

***Forschungsberichte***

---

***iwb***

***Band 155***

***Hans Meier***

***Verteilte kooperative Steuerung  
maschinennaher Abläufe***

---

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

---

***Herbert Utz Verlag***

**UTZ**

# 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 2001

ISBN 3-8316-0044-9

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*

1	Einleitung .....	1
1.1	Ausgangssituation .....	1
1.2	Zielsetzung und Einordnung der Arbeit.....	4
1.3	Vorgehen im Rahmen der Arbeit .....	6
2	Stand der Forschung und Technik .....	9
2.1	Vorgehen in der Entwicklung von Werkzeugmaschinensteuerungen .....	9
2.2	Grundlegende Architekturkonzepte .....	11
2.2.1	Zentrale Steuerung mit dezentraler Ein-/Ausgabe.....	11
2.2.2	Hierarchisch organisierter Steuerungsverbund.....	12
2.2.3	Hierarchisch organisierter Steuerungsverbund mit direkter Synchronisation.....	14
2.2.4	Ausschließlich kooperativer Steuerungsverbund und Definition des verteilten, kooperativen Steuerungssystems .....	15
2.3	Einsatz verteilter, kooperativer oder hybrider Steuerungstechnik außerhalb des Werkzeugmaschinenbaus.....	17
2.3.1	Verteilte, kooperative Steuerungen bei Automobilen.....	18
2.3.2	Verteilte, kooperative Steuerungen bei Flugzeugen .....	19
2.3.3	Ansätze in der Forschung.....	19
2.4	Ansätze einer verteilten, kooperativen Steuerungstechnik im Werkzeugmaschinenbau .....	20
2.4.1	Verteilte Steuerungen bei Zuliefermodulen mit einfachsten Schnittstellenanforderungen .....	21
2.4.2	Verteilte Steuerungen bei komplexen, verketteten Werkzeugmaschinen .....	22
2.4.3	Ansätze in der Forschung.....	24
2.5	Kommerziell verfügbare Lösungen zum Aufbau verteilter, kooperativer Steuerungen.....	26
2.6	Zusammenfassung und Ableitung des Forschungsbedarfs .....	27
3	Potenzial- und Anforderungsanalyse .....	31
3.1	Potenziale der verteilten, kooperativen Steuerungstechnik .....	31

3.1.1	Potenziale der mechatronischen Modularisierung .....	31
3.1.2	Potenziale bei der Umsetzung komplexer Steuerungsaufgaben	32
3.1.3	Leistungspotenziale bei zeitkritischen Aufgaben .....	33
3.1.4	Kostenpotenziale in der Hardware.....	33
3.1.5	Integration von sicherheitsrelevanten Funktionen .....	34
3.2	Anforderungen .....	35
3.2.1	Effiziente Entwicklung .....	35
3.2.2	Geeignete Modellierungstechnik .....	37
3.2.3	Beherrschbarkeit in der Inbetriebnahme und im Betrieb.....	37
3.2.4	Vollständiger Funktionsumfang zur Steuerung von Werkzeugmaschinen .....	38
3.3	Zusammenfassung.....	39
4	Modellierungstechnische Grundlagen .....	41
4.1	Techniken zur Modellierung maschinennaher Abläufe.....	41
4.1.1	Modellierungstechniken der DIN-IEC 1131-3 .....	41
4.1.2	Kontrollstrukturen.....	43
4.1.3	Zustandsgraphen .....	44
4.1.4	Petrinetze.....	46
4.2	Objektorientierte Modellierungstechniken .....	52
4.2.1	Objektorientierte Begriffswelt .....	53
4.2.2	Unified Modeling Language (UML) .....	54
4.2.3	Real Time Object Oriented Modeling (ROOM).....	56
4.2.4	UML für reaktive Systeme (UML-RT) .....	58
4.3	Zusammenfassung und Auswahl .....	58
5	Konzept .....	61
5.1	Grundkonzeption.....	61
5.2	Vorgehen .....	63
5.3	Modellierungstechnik.....	64

5.3.1	Entwicklungsichten und Entwicklungswerkzeug.....	64
5.3.2	Funktionale Sicht .....	66
5.3.3	Topologische Sicht.....	73
5.3.4	Distributive Sicht .....	75
5.4	Planung der Softwareverteilung.....	78
5.4.1	Konzeption des Verteilungsverfahrens .....	78
5.4.2	Regelbasiertes Verteilungsverfahren .....	81
5.4.3	Schätzfunktion zur Beurteilung von Verteilungen .....	87
5.5	Systemsoftware für verteilte, kooperative Steuerungen .....	88
5.5.1	Abarbeitung der Steuerungssoftware.....	88
5.5.2	Transparente Kommunikation .....	89
5.5.3	Softwaremanagementfunktionen .....	90
5.5.4	Diagnosefunktionen .....	92
5.6	Zusammenfassung.....	93
6	Designkonzept der Systemsoftware.....	95
6.1	Grundlegende Designprinzipien .....	95
6.1.1	Softwaretechnische Abbildung colorierter Petrinetze .....	95
6.1.2	Ereignisorientierung.....	97
6.1.3	Multitaskingkonzept .....	98
6.1.4	Kommunikationsbündelung und -priorisierung.....	99
6.1.5	Synchronisation der Systemuhren .....	100
6.1.6	Portierbarkeit.....	102
1.2	Designkonzept der Systemsoftware .....	102
1.2.1	Schichten des Designkonzepts der Systemsoftware .....	103
1.2.2	Application Layer .....	104
1.2.3	Application Cooperation Layer .....	107
1.2.4	Message Management Layer .....	109

1.2.5	Communication Driver Layer .....	110
1.2.6	Input / Output Driver Layer .....	111
1.2.7	Tool Access Layer .....	112
1.2.8	Real Time Operating System Adaptor .....	113
1.3	Abbildung der Systemsoftwarefunktionen.....	114
1.3.1	Abarbeitung der Steuerungssoftware.....	114
1.3.2	Transparente Kommunikation .....	115
1.3.3	Softwaremanagementfunktionen .....	116
1.3.4	Diagnosefunktionen .....	118
1.4	Zusammenfassung.....	119
7	Anwendungsbeispiel und Bewertung .....	121
7.1	Aufbau der steuerungstechnischen Plattform .....	121
7.2	Anwendungsbeispiel .....	124
7.2.1	Einsatzumgebung.....	124
7.2.2	Schritte des Vorgehens .....	128
7.2.3	Einsatz an der simulierten Werkzeugmaschine .....	128
7.3	Bewertung .....	131
7.3.1	Erreichte Verbesserung der Leistungsfähigkeit der realen Werkzeugmaschine.....	131
7.3.2	Kostenabschätzung .....	132
7.4	Zusammenfassung.....	134
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	135
8.1	Zusammenfassung.....	135
8.2	Ausblick .....	136
9	Formelverzeichnis.....	139
10	Abkürzungsverzeichnis.....	141
11	Literaturverzeichnis .....	143

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Die Automatisierung von Produktionseinrichtungen hat für produzierende Unternehmen einen hohen Stellenwert erreicht. Dies liegt einerseits in wirtschaftlichen und technologischen Notwendigkeiten und andererseits in Aspekten der Arbeitserleichterung und der Risikoverminderung für den Menschen begründet (*Anker & Wirth 1994*). *Milberg (1997)* formuliert hierzu: „Komplexität und Individualität einerseits und die Forderungen nach Produktivität und Qualität andererseits machen innovative und flexible Automatisierung und Technisierung notwendig.“ Dies hat sich auch auf die Anbieter von Produktionsanlagen ausgewirkt, indem die Steuerungstechnik als Differenzierungsmerkmal gegenüber den Wettbewerbern heute einen entscheidenden Faktor darstellt. Dabei kommen einerseits der realisierten Funktionalität, der Leistungsfähigkeit und der Steuerungsstruktur besondere Bedeutung zu. Andererseits ist auf Restriktionen wie den Kostenrahmen oder spezifische Anwendervorschriften zu achten und gleichzeitig mit der rasanten Weiterentwicklung der Steuerungshardware Schritt zu halten (siehe Bild 1-1).

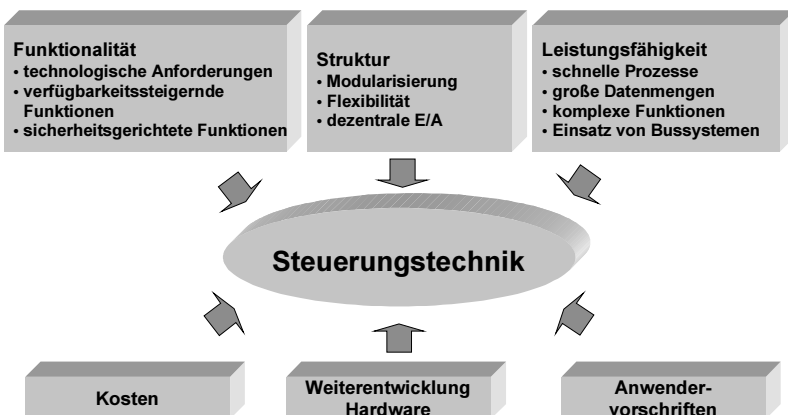


Bild 1-1: Einflüsse auf die Entwicklung von Steuerungen

Zu den vielfältigen, heute üblichen, technologisch bedingten Steuerungsfunktionen kommen inzwischen verfügbarkeitssteigernde Funktionen (Diagnose- und Fehlertoleranzfunktionen, *Reinhart u. a. 1999a*) und in jüngster Zeit auch ver-



## 1 Einleitung

---

mehrt sicherheitsgerichtete Funktionen (*Zeller 1999*) hinzu. Der Umfang der Steuerungsfunktionalität wie auch die Zahl der zu verarbeitenden Prozesssignale steigen folglich weiterhin rapide an. Dies wird insbesondere durch die Einführung diagnosefähiger Sensorik und Aktorik (*Schnell 1997*) noch verstärkt.

In Bezug auf die Leistungsfähigkeit einer Steuerung stellt die Zeit, mit der die Steuerung auf eine Änderung eines Prozesssignals zu reagieren vermag, die entscheidende Größe dar. Im allgemeinen ist für die Realisierung einer Vielzahl von Funktionen eine bestimmte Reaktionszeit sicher zu unterschreiten. In vielen Fällen übt die erreichbare Reaktionszeit auch einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der gesteuerten Maschine aus, wenn diese Reaktionszeiten wie beispielsweise beim Werkzeugwechsel in einem Fräsbearbeitungszentrum sich additiv auf die Span-zu-Span-Zeit auswirken.

Die rasante Entwicklung in der Mikroelektronik unterstützt zwar einerseits die Bestrebungen, niedrigere Kosten, eine höhere Leistungsfähigkeit und eine verbesserte Modularität zu ermöglichen. Andererseits wird dadurch aber auch eine ständige Veränderung von Modulen und Strukturen der steuerungstechnischen Hardware ausgelöst, mit der in der Entwicklung der Steuerungstechnik Schritt gehalten werden muss. Zusätzlich ist es durchaus auch üblich, dass durch den Maschinenanwender konkrete Steuerungshardwaremodule oder –strukturen vorgeschrieben werden. Damit kommt der Wiederverwendbarkeit der Steuerungssoftware auch bei unterschiedlichen Hardwaremodulen und –strukturen eine große Bedeutung zu.

Ebenfalls durch die Entwicklung in der Mikroelektronik, aber auch durch das Modularitätsbestreben getrieben findet im Werkzeugmaschinenbau dezentralisierte Installationstechnik zunehmende Verbreitung (*Wagner & Bürgel 1997*). Motivation hierfür sind Kostenvorteile, die in erster Linie durch geringere Installationskosten bei der Verkabelung und durch die standardisierungsbedingte Reduzierung von Montagefehlern entstehen (*Wagner 1995*). Darüber hinaus ergibt sich der Vorteil, dass mechanische Module solcher Produktionsanlagen, wie z. B. ein Werkzeugmagazin in einfacher Weise vollständig vorinstalliert werden können. Dadurch kann der Zeitaufwand bei der Installation und der Inbetriebnahme der Gesamtanlage erheblich reduziert werden. Eine Vorinbetriebnahme einschließlich Funktionstest von einzelnen Maschinenmodulen ist allerdings nur eingeschränkt möglich, da hierzu jeweils eine eigene, vollständige Teststeuerung programmiert werden müsste. Dementsprechend können die Module einer Gesamtanlage erst im Zuge der Gesamtinbetriebnahme getestet werden.

Nach dem derzeitigen Entwicklungsstand werden bei dezentraler Installationstechnik die im Maschinenfeld verteilten, meist binären E/A-Module (Eingangs-

(Ausgangsmodule) durch einen Feldbus an eine zentrale SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) angekoppelt, wobei sämtliche E/A-Informationen zyklisch zu dieser SPS übertragen werden müssen. Um dabei zu akzeptablen Reaktionszeiten zu kommen, müssen die Buslaufzeiten und SPS-Zykluszeiten für den gesamten E/A-Bereich gering gehalten werden, was zu einem verhältnismäßig hohen Hardwareaufwand für eine vergleichsweise geringe Anzahl zu verarbeitender Ereignisse führt.

Die bereits erwähnten E/A-Module zum Anschluss von Sensoren und Aktoren bieten bereits eine gute Basis zur Integration von Steuerungsfunktionalität und damit zur lokalen Datenverarbeitung. Durch diese Module ist bereits ein geeignetes Gehäuse mit entsprechenden Steckbuchsen, eine Stromversorgung sowie eine Platine mit einer Protokollauswertelogik vorhanden. Eine Erweiterung um einen kostengünstigen Prozessor zur Bearbeitung von Anwendungsprogrammen liegt daher nahe und wird bereits von einigen Herstellern angeboten (siehe Abschnitt 2.5).

In verschiedenen Bereichen des Maschinenbaus, in denen steuerungstechnische Fragestellungen zu lösen sind, sind dagegen Steuerungskonzepte, die auf verteilten, kooperierenden Steuerungen basieren, bereits etabliert. Nach diesem Konzept wird die Gesamtfunktionalität des Steuerungssystems durch einen Verbund von verteilten Modulsteuerungen abgebildet. Häufig wird dabei auch die notwendige Koordination der Modulsteuerungen durch deren kooperative Arbeitsweise anstatt durch spezielle, hierarchisch übergeordnete Koordinationssteuerungen sichergestellt. Als Beispiele seien hier Steuerungssysteme für Automobile und für Flugzeuge heraus gegriffen (siehe Abschnitt 2.3).

Eine verteilte, kooperierende Steuerungstechnik bietet auch im Werkzeugmaschinenbau vielfältige Potenziale, die im folgenden kurz umrissen sind. Eine eingehendere Betrachtung findet sich in Abschnitt 3.1.

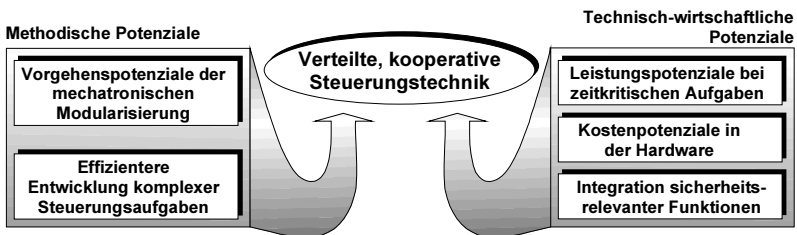


Bild 1-2: Übersicht über die Potenziale verteilter, kooperativer Steuerungstechnik im Bereich der Produktionsmaschinen.

Einerseits sind durch eine geeignete Entwicklungsmethode, die die Entwicklung der Steuerungsfunktionalität sauber von der Festlegung der Steuerungstopologie trennt, methodische Potenziale festzustellen. Ebenso bestehen Vorgehenspotenziale durch die Möglichkeit, vollständige, mechatronische Maschinenmodule zu entwickeln und so die Verflechtungen, die sich durch eine zentrale Steuerungstechnik ergeben, zu minimieren. Dabei bezeichnet der Begriff des mechatronischen Maschinenmoduls ein Modul, welches aus mechanischer, elektrischer und steuerungstechnischer Sicht ein vollständiges, in sich abgeschlossenes Teilsystem darstellt. Für die Steuerung interner Funktionen werden dabei keine externen Steuerungen benötigt. Mechatronische Module können zudem schon vor der Gesamtinbetriebnahme der Maschine getestet werden.

Andererseits bestehen durch die lokale Datenverarbeitung Leistungspotenziale bei zeitkritischen Aufgaben, die auch zur Kostensenkung in der steuerungstechnischen Hardware genutzt werden können. Zudem kann es durch die damit einhergehende Verschlanung der Zentralsteuerung ebenfalls zu Kosteneinsparungen kommen. Ein weiteres Potenzial liegt in der Integration bisher elektromechanisch realisierter, sicherheitsrelevanter Funktionen. Die Möglichkeit, beliebig Redundanz vorzusehen, stellt eine wichtige Voraussetzung für die steuerungstechnische Realisierung von Sicherheitsfunktionen dar, die bei verteilten, kooperativen Steuerungssystemen prinzipiell gegeben ist.

Verteilte, kooperative Steuerungen ist allerdings im Werkzeugmaschinenbau bisher aufgrund der Komplexität verteilter, kooperativer Funktionen nur schwer zu beherrschen. Der dazu nötige Entwicklungsaufwand kann hier anders als beispielsweise in der Automobilindustrie nicht auf hohe Stückzahlen umgelegt werden. Die im Werkzeugmaschinenbau üblichen Werkzeuge zur Steuerungsentwicklung sowie die aktuell verfügbaren Steuerungsmodule unterstützen speziell kooperative Ansätze nur sehr eingeschränkt. Daher können die oben aufgeführten Potenziale verteilter, kooperativer Steuerungen bisher im Werkzeugmaschinenbau kaum genutzt werden.

### 1.2 Zielsetzung und Einordnung der Arbeit

Die eingangs erläuterten Potenziale verteilter, kooperierender Steuerungskonzepte können nur mit einer auf die Anforderungen der Entwicklung maschinennaher Steuerungssoftware angepassten Entwicklungsmethodik und einer präzise darauf abgestimmten Steuerungstechnik nutzbar gemacht werden. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, eine solche Entwicklungsmethodik und eine entsprechende Steuerungstechnik zu entwickeln. Für die Entwicklungsmethodik sind folglich eine geeignete Vorgehensweise und eine anforderungsgerechte Mo-

dellierungstechnik zur Entwicklung verteilter Steuerungssoftware im Umfeld der Maschinenentwicklung zu erarbeiten. Daraus sind dann eine Steuerungsarchitektur und Konzepte für die Systemsoftware der Steuerungsmodule abzuleiten.

Zur Einordnung der Arbeit wird im folgenden der Betrachtungsbereich anhand der informationstechnischen Ebenen der rechnergeführten Produktion und anhand der bekannten Steuerungsarten genauer definiert.

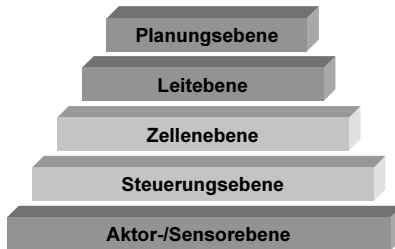


Bild 1-3: Informationstechnische Ebenen entsprechend Ottawa Report (1986)

Die rechnergeführte Produktion kann in verschiedene informationstechnische Ebenen eingeteilt werden (siehe Bild 1-3). Sowohl die Entwicklungsmethodik als auch die Steuerungstechnik sind diesem Schema entsprechend im Bereich der Steuerungsebene und in eingeschränkt der Zellenebene (im Bild hell hinterlegt) einzuordnen. Dabei ist die Steuerung einzelner Module der Steuerungsebene zuzurechnen, während Funktionen, die durch mehrere, kooperierende Module abgebildet werden, wie beispielsweise Funktionen des Werkzeughandlings oder der Auftragsdurchsetzung, auch Teil der Zellenebene sein können.

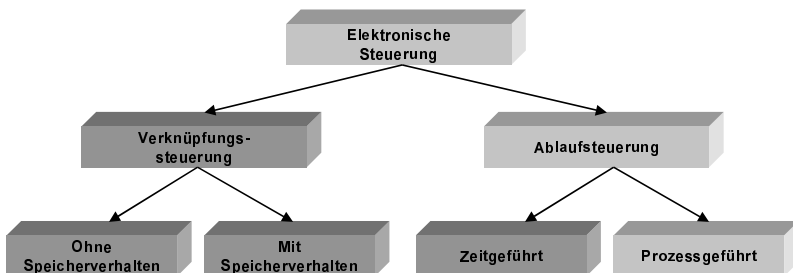


Bild 1-4: Einordnung der Arbeit anhand der Steuerungsarten nach DIN 19226-5 (1994).

Im Rahmen dieser Arbeit kommen insbesondere Funktionen der Maschinenperipherie in Betracht, da hier die Potenziale der verteilten, kooperativen Steuerungstechnik am deutlichsten zum tragen kommen. Solche Funktionen haben zumeist einen ablauforientierten Charakter. Dementsprechend betrifft die vorliegende Arbeit den Bereich der Ablaufsteuerungen. Durch die Beeinflussung des Steuerungsablaufes durch Sensorsignale kann im Sinne der *DIN 19226-5 (1994)* eine weitere Eingrenzung auf prozessgeführte Steuerungen vorgenommen werden (siehe hierzu Bild 1-4). Die NC-Technik, also die interpolierende Steuerung geregelter Achsen, wird dabei als in sich geschlossene Funktion innerhalb einer übergeordneten Ablaufsteuerung betrachtet und entsprechend hier nicht näher behandelt.

Hinsichtlich der betrachteten Maschinen liegt der Fokus dieser Arbeit auf Werkzeugmaschinen sowie auf Produktionseinrichtungen, die aus miteinander verkettenen Werkzeugmaschinen bestehen. Die erarbeiteten Ergebnisse erscheinen prinzipiell auch in anderen Bereichen des Maschinenbaus einsetzbar, sofern dort zum Werkzeugmaschinenbau vergleichbare Anforderungen vorliegen und sich die geforderten Steuerungsfunktionen entsprechen. Die Übertragbarkeit wird im Rahmen dieser Arbeit aber nicht näher untersucht.

### 1.3 Vorgehen im Rahmen der Arbeit

Zur Erreichung der dargestellten Ziele wird im Rahmen dieser Arbeit entsprechend Bild 1-5 vorgegangen.

Zunächst wird in Kapitel 2 der Stand der Technik bezüglich des Einsatzes verteilter Steuerungstechnik im Bereich der Werkzeugmaschinen erarbeitet. Dabei wird einerseits die Situation im Werkzeugmaschinenbau eingehend beleuchtet und andererseits ein Überblick über den Einsatz in anderen Anwendungsbereichen des Maschinenbaus gegeben. Zudem wird die Einbettung der Steuerungsentwicklung in den Entwicklungsprozess untersucht. Vor dem Hintergrund eines möglichen Einsatzes im Bereich der Werkzeugmaschinen wird darüber hinaus der durch die vorliegende Arbeit abgedeckte Forschungsbedarf begründet.

Kapitel 3 dient der detaillierten Analyse der Potenziale verteilter, kooperativer Steuerungstechnik sowie der Ermittlung der Anforderungen an die Entwicklungsmethode und die Steuerungstechnik. Bezüglich der Anforderungen steht die Erschließung der analysierten Potenziale und ein wirtschaftlicher Einsatz verteilter, kooperativer Steuerungen im Mittelpunkt.

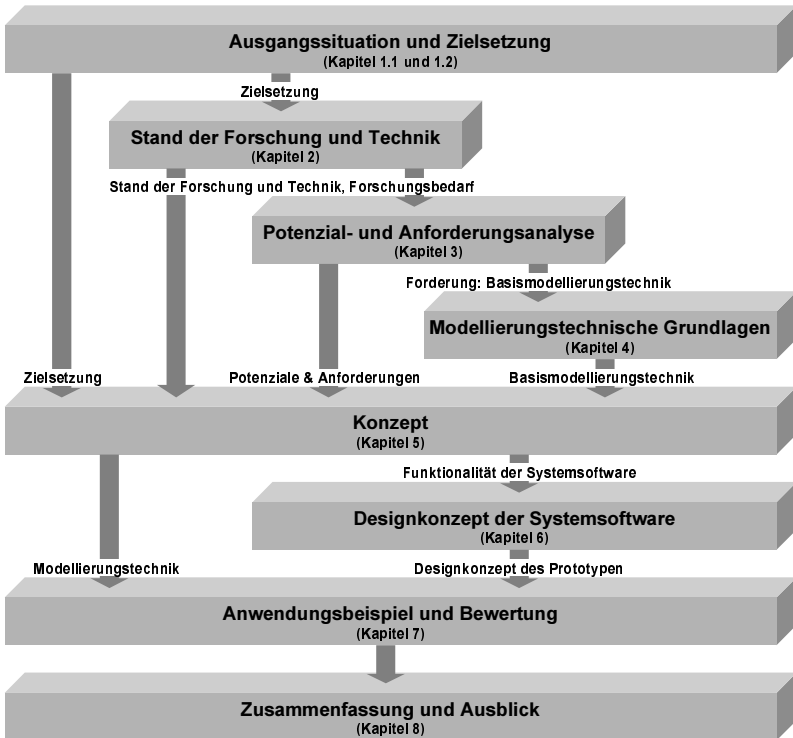


Bild 1-5: Vorgehen im Rahmen der Arbeit

In Kapitel 4 werden modellierungstechnischer Grundlagen, die zur Entwicklung des Konzepts in Kapitel 5 benötigt werden, gezielt erarbeitet. Dabei wird bereits eine Auswahl einer Modellierungstechnik als Basismodellierungstechnik für die Modellierung maschinennaher Abläufe durchgeführt.

Das Konzept für die verteilte, kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe wird dann in Kapitel 5 vorgestellt. Dabei wird zunächst ein Grundkonzeption für den Einsatz verteilter, kooperativer Steuerungstechnik zur Steuerung maschinennaher Abläufe entwickelt. Ausgehend von einem Konzept für die Vorgehensweise bei der Entwicklung solcher Steuerungen erfolgt die Erarbeitung einer darauf abgestimmte Modellierungstechnik. Aufbauend darauf wird unter Berücksichtigung technischer Anforderungen ein Konzept für die Systemsoftware solcher Steuerungssysteme entwickelt. Darüber hinaus wird ein einfaches Verfahren zur Verteilung der Steuerungssoftware vorgestellt.

## **1 Einleitung**

---

Darüber hinaus wird in Kapitel 6 ein Designkonzept für die Systemsoftware verteilter, kooperativer Steuerungen erarbeitet. Dieses Designkonzept dient einerseits als Basis für die prototypische Realisierung solcher Steuerungsmodule im Rahmen dieser Arbeit, kann aber andererseits auch als Leitlinie für eine kommerzielle Entwicklung verwendet werden.

Die praktische Einsetzbarkeit der entwickelten Methode sowie die prinzipielle Funktionsfähigkeit der technischen Konzepte werden in Kapitel 7 anhand einer beispielhaften Lösung einer Steuerungsaufgabe in einem Anwendungsbeispiel auf Basis einer prototypischen Realisierung des konzipierten Steuerungssystems nachgewiesen. Basierend auf den Erfahrungen bei der beispielhaften Lösung einer Steuerungsaufgabe wird dann eine Bewertung der vorgeschlagenen Konzepte verteilter, kooperierender Steuerungssysteme durchgeführt.

Kapitel 8 fasst die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf künftige Arbeitsfelder.