilt es entgegenzuwirken.

1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist es, ein gesamtheitliches Sicherheitskonzept der Antriebs- und Steuerungstechnik für spanende Werkzeugmaschinen zu entwickeln, das den Schutzzielen der rechtlichen, gesellschaftlichen und moralischen Vorgaben in akzeptiertem Maße nachkommt und gleichzeitig den heutigen Anforderungen an den Einsatz von Fertigungssystemen gerecht wird. Durch den Einsatz sicherheitsrelevanter programmierbarer elektronischer Steuerungen und sicherer Antriebsfunktionen soll insbesondere die Durchführung aller fertigungsbedingter Bedienhandlungen unter Berücksichtigung der Gesichtspunkte des Personenschutzes ermöglicht werden. Im Sinne eines gesamtheitlichen Sicherheitskonzepts ist darüber hinaus die Übertragung sicherheitsrelevanter Daten im Maschinenfeld durch eine Erweiterung des Installationsstandards DESINA vorgesehen. Dabei soll der Hersteller spanender Werkzeugmaschinen unmittelbar von den erarbeiteten Ergebnissen einen Nutzen ziehen können. Dieser Nutzen soll sich gegenüber der konventionellen Sicherheitstechnik in geringeren Kosten, einer größeren Flexibilität hinsichtlich Anpassbarkeit und Erweiterbarkeit sowie nicht zuletzt in einer generellen Erhöhung des erreichten Sicherheitsniveaus aufgrund der besseren Wirksamkeit auszeichnen. Die Einordnung des Sicherheitskonzepts in bestehende Rechtsvorschriften und Normen sowie die Bereitstellung von Methoden und Werkzeugen zur Dimensionierung der sicherheitstechnischen Maßnahmen ist unter dem Gesichtspunkt einer hohen Praxisrelevanz ein wichtiges Ziel innerhalb dieser Arbeit.

1.3 Vorgehensweise

Um dieser Zielsetzung nachzukommen, wird folgende Vorgehensweise angewendet:

Kapitel 2 stellt den heutigen Stand der sicherheitstechnischen Einrichtungen an spanenden Werkzeugmaschinen dar. Die Bewertung dieser Lösungen erfolgt anhand der produktionstechnischen Randbedingungen, wie sie in Abschnitt 1.1 und 1.2 erläutert wurden. Daran schließt sich die Ableitung des Defizits aktueller Sicherheitstechnik im Bereich spanender Werkzeugmaschinen an.

Kapitel 3 spezifiziert aus der Zielsetzung dieser Arbeit und dem Defizit heutiger sicherheitstechnischer Einrichtungen die Anforderungen an ein gesamtheitliches Sicherheitskonzept der Antriebs- und Steuerungstechnik für Werkzeugmaschinen. Ein wesentliches Element dieser Spezifikation ist der praxisgerechte Einsatz von Fertigungssystemen unter Einbeziehung des Bedieners.

Die Ausarbeitung des Sicherheitskonzepts in den Bereichen der Betriebsarten auf Basis sicherer Antriebsfunktionen, der Bedienerschnittstelle, der Feldinstallation, der Steuerungsfunktionen und der Konstruktionsmethodik ist Gegenstand von *Kapitel 4*. Hierzu wird als Grundlage für die Auswahl sicherheitstechnischer Maßnahmen wie auch deren Dimensionierung die konstruktionsbegleitende Vorherbestimmung des sicherheitsrelevanten Verhaltens der NC-Antriebe mit Hilfe der Simulation in *Kapitel 5* eingeführt. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Modellbildung der Sicherheitskreise, die Durchführung der Berechnungen im Zeitbereich mit Hilfe der Simulationstechnik und die Integration des iterativen Vorgehens zur Auswahl bzw. Dimensionierung der sicherheitstechnischen Komponenten in den Konstruktionsprozess.

Kapitel 6 beschreibt die prototypische Umsetzung des gesamtheitlichen Sicherheitskonzepts der Antriebs- und Steuerungstechnik an einer dreiachsigen Fräsmaschine sowie an einem horizontalen vierachsigen Bearbeitungszentrum für die Bohr- und Fräsbearbeitung. Grundlegende messtechnische und konstruktive Untersuchungen zur Modellbildung der Antriebe unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten werden an einem zweiachsigen horizontalen Antriebsversuchsstand dargestellt.

Daran schließt sich eine technische und wirtschaftliche Bewertung des Sicherheitskonzepts in *Kapitel 7* an, bevor die Arbeit in *Kapitel 8* zusammengefasst wird und mit einem Ausblick endet.

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Einführung

Seit dem Beginn der Industrialisierung und dem damit verbundenen vermehrten Aufkommen von Gefahren im Umgang mit Maschinen gewinnen sicherheitstechnische Fragestellungen an Bedeutung (COMPES 1970). Mit der fortschreitenden gesellschaftlichen und ökonomischen Entwicklung steigen die umfassenden Anforderungen an den Schutz der Gesundheit, der Umwelt und des Eigentums (KUHLMANN 1995). Aus diesem Grund umspannt die Sicherheitstechnik ein sehr weites Feld, beginnend von der Konstruktion, dem Betrieb von technischen Systemen, den zum Einsatz kommenden Abläufen und Gefahrenstoffen zur Durchführung des jeweiligen Herstellungs- oder Fertigungsprozesses bis hin zu ergonomischen Aspekten (KAMMEN & HASSENZAHL 1999).

Die Darstellung des Stands der Forschung und Technik beginnt deshalb mit der Erläuterung der Begriffe und Methoden der Sicherheitstechnik, wie sie im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung gebracht werden (Abschnitt 2.2). Anschließend wird die Thematik der Sicherheitstechnik auf die spezifischen Anforderungen an spanenden Werkzeugmaschinen unter der Maßgabe einer sicheren Durchführung aller notwendigen Handlungen des Maschinenbedieners konzentriert (Abschnitt 2.3). Die rechtsverbindliche Festschreibung der Schutzanforderungen sowie verfahrenstechnische Ablaufstrukturen sind durch EG-Richtlinien, nationale und internationale Normen wie auch durch die Zuständigkeiten prüfender bzw. zertifizierender Institutionen gegeben (Abschnitt 2.4). Die zum Einsatz kommenden sicherheitstechnischen Maßnahmen zur Reduzierung der Gefährdungen lassen sich in mechanische (Abschnitt 2.5) und antriebs- bzw. steuerungstechnische Sicherheitsfunktionen (Abschnitt 2.6) einteilen. Die bislang betrachteten Ansätze einer Erhöhung der Sicherheit spiegeln sich in konstruktiven Merkmalen und Komponenten wider, die der Maschinenhersteller im Rahmen der Konstruktion, der Fertigung und Montage bis zur Inbetriebnahme des Fertigungssystems realisiert. Darüber hinaus setzt der sichere Betrieb einer Werkzeugmaschine auch organisatorische Maßnahmen beim Maschinenbetreiber voraus (Abschnitt 2.7), welche bereits zum Zeitpunkt der Maschinenkonstruktion zu berücksichtigen sind. Nicht zuletzt benötigt der Konstruktionsprozess von Maschinen unter Einbeziehung der sicherheitstechnischen Einrichtungen Methoden und Werkzeuge, die zur Reduzierung der Entwicklungszeiten und damit der Kosten wie auch zur Reduzierung des Entwicklungsrisikos beitragen (Abschnitt 2.8). Der Stand der Forschung und Technik schließt mit einer Zusammenfassung in Verbindung mit der Ableitung des