

DISS. ETH Nr. 19208

Wandelbarkeit in der Serienfertigung durch rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

THOMAS LORENZER

Dipl.-Ing. Univ. Ingénieur ECP

geboren am 15. Februar 1978

von Deutschland

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. K. Wegener, Referent

Prof. Dr. P. Hora, Korreferent

2010

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IWF/inspire der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Konrad Wegener, dem Leiter des IWF/inspire und Betreuer meiner Arbeit. Die intensiven Diskussionen mit ihm waren inspirierend und sehr förderlich für die Bearbeitung des Themas. Herrn Prof. Dr. Pavel Hora danke ich für die Übernahme des Korreferats und die kritische Durchsicht der Arbeit.

Für die tatkräftige Unterstützung beim Bau der Prototypmodule bedanke ich mich bei Albert Weber und Sandro Wigger aus der mechanischen Werkstatt. Ohne sie hätte der praktische Teil dieser Arbeit nicht in dieser Form durchgeführt werden können.

Meinen Institutskollegen danke ich für die fachliche Unterstützung mit ihrem Wissen aus verschiedensten Bereichen, das bei der Bearbeitung eines so weit gefächerten Themas erforderlich ist. Speziell bedanke ich mich bei Herrn Dr. Sascha Weikert, der durch seine Erfahrung auf den Gebieten der Modellierung und Simulation sowie der Messtechnik wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Herrn Lukas Weiss danke ich für die anregenden Diskussionen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

Auf dem Gebiet der Steuerungs- und Regelungstechnik waren die Ratschläge von Prof. Dr. Oliver Zirn für mich sehr wertvoll, vielen Dank dafür. Bei der Siemens Schweiz AG, insbesondere den Herren Detlef Engel, Hans Menzi, Guido Staubli und Andreas Leutwyler bedanke ich mich für die Unterstützung in Form von Hardware und technischem Support.

Diese Arbeit läge nicht in der heutigen Form vor ohne die Beiträge durch studentische Arbeiten und hilfswissenschaftliche Tätigkeit. Für ihren Einsatz danke ich den Herren David Hampl, Simon Treis, Peter Hess, Markus Häfner, Marcel Friedli, Marcel Lippmann, Lorenz Käser und Simon Dähler.

Meine Eltern haben mich während meiner gesamten Ausbildung stets unterstützt, wofür ich ihnen sehr dankbar bin. Mein ganz besonderer Dank geht an meine Frau Julie, die während der vergangenen Jahre in vielen Stunden auf meine Präsenz verzichten musste, mir stets moralisch beistand und mich motivierte.

Basel, im November 2010

Thomas Lorenzer

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VI
Zusammenfassung	IX
Abstract	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Einführung in die Thematik	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Stand der Technik	6
2.1 Begriffsklärung	6
2.1.1 Flexibilität	7
2.1.2 Rekonfigurierbarkeit	9
2.1.3 Modularität	12
2.1.4 Umrüstbarkeit	14
2.1.5 Wandelbarkeit	14
2.1.6 Komplexität	15
2.2 Übersicht der Fertigungssysteme	17
2.3 Maschinenentwicklung	20
2.3.1 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme	20
2.3.2 Ebenen des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine	21
2.3.3 Designkonzept	22

2.4	Maschinentechnik	22
2.4.1	Mechanik	22
2.4.2	Elektrik und Installationstechnik	23
2.4.3	Elektronik und Steuerungstechnik	24
2.4.4	Beispiele für rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen	26
2.5	Entwicklungswerkzeuge	28
2.5.1	Starrkörpersimulation	28
2.5.2	Finite-Elemente-Methode	29
2.5.3	Integrierte und mechatronische Entwicklungswerkzeuge	30
2.6	Maschineninbetriebnahme	31
2.6.1	Virtuelle Inbetriebnahme	31
2.6.2	Inbetriebnahme von Serienmaschinen	32
2.6.3	Inbetriebnahmeregeln	32
2.7	Zielsetzung der Arbeit	33
3	Einsatzszenario	35
3.1	Charakterisierung von Werkzeugmaschinenklassen	35
3.1.1	Betrachtete Werkzeugmaschinenklassen	35
3.1.2	Merkmale zur Beschreibung von Werkzeugmaschinen	37
3.1.3	Charakterisierung der Maschinenklassen	43
3.1.4	Analyse der Unterschiede zwischen den Maschinenklassen	45
3.2	Wertschöpfung	47
3.3	Kostenstruktur und Einflussfaktoren	48
3.3.1	Kostensätze	50
3.3.2	Zeit	54
3.3.3	Sonstige Kosten	55
3.4	Einsatz rekonfigurierbarer Werkzeugmaschinen	56
3.4.1	Bestimmung kritischer Faktoren	56
3.4.2	Ableitung von Fertigungsszenarien	57
3.4.3	Exemplarische Kostenrechnung	59
3.4.4	Abgrenzung des Einsatzgebiets	65

4	Virtuelle Maschine	66
4.1	Modellierung	66
4.1.1	Sinn und Zweck der Modellierung	68
4.1.2	Methodik	70
4.1.3	Aufbau des mechatronischen Maschinenmodells	88
4.2	Analyse	95
4.2.1	Analysemöglichkeiten	96
4.2.2	Auswertung	100
5	Entwicklung einer rekonfigurierbaren Werkzeugmaschine	106
5.1	Anforderungen	106
5.1.1	Anwenderumfrage	107
5.1.2	Betriebsanforderungen	111
5.2	Maschinenkonzept	114
5.2.1	Modularer Aufbau	114
5.2.2	Schnittstellen	116
5.3	Bestandteile der Maschine	119
5.3.1	Maschinengrundkörper	120
5.3.2	Maschinenmodule	121
5.3.3	Steuerung	129
5.3.4	Peripherie	132
5.4	Verifikation der Moduleigenschaften	133
5.4.1	Durchgeführte Analysen	133
5.4.2	Auswertung und Abgleich der Modulmodelle	136
5.5	Konstruktionsrichtlinien	146
6	Rekonfigurierung einer Maschine	149
6.1	Ableiten der Steuerungskonfiguration	149
6.1.1	Werkzeuge	150
6.1.2	Vorgehen	154
6.2	Umbau	156

6.2.1	Umbau der Mechanik	156
6.2.2	Konfigurierung der Maschinensteuerung	157
6.2.3	Feineinstellung der Maschine	158
6.3	Verifikation der Rekonfiguration	159
6.3.1	Untersuchte Konfigurationsvarianten	159
6.3.2	Durchgeführte Analysen	160
6.3.3	Auswertung der Messungen	161
6.3.4	Erkenntnisse aus den Rekonfigurierungen	171
7	Abschluss	173
7.1	Fazit	173
7.2	Ausblick auf weiterführende Forschungsarbeiten	176
A	Objekte im Datenmodell	180
B	Fragebogen zur Anwenderumfrage	183
C	Lastenheft für RekoWeMa-Module	192
D	Universal-Maschinenbett für RekoWeMa	195
E	Vergleichstabelle NC-Steuerungen	199
F	Spezifikation der Messmittel	201
G	Messprogramme	203
H	Bestimmung der Messunsicherheit	207
I	Auswertung der Komponentenabweichungen	209
J	Geometrische Prüfung verschiedener Konfigurationen	216
	Glossar	219
	Literaturverzeichnis	224

Nomenklatur

a	[m/s ²]	Beschleunigungsvektor
A	[CHF]	Anschaffungskosten
A_{spez}	[CHF]	spezifische Anschaffungskosten
A	[.]	System- oder Zustandsmatrix
A_(n×m)	[-]	Matrix A mit n Zeilen und m Spalten
B	[.]	Steuer- oder Eingangsmatrix
c	[m]	Beobachtungswirkvektor
C	[.]	Ausgangs- oder Beobachtungsmatrix
c_v	[-]	Proportionalitätskonstante der Taylorgleichung
δ_μ	[-]	Schaltvariable für die Art des Messsystems
d	[-]	1. Anzahl der Antriebe
	[Ns/m]	2. Dämpfungswert
D	[-]	Relative Dämpfung der Messsystemankopplung
D	[Ns/m]	1. Dämpfungsmatrix
	[.]	2. Durchgangsmatrix
D_N	[a]	1. Nutzungsdauer
	[-]	2. Nenner-Dämpfung
D_Z	[-]	Zähler-Dämpfung
F	[m ²]	Maschinenfläche
F	[N]	Kraftvektor
f_N	[Hz]	Nenner-Eigenfrequenz
F_v	[-]	Faktor der Geschwindigkeitsvorsteuerung
f_Z	[Hz]	Zähler-Eigenfrequenz
h_s	[m]	Spindelsteigung
I	[kgm ²]	Massenträgheitsmoment
J	[kg m ²]	Trägheitsmoment (rotatorische Trägheit)
J_L	[kg m ²]	Lastträgheit
J_M	[kg m ²]	Motorträgheit
κ	[1/s]	skalierte Proportionalverstärkung
k	[-]	Exponent der Steigung der Taylorgerade
k_E	[CHF/kWh]	Energiekostenfaktor

\mathbf{k}	[-]	Beobachtungskinematikvektor
K	[N/m]	Steifigkeitswert
\mathbf{K}	[N/m]	Steifigkeitsmatrix
K_F	[CHF]	Fertigungskosten
K_L	[CHF]	Lohn- und Lohnnebenkosten
K_{LH}	[CHF]	Lohn- und Lohnnebenkosten pro Stunde
K_M	[CHF]	Maschinenkosten
K_{MH}	[CHF]	Maschinenstundensatz
K_p	[Nms/rad]	Geschwindigkeitsregelverstärkung
K_{pi}	[V/A]	Stromregelverstärkung
K_{px}	[m/min/mm]	Lageregelverstärkung (= K_v)
k_R	[CHF/m ²]	Raumkostenfaktor
k_{UH}	[CHF/h]	Unterhaltskostensatz pro Stunde
K_v	[m/min/mm]	Lageregelverstärkung (= K_{px})
K_W	[CHF]	Werkzeugkosten
K_{WM}	[CHF]	Werkzeugkosten pro Standmenge
K_x	[CHF]	Rest-Fertigungsgemeinkosten
λ	[-]	Trägheitsverhältnis
m	[CHF]	1. Auftragsmenge
	[-]	Anzahl der Eingangsgrößen
M	[CHF]	1. Standmenge
	[kg]	2. Körpermasse
\mathbf{M}	[kg]	Massenmatrix
n	[-]	Anzahl der Zustandsgrößen
\mathbf{N}	[m/N]	Nachgiebigkeitsmatrix
n_{WM}	[CHF]	Anzahl benötigter Werkzeugsätze für die Bearbeitung der Auftragsmenge: $\frac{m}{M}$
ω_0	[1/s]	Kritische Eigenfrequenz des mechanischen Antriebsstrangs
ω_{0m}	[1/s]	Kritische Eigenfrequenz des elastisch gekoppelten Messsystems
p	[-]	Zinssatz
P_{eff}	[kW]	effektive Maschinenleistung
R	[Ω]	Wicklungswiderstand im Motor
\mathbf{R}	[m]	Bezugsmatrix
LK^S	[m]	Position des Lesekopfs
SM^S	[m]	Position der Spindelmutter
r	[-]	Anzahl der Ausgangsgrößen
θ	[kg]	Masse (translatorische Trägheit)
T	[s]	1. Auftragszeit
	[s]	2. Ersatzzeitkonstante des stromgeregelten Antriebs
t_b	[s]	Brachzeit

Nomenklatur

T_{bB}	[s]	Belegungszeit des Betriebsmittels
t_e	[s]	Zeit je Einheit
T_E	[h/a]	Einsatzzeit
$T_{E,eff}$	[h/a]	effektive Einsatzzeit
t_{eB}	[s]	Betriebsmittelzeit je Einheit
t_{el}	[s]	elektrische Zeitkonstante des Motors
t_{er}	[s]	Erholungszeit
t_g	[s]	Grundzeit
t_{gB}	[s]	Betriebsmittelgrundzeit
t_h	[s]	Hauptnutzungszeit
t_n	[s]	Nebennutzungszeit
T_n	[ms]	Geschwindigkeitsnachstellzeit
T_{ni}	[ms]	Stromreglernachstellzeit
t_r	[s]	Rüstzeit
t_{rB}	[s]	Betriebsmittelrüstzeit
t_{reko}	[s]	Rekonfigurierzeit
t_{rekoB}	[s]	Betriebsmittelrekonfigurierzeit
T_S	[min]	Standzeit
t_t	[s]	Tätigkeitszeit
t_v	[s]	Verteilzeit
T_v	[s]	Abtastzeit des Lageregelkreises
t_{vB}	[s]	Betriebsmittelverteilstzeit
t_w	[s]	Wartezeit
\mathbf{u}	[.]	Eingangsvektor
\mathbf{v}	[m/s]	Geschwindigkeitsvektor
\mathbf{V}	[m]	Verlagerungsvektor
v_c	[m/min]	Schnittgeschwindigkeit
\mathbf{x}	[m]	1. Positionsvektor
	[.]	2. Zustandsvektor
\mathbf{y}	[.]	Ausgangsvektor
z_{er}	[s]	Erholzeitfaktor
z_v	[s]	Verteilzeitfaktor

Zusammenfassung

Diese Arbeit zeigt eine durchgängige Methodik für den Einsatz rekonfigurierbarer Werkzeugmaschinen in der Serienfertigung auf. Dies umfasst eine wirtschaftliche Betrachtung von Einsatzszenarien sowie den praktischen Nachweis der Machbarkeit anhand eines realisierten Prototyps.

Die Globalisierung und der Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt haben die Rahmenbedingungen für Fertigungsunternehmen grundlegend verändert. Die Auswirkungen beeinflussen unmittelbar die Wirtschaftlichkeit von Fertigungssystemen. Um unter diesen Bedingungen dennoch rentabel produzieren zu können, werden wandelbare Fertigungsmittel benötigt, deren Betriebspunkt sich über einen weiten Bereich einstellen lässt. Rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen lassen sich auch an unvorhergesehene Anforderungen anpassen, sie sind daher ein Schlüsselement für Wandelbarkeit in der Serienproduktion.

Zusammen mit dem Stand der Technik liefert diese Arbeit Definitionen für themenrelevante Begriffe, die bislang sehr diffus verwendet werden. Die Durchsicht der Literatur zeigt, dass sich die Forschung über Rekonfigurierbarkeit bisher auf die Fertigungssystemebene konzentriert hat, wo organisatorische und fabrikplanerische Themen überwiegen. Auf Maschinenebene wurden einzelne Aspekte untersucht, nie jedoch ein durchgängiges Konzept. Die einzigen realisierten Prototypen weisen keine modulare Bauweise auf, wie sie für rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen im Sinne dieser Arbeit erforderlich wäre.

Anhand einer detaillierten Untersuchung der Charakteristika verschiedener Arten von Werkzeugmaschinen sowie einer Analyse der Einflussparameter auf die Stückkosten werden kritische Faktoren für den wirtschaftlich vorteilhaften Einsatz rekonfigurierbarer Werkzeugmaschinen bestimmt. Die Stärke rekonfigurierbarer Werkzeugmaschinen liegt in kurzen Taktzeiten und niedrigen Maschinenstundensätzen bei Stückzahlen, die keine Volllastung einer Sondermaschine erlauben.

Zur Untersuchung von Konfigurationsvarianten wird eine auf einem angepassten Starrkörperansatz basierende Modellier- und Simulationsumgebung vorgestellt, in der aus vordefinierten Modulmodellen auf effiziente Weise mechatronische Maschinenmodelle erstellt werden können. Zur Ableitung der zugehörigen Konfiguration der Maschinensteuerung (NC und PLC) wird ein durchgängiger Weg aufgezeigt.

Ein auf Modulen basierendes Konzept für rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen wird erläutert. Die Konstruktion der daraus hervorgegangenen Prototypmodule sowie die Ergebnisse der anschließenden messtechnischen Untersuchung werden besprochen.

An zwei Maschinenkonfigurationen wird der Nachweis erbracht, dass die vorgeschlagene Rekonfigurierungsmethodik in der Praxis funktioniert. Das Vorgehen zur Generierung der benötigten Steuerungskonfigurationen wird erläutert. Die messtechnische Untersuchung der Maschinenkonfigurationen zeigt bei den geometrischen Prüfungen sehr gute Wiederholbarkeit. Der Vergleich des berechneten Frequenzverhaltens mit dem experimentell bestimmten Frequenzverhalten weist ebenfalls sehr gute Übereinstimmung auf. Die Simulation der dynamischen Eigenschaften im Zeitbereich (Bahnabweichungen wie z.B. Crosstalk) liefert qualitativ vergleichbare Ergebnisse zu den Messungen. Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Modellierung des Antriebsstrangs, insbesondere zur Abbildung steuerungsspezifischer Effekte, um auch quantitativ korrekte Ergebnisse zu erhalten.

Abstract

This dissertation presents a consistent methodology for the use of reconfigurable machine tools in series production. A consideration from an economical point of view as well as a practical proof of concept by means of a self developed prototype machine are comprised. Due to globalisation and the shift from seller's to buyer's markets the general conditions in manufacturing industry undergo a considerable change. This has a direct impact on the profitability of manufacturing systems. For profitable production under these conditions, changeable manufacturing systems are needed whose operating point is adjustable in a wide range. Reconfigurable machine tools can be adapted even to unforeseen requirements which makes them a key element for changeability in series manufacturing.

Combined with the state of the art, this work provides definitions for relevant terms whose meaning is still fuzzy in today's use. The literature review shows that most research on reconfigurability focuses on the manufacturing system level where organisational aspects and factory lay-out planning are predominant issues. On machine level, only selected matters have been investigated but a consistent concept has never been established. The few realised prototype machines do not feature modular design, which would be a requirement for reconfigurable machine tools according to this work.

The critical factors for an economically advantageous application of reconfigurable machine tools are deduced on the one hand from a detailed analysis of the characteristics of different types of machine tools and on the other hand from the influence of different parameters on the piece cost. The strength of reconfigurable machine tools lies in short cycle times and low machine-hour rates occurring in case of production quantities that are insufficient for the use of special purpose machinery.

For the analysis of configuration variants, a modelling and simulation environment is presented. It is based on an adapted rigid body approach and offers the possibility to build mechatronic machine models efficiently, using predefined module models. A consistent way is shown to derive the corresponding configuration of the machine control (NC and PLC).

A module based concept for reconfigurable machine tools is illustrated. The design of the arising prototype modules as well as the results of the subsequent metrological investigation are discussed.

The proof of concept for the proposed reconfiguration methodology is provided by its application to two machine configurations. The procedure for generating the required control configurations is explained. The metrological investigation of the machine configurations reveals very good repeatability for the geometric tests. The comparison of the calculated and the experimentally identified frequency behaviour coincides very well, too. The simulation of the dynamic properties in the time domain (path deviations such as cross talk) provides results that are qualitatively comparable to the measurements. In order to obtain quantitatively correct results further research is needed on the modelling of the drive train, especially for the emulation of control specific effects.

1 Einleitung

Rekonfigurierbarkeit als spezieller Aspekt der Flexibilität und ihre fertigungstechnische Verkörperung, die rekonfigurierbare Werkzeugmaschine, werden bis heute hauptsächlich in der Forschung behandelt. In der vorliegenden Arbeit wird erörtert, was man darunter versteht und welche Rolle sie künftig für die Wettbewerbsfähigkeit der Fertigungs- und auch der Werkzeugmaschinenindustrie spielen können.

1.1 Motivation

Die Globalisierung sowie der Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt stellen eine grosse Herausforderung für Unternehmen dar [148]. Früher entwickelten sie Produkte für ihren Heimatmarkt und verkauften diese nur dort. Heute vergleichen gut informierte Kunden vor ihrer Kaufentscheidung Angebote aus der ganzen Welt. Damit sind auch die Ansprüche an die Qualität und ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis markant gestiegen.

Viele Unternehmen reagierten auf diese verschärften Bedingungen mit der Verlagerung von Teilen der Produktion in Niedriglohnländer. Mangelndes Prozesswissen und Vernachlässigung von Qualitätsaspekten führten dort zu Kosten, die oftmals die erhofften Einsparungen an Lohnkosten überstiegen, und verursachten Vertrauens- und Imageverluste.

Bleibt das Qualitätsniveau am neuen Fertigungsstandort zu niedrig und lassen sich die erwarteten Kosteneinsparungen nicht realisieren, so folgt die Rückverlagerung der Produktion [51, 95]. Das bedeutet aber auch, dass andere Ansätze benötigt werden, um die erwähnten Ansprüche erfüllen und somit auf dem Markt bestehen zu können.

Rahmenbedingungen der Serienproduktion

Bei eingehender Beschäftigung mit den Rahmenbedingungen in der Serienproduktion, lassen sich zwei Sätze von Einflussgrössen identifizieren, die sich entgegengesetzt entwickeln (s. Bild 1.1): Einerseits Grössen, die sich auf einen abnehmenden Zeithorizont bei der Planung zurückführen lassen. Andererseits solche, die Effizienzsteigerungen in der Produktion mit allen vor- und nachgelagerten Abläufen bedingen.



Bild 1.1: Gegenüberstellung von Einflussgrößen, deren Änderung die Rahmenbedingungen der Serienproduktion geprägt hat. Die abnehmende Planungssicherheit erfordert neue Lösungsansätze mit neuartigen Produktionsmitteln.

Die Stückzahlen für Aufträge an Betriebe mit spanender Fertigung sind kleiner geworden und dieser Trend wird anhalten. Mögliche Ursachen sind die sinkende Nachfragesicherheit – ein Auftrag wird dann in kleinere, zeitlich gestaffelte Teilaufträge zerlegt –, die Erhöhung der Variantenzahl, womit die Auftragsmenge jeder einzelnen Variante sinkt, oder Änderungen am Produkt, woraufhin ein bestehender Auftrag vorzeitig beendet und für das modifizierte Teil ein neuer Auftrag gestartet wird. Die zunehmende Individualisierung von Produkten führt zu variantenreicher Fertigung, im Extremfall bis zu Aufträgen mit Losgrösse 1. Die abnehmende Innovationszyklusdauer zwingt die Unternehmen, in immer kürzeren Zeitintervallen neue Produkte auf den Markt zu bringen [12]. Sie zwingt die Unternehmen aber auch, mit neuen Technologien zu arbeiten, die eine bestehende Produktion infrage stellen können; ein Auftragsabbruch kann die Folge sein. All diese Bedingungen führen tendenziell zu kleineren Auftragsmengen für ein betrachtetes Teil, wobei die Gesamtmenge an produzierten Teilen durchaus zunehmen kann.

Der Komplexitätsgrad der zu fertigenden Teile steigt kontinuierlich an; die Fertigbearbeitung in einer Aufspannung auf teuren, hochtechnisierten Mehrachs-Bearbeitungszentren ist eine Reaktion darauf. Jährliche Einsparungen über vertraglich fixierte Ratios sind gerade in der Serienfertigung im Automotive-Sektor üblich, was zu einem permanenten Rationalisierungsdruck führt. Hinzu kommen ausserplanmässige Kostensenkungsprogramme mit weiteren Zugeständnissen. Abnehmende Planungssicherheit ist die unmittelbare Folge, so dass sich eine gewinnbringende Fertigung immer schwieriger gestaltet.

Nicht nur grosse Serien- und Massenfertigungsbetriebe haben mit diesen Rahmenbedingungen zu kämpfen. Tendenziell sind kleine und mittlere Unternehmen (KMU) mit Lohnfertigung für kleine und mittlere Seriengrößen davon sogar stärker betroffen. In den vergangenen Jahren sind die Laufzeiten für Aufträge an kleine und mittlere Fertigungsbetriebe zum Teil erheblich kürzer geworden. Der Wunsch, Maschinen hinsichtlich der Produktionskapazität und des Werkstückspektrums anpassen zu können, deutet auf schwankende Stückzahlen, unsichere Planungsgrundlagen und variantenreiche Fertigung hin [65].

Problematik der Fertigungssystemplanung

Die Auslegung eines Fertigungssystems nach der Kammlinie, einer über lange Zeit konstanten Ausbringungsmenge, ist heute nur noch selten sinnvoll. Durch die unsicheren Absatzprognosen lässt sich weder die Lage der Kammlinie noch ihre Dauer seriös angeben (Bild 1.2). Das Verhältnis von Anlauf- und Auslaufphase zur stationären Ausbringungsphase erreicht teilweise extrem ungünstige Werte nahe 1. Daraus erwächst der Wunsch nach Fertigungssystemen, die sich an den jeweiligen Bedarf eines Unternehmens anpassen lassen. Heutzutage werden in diesem Fall meist flexible Fertigungszentren, teilweise auch miteinander verkettet, eingesetzt. Doch auch diese Lösung ist oft nicht optimal.

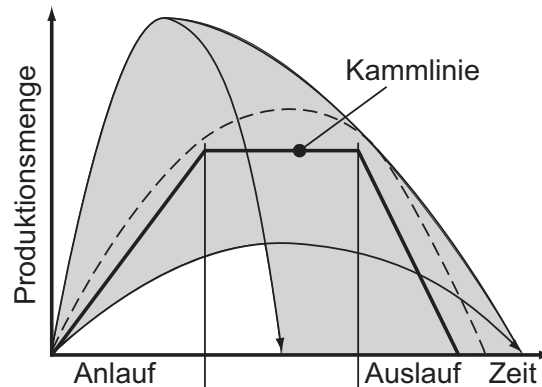


Bild 1.2: Die Auslegung von Produktionsanlagen nach der erwarteten Lebenszykluskurve ist aufgrund unsicherer Planungsdaten oftmals nicht zweckmässig

Sollen Industrieunternehmen aus Hochlohnregionen in Zukunft weiterhin Spitzenpositionen einnehmen, dann benötigen sie auch neue Fertigungskonzepte, die unter den geschilderten Randbedingungen eine konkurrenzfähige Produktion erlauben. Unternehmen, die sich allein auf die Produktentwicklung fokussieren, ohne jedoch die erforderliche Fertigungskompetenz zu besitzen, werden langfristig nicht auf dem Markt bestehen. Das Aufholen eines Technologievorsprungs der Konkurrenz in der Fertigung erfordert weitaus mehr Zeit als das Aufholen eines Technologievorsprungs bei einem Produkt. Nur wenn

Produktion und Entwicklung eng verzahnt sind, können innovative Produkte mit innovativen Verfahren hergestellt werden. Industrieunternehmen mit Produktionsstandorten in Hochlohnregionen können konkurrenzfähig bleiben, wenn sie ihre Produktion rechtzeitig so gestalten, dass diese innerhalb der neuen Rahmenbedingungen immer wieder schnell einen optimalen Betriebspunkt erreicht. Rekonfigurierbare Fertigungssysteme und rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen sind ein vielversprechender Lösungsansatz dafür.

1.2 Einführung in die Thematik

Produktionsunternehmen mussten sich in der neueren Vergangenheit verstärkt mit Aspekten wie Flexibilität, Anpassungsfähigkeit, Wandlungsfähigkeit und Agilität auseinandersetzen. Diese Begriffe beziehen sich auf verschiedene Unternehmensebenen, ihre Bedeutung variiert dabei von strategisch [80] über betriebsorganisatorisch [146] bis betriebsmittelcharakteristisch [106]. Mit der Rekonfigurierbarkeit wird nun ein weiterer Begriff eingeführt, der seinen eigenen Platz in diesem Begriffsrastrer beansprucht.

Losgelöst von jeglichem Kontext bezeichnet das Wort „Rekonfigurierbarkeit“ lediglich die Möglichkeit, ein System *wieder* zu konfigurieren, es also mehr als einmal zu konfigurieren. Bezogen auf Werkzeugmaschinen (WZMn), ergibt sich eine Vielzahl an Deutungsmöglichkeiten, die auf verschiedene Aspekte wie zum Beispiel Maschinenstruktur, Kinematik oder Steuerungstechnik abzielen. Je nach persönlichem Hintergrund wird sich die instantane Vorstellung von der Bedeutung dieses Begriffs demnach unterscheiden. Bild 1.3 zeigt über der Eingriffstiefe bei einer Änderung an einer Maschine, in welchem Bereich Umrüstung, Rekonfigurierung und Herstellung/Montage/Inbetriebnahme (IBN) angesiedelt sind. Dazu sind einige konkrete Beispiele aufgeführt.

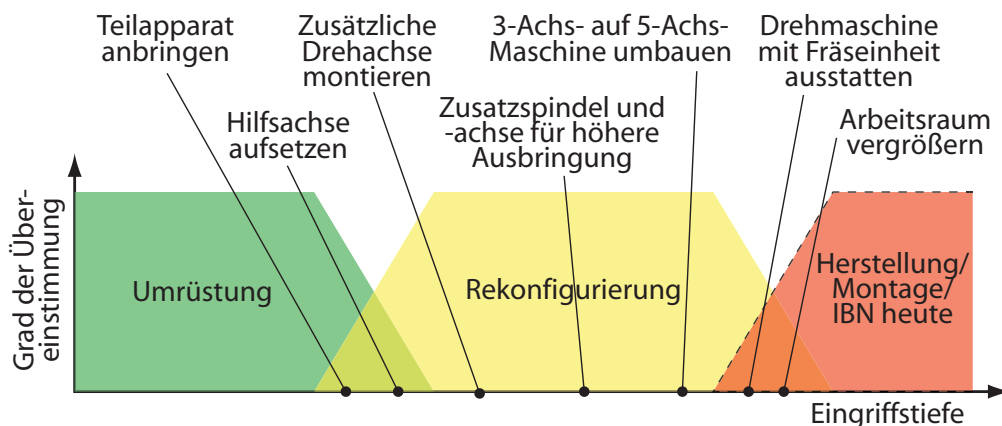


Bild 1.3: Die Eingriffstiefe bei der Rekonfigurierung ist höher als beim Umrüsten und reicht bis an eine heutige Maschineninbetriebnahme (IBN) heran.

In der Serienfertigung ist der Stückpreis eine der wichtigsten Kenngrößen. Die Bearbeitung eines Teils auf einer Maschine mit grosser, meist aber nicht benötigter Funktionsvielfalt, führt zu unverhältnismässig hohen Stückkosten. Rekonfigurierbare WZMn sollen die Stückkosten über eine Anpassung der Maschine und somit Beeinflussung des Maschinenstundensatzes und der Stückzeiten merklich senken. Lässt sich eine Grundmaschine mit wenig Aufwand und innerhalb kurzer Zeit rekonfigurieren, kann dieses Maschinenkonzept herkömmlichen flexiblen, aber teuren Bearbeitungszentren überlegen sein.

1.3 Aufbau der Arbeit

Nach dieser Einleitung wird in Kapitel 2 der *Stand der Technik* auf dem Forschungsgebiet der rekonfigurierbaren WZMn beschrieben. Zu Beginn werden die für diese Arbeit wichtigen Begriffe geklärt und für die weitere Verwendung definiert. Darauf folgt eine ausführliche Diskussion der in Forschung und Industrie bearbeiteten relevanten Themen.

In Kapitel 3 wird eine *wirtschaftliche Betrachtung* des Einsatzes von rekonfigurierbaren WZMn durchgeführt. Darin werden drei Klassen von WZMn charakterisiert und deren Stärken und Schwächen für verschiedene Nutzungen benannt. Eine Analyse der Kostenstruktur in der Lohnfertigung erlaubt die Identifizierung der Einflussfaktoren auf den Stückpreis. Mit Kenntnis der Einflussfaktoren und der Maschinencharakteristika werden Szenarien für die Fertigung mit rekonfigurierbaren WZMn abgeleitet.

Der *technische Teil* der Arbeit gliedert sich in drei Blöcke, in denen die Entwicklung einer rekonfigurierbaren WZM von der Modellierung über die Konstruktion bis hin zur Inbetriebnahme und zum Test des Rekonfigurierungsablaufs erörtert wird. Kapitel 4 beschreibt die Methoden und Werkzeuge, die für die Nutzung rekonfigurierbarer WZMn in der Produktion erforderlich sind. Ein zur Unterstützung des Anwenders im Rekonfigurierungsprozess entwickeltes Werkzeug wird vorgestellt und die Verwendung erläutert.

Kapitel 5 thematisiert die *Entwicklung von Maschinenmodulen* zum Bau einer rekonfigurierbaren WZM. Ausgehend von den Anforderungen an eine solche Maschine wird ein Konzept entworfen. Die dafür benötigten Maschinenkomponenten werden beschrieben und bewertet. Die Moduleigenschaften werden am realen Prototyp mittels Messungen überprüft, und die virtuellen Modulmodelle werden damit abgeglichen.

Der *Ablauf einer Rekonfigurierung* ist das Thema von Kapitel 6. Eingangs werden die erforderlichen Vorbereitungen für die Konfigurierung der Steuerung beschrieben, daraufhin wird der Umbau der Maschine besprochen. Schliesslich werden die zur Verifikation durchgeführten Tests und Messungen an der Maschine diskutiert.

Mit einem *Fazit* der bearbeiteten Themen und einem *Ausblick* auf sich daraus ergebende weiterführende Fragestellungen schliesst die Arbeit.

2 Stand der Technik

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Technik im Themenbereich *rekonfigurierbare WZMn*. Dazu werden eingangs einige für das Verständnis der Thematik relevante Begriffe diskutiert und definiert. Es folgt eine Diskussion des Vorgehens bei der Maschinenentwicklung, der zur Verfügung stehenden Maschinenteknik sowie der Entwicklungswerkzeuge zur Simulation des Maschinenverhaltens. Abschliessend wird aus den Ergebnissen die Zielsetzung der Arbeit hergeleitet.

2.1 Begriffsklärung

Um Fehlinterpretationen und Missverständnissen vorzubeugen, ist es angebracht, zunächst die Verwendung der für die Thematik relevanten Begriffe in der Fachliteratur zu untersuchen und zu diskutieren. Dabei aufgestellte Begriffsdefinitionen sind für die weitere Verwendung in dieser Arbeit massgeblich.

Es gibt eine Vielzahl von Begriffen, die in der produktionswissenschaftlichen Literatur verwendet werden und auf den ersten Blick mit rekonfigurierbaren WZMn in Verbindung gebracht werden können. WIENDAHL [147] zeigt eine Hierarchie von Begriffen, die sich an den verschiedenen Ebenen der Produktionsleistung im Unternehmen orientiert (Bild 2.1). Die Begriffe *Agilität* und *Wandlungsfähigkeit* bezeichnen ein taktisches bzw. strategisches Veränderungspotenzial. Damit sind mittelfristige Massnahmen zur Anpassung der Fabrikstruktur bzw. langfristige Aktivitäten auf Unternehmensebene gemeint, die auch standortübergreifend sein können. Dabei ist hervorzuheben, dass das Bezugsobjekt proaktiv handelt, also aus eigenem Antrieb und durch zielgerichtetes Vorgehen eine Veränderung herbeiführt, was sich im Verwendungsattribut „-fähigkeit“ widerspiegelt.

Die *Flexibilität* wird in diesem Zusammenhang als taktisches Veränderungspotenzial angesehen, das sich auf die mittelfristige Umstellung eines Produktions- oder Logistikbereichs auf eine neue Familie von Komponenten bezieht.

Die Begriffe *Umrüstbarkeit* und *Rekonfigurierbarkeit* bezeichnen ein operatives Veränderungspotenzial zur Reaktion auf übliche Marktschwankungen und Störungen. Diese kurzfristige Reaktion erfolgt in der Produktion auf Ebene eines Arbeitsplatzes bzw. ei-

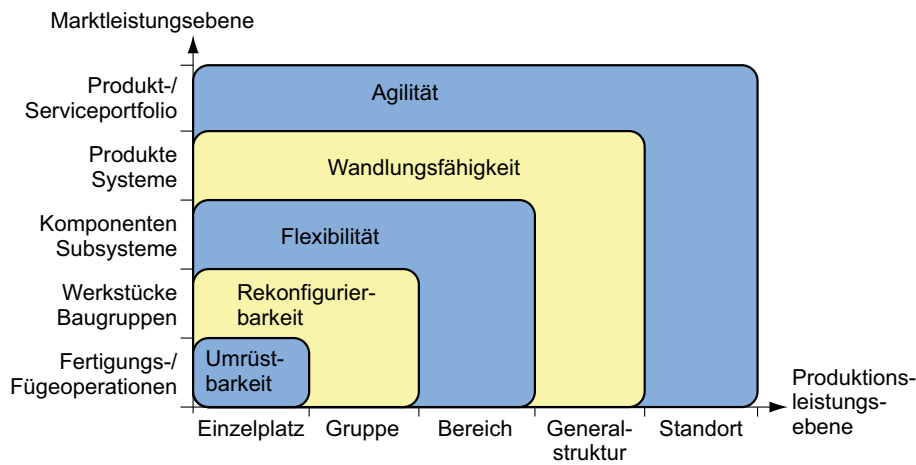


Bild 2.1: Veränderungstypen der Fabrik nach WIENDAHL [147]

nes Fertigungs- oder Montagesystems. Der reaktive Charakter dieser Begriffe drückt sich im Suffix „-bar“ aus, das dem der Substantivierung zugrunde liegenden und aus einem Verb gebildeten Adjektiv angehängt wird. Bei transitiven Verben deutet es an, dass die Verbhandlung mit etwas gemacht werden kann oder etwas dafür geeignet ist [23].

Gemäss diesem Raster bewegen sich rekonfigurierbare WZMn in den unteren drei Feldern. Die nachfolgende, eingehende Diskussion von Begriffen orientiert sich an dieser Struktur.

2.1.1 Flexibilität

Flexibilität ist wohl der am häufigsten benutzte und auch dehnbarste Begriff, unter dem Anforderungen an die Veränderungsfähigkeit von Unternehmen und die Anpassungsmöglichkeiten von Produktionsmaschinen subsumiert werden. Die Bedeutung der Flexibilität zeigt sich daran, dass sie heute dem klassischen magischen Dreieck aus Qualität, Kosten und Zeit/Termin oft als weitere Zielgrösse hinzugefügt wird, die bei der Gestaltung der Fabrik der Zukunft und der Produktion von morgen zu beachten ist [98]. Bild 2.2 verdeutlicht die Problematik bei der Optimierung mit solch gegensätzlichen Zielen. Jeder Punkt innerhalb des Tetraeders entspricht einem bestimmten Erreichungsgrad der vier Zielgrössen. Mit der Optimierung auf eine Zielgrösse nähert sich der Punkt zwar dieser an, entfernt sich aber gleichzeitig von den anderen dreien. Jede Fokussierung auf eine Zielgrösse geht also stets zu Lasten der konkurrierenden. Eine ideal flexible Produktionsmaschine ist demnach teuer, produziert langsam und mit schlechter Qualität.

Nach SLACK ist die Flexibilität eines Produktionssystems nur schwer messbar, da diese erstens ein Mass für das Potential – und nicht die Leistung – des Systems darstellt, sich zweitens stets auf einen bestimmten Produktionsfaktor bezieht, und drittens mit der

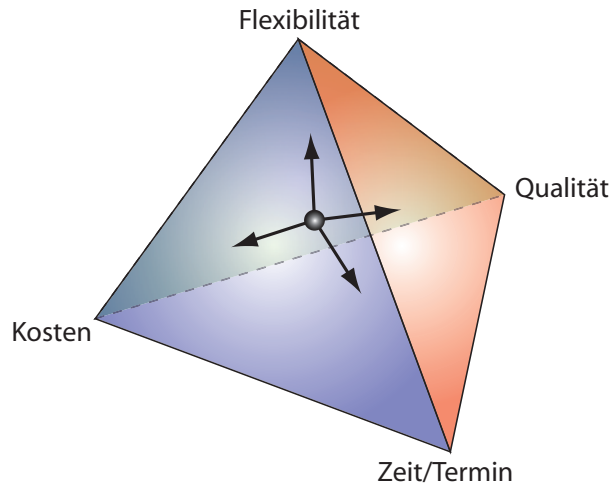


Bild 2.2: Tetraeder mit den Zielgrößen Qualität, Kosten, Zeit/Termin und Flexibilität.
Eine Optimierung einer Zielgröße ist nur zu Lasten der anderen drei möglich.

Bandbreite erreichbarer Zustände, dem dafür erforderlichen Zeit- sowie dem Kostenaufwand über drei Dimensionen verfügt [121, S. 12f].

Entsprechend dieser Auffassung wird Flexibilität in der Praxis oft näher spezifiziert. Aus betriebsorganisatorischer Sicht ergibt sich eine mögliche Systematisierung mit den Kategorien Auftrags-, Prozess- und Systemflexibilität sowie einer Reihe von Unterkategorien [143, S. 55ff]. Der Einsatz rekonfigurierbarer WZMn kann sich auf Flexibilitätsarten in allen drei Hauptkategorien auswirken, zum Beispiel Produktflexibilität (Fertigung in beliebiger Auftragsreihenfolge), Mengenflexibilität (Veränderung der Ausbringungsleistung) oder Anpassflexibilität (Anpassung von Fertigungs-, Materialfluss- und Informationssystemen bei verändertem Produktionsprogramm). Rekonfigurierungen eröffnen einen neuen zeitlichen Horizont, da insbesondere die Anpassflexibilität bei rekonfigurierbaren WZMn, im Gegensatz zu den heute existierenden Produktionsmaschinen, bereits kurzfristig zur Verfügung steht. Das wirkt sich auch auf die Produktflexibilität aus, die aufgrund der Rekonfigurierungszeit bei Fertigungssystemen aus rekonfigurierbaren WZMn anders ausfallen wird als bei herkömmlichen Systemen.

Die Einteilung und Benennung der Flexibilitätsarten ist nicht einheitlich. In [4] werden *machine flexibility* (Maschinenflexibilität) und *routing flexibility* (Leitwegflexibilität) unterschieden. Letztere bezieht sich auf die Wege, über die ein Teil die Fertigung durchlaufen kann, erstere ergibt sich aus den auf der Maschine durchführbaren Operationen und gilt hier als notwendige Voraussetzung für Produkt-, Prozess- und Bearbeitungsflexibilität.

Durch den Bezug auf spezifische, wenn auch allgemein gehaltene, Aspekte entsteht eine grosse Vielfalt an Begriffen, die leicht zu unterschiedlichen Lesarten führt. Aus diesem Grund schlagen TOLIO et al. in [131] eine Beschreibung der Flexibilität mit den vier

unabhängigen *Dimensionen* Kapazität, Funktionalität, Prozess und Produktionsplanung vor, denen jeweils die Attribute Bandbreite, Auflösung, Mobilität und Gleichförmigkeit zugewiesen werden. Zusätzlich werden mit Veränderbarkeit, Rekonfigurierbarkeit und Flexibilität drei gestufte *Flexibilitäts Ebenen* definiert, die sich jedoch stets auf eine bestimmte Fähigkeit beziehen, hinsichtlich der ein betrachtetes System beurteilt wird. Zudem werden mit dieser Beschreibung Grössen, die in [121] noch als Dimensionen angesehen wurden, zu Attributen von Grössen zur allgemeinen Beschreibung eines Fertigungssystems.

Für die Unterscheidung zwischen flexiblen und rekonfigurierbaren WZMn ist von Bedeutung, dass gemäss den meisten Definitionen die Zustandsänderung ohne Veränderung des Systems erfolgt, die erreichbaren Zustände also durch die Systemausprägung festgelegt sind, wie ZAEH et. al. in [152] schreiben. Die Abstammung des Wortes vom lateinischen Adjektiv *flexibilis*, zu deutsch *biegsam*, unterstreicht diesen Aspekt: Beim Biegen wird das System zwar ausgelenkt, aber nicht strukturell verändert. In diesem Sinne bietet sich für die Verwendung in dieser Arbeit eine **Definition** von WESTKAEMPER an:

*„Ein System wird als **flexibel** bezeichnet, wenn es im Rahmen eines prinzipiell vorgedachten Umfangs von Merkmalen sowie deren Ausprägungen an veränderte Gegebenheiten reversibel anpassbar ist.“ [146, S. 24]*

Für die in dieser Arbeit betrachtete Maschinenebene bedeutet dies, dass eine flexible WZM Möglichkeiten zur Werkzeugumrüstung (z.B. Werkzeugwechsler) und Softwareanpassung (CNC-Programmspeicher) bietet, ihre Struktur jedoch erhalten bleibt. Im Vergleich dazu kann Flexibilität bei Betrachtung ganzer Fertigungssysteme auch eine vorgesehene strukturelle Anpassung von Maschinen oder deren Komponenten, also der Objekte auf tiefer liegenden Ebenen, umfassen.

Wird Flexibilität in einem allgemeinen Sinn verwendet, ist dies als *Anpassungsvermögen* zu verstehen.

2.1.2 Rekonfigurierbarkeit

Der Begriff Rekonfigurierbarkeit – insbesondere der englische Ausdruck *reconfigurability* – wird hauptsächlich in der Informationstechnik in Verbindung mit Rechensystemen und Netzwerken verwendet. Der Bezug auf WZMn ergibt sich aus dem zunehmenden Einsatz von elektronischer Steuerungstechnik und dem daraus resultierenden Wandel zu einem mechatronischen Produkt.

Rekonfigurierbarkeit als Charakteristikum für WZMn und Fertigungssysteme wurde in den 1990er Jahren eingeführt. In den Beiträgen von KOREN et al. [60] und LANDERS et al. [62] beschreiben die Autoren, wie Unternehmen künftig auch variantenreiche Produkte mit niedrigen oder schwankenden Stückzahlen wirtschaftlich herstellen können. Da-

bei wird unterschieden zwischen rekonfigurierbaren Fertigungssystemen (engl. reconfigurable manufacturing systems, RMS) und rekonfigurierbaren WZMn (engl. reconfigurable machine tools, RMT). Letztere sind eine Ebene tiefer in der Fabrikhierarchie angesiedelt und stellen die Hauptbestandteile der ersteren dar. Zwar findet sich in den Texten keine Definition des Begriffs Rekonfigurierbarkeit, allerdings werden Eigenschaften genannt, die ein Fertigungssystem besitzen muss, um als rekonfigurierbar zu gelten [60, 79]:

Modularität (engl. modularity): Alle Hauptkomponenten (Struktur, Achsen, Steuerung, Software) sind modular aufgebaut.

Integrationsfähigkeit (engl. integrability): Maschine und Steuerung sind mit Schnittstellen zur Anbringung neuer Module ausgestattet. Diese Module können bereits existieren oder erst in Zukunft entwickelt werden.

Diagnosefähigkeit (engl. diagnosability): Das System ist in der Lage, schnell Qualitätsmängel festzustellen und zu beheben. Diese Fähigkeit ist besonders wichtig um die Anlaufphase kurz zu halten.

Anpassung (engl. customization): Das System ist für eine Teilefamilie ausgelegt. Es verfügt nur über die dafür erforderlichen Fähigkeiten und bietet nur die dafür erforderliche Flexibilität. Steuerungsseitig wird diese Anpassung durch den Einsatz von Steuerungsmodulen mit Open Architecture Technologie erreicht.

Umrüstbarkeit (engl. convertibility): Das System kann schnell und einfach für die Fertigung anderer Produkte umgerüstet werden.

Die ersten drei Eigenschaften reduzieren den Zeit- und Arbeitsaufwand bei einer Rekonfigurierung, die letzten beiden senken die Kosten.

Die genannten Eigenschaften bringen zwei Einschränkungen mit sich, die für eine sinnvolle Definition des Begriffes Rekonfigurierbarkeit für WZMn nicht aufrecht erhalten werden können. Die Ausrichtung auf Teilefamilien ist wohl sinnvoll, darf aber anders als in [60, 79, 81] keine zwingende Voraussetzung sein. Ebenso können produktiv eingesetzte WZMn mangels Kundenakzeptanz derzeit noch nicht mit Steuerungen mit Open Architecture Technologie ausgerüstet werden. Die Anpassung der Steuerungstechnik muss auch auf andere Weise erfolgen können und diese Einschränkung somit wegfallen.

Zur Herleitung einer Definition für Rekonfigurierbarkeit insbesondere von WZMn müssen daher andere Aspekte berücksichtigt werden. Weitgehend einig ist man sich in der Literatur, dass eine Anpassung bezüglich Technologie [38, 53, 60, 150], Struktur [4, 38, 53, 60], Kapazität und Funktionalität [4, 25, 38, 53, 60, 150] möglich sein muss. Diese Anpassung muss schnell und mit geringem Aufwand durchzuführen sein [4, 38, 53, 150], was sich am besten mit modularen Konzepten erreichen lässt [4, 38, 53, 60, 150]. Der Eingriff in die

Maschine ist dabei so gross, dass die Konfiguration der Maschinensteuerung angepasst werden muss, folglich also Hard- und Software betroffen sind [50, 53, 60, 150].

Für die weitere Verwendung in dieser Arbeit gilt somit folgende **Definition**:

*Eine Werkzeugmaschine ist **rekonfigurierbar**, wenn sie*

- *durch Ersetzen, Hinzufügen oder Entfernen von Modulen*
- *in ihrer Struktur, Technologie, Kapazität und Funktionalität*
- *trotz erforderlichen Eingriffs in die Steuerungstechnik und/oder Kalibrierung*
- *schnell und mit geringem Aufwand¹*
- *an veränderte, auch nicht vorgesehene Anforderungen*

angepasst werden kann.

Die zugehörige Tätigkeit der Anpassung einer rekonfigurierbaren Maschine heisst Rekonfigurieren. Sie umfasst alle Schritte von der Planung bis zur Wiederaufnahme der Produktion.

Rekonfigurierung

Ein von einem Verb abgeleitetes Nomen mit dem Suffix „-ung“ kann vom Verb ausgedrückte Handlungen, Vorgänge und Zustände bezeichnen [23]. Rekonfigurierung wird von KIRCHER et al. als „Wandlungsprozess von einem konfigurierten Bearbeitungssystem in ein Bearbeitungssystem mit veränderter Struktur, Funktionalität, Technologie oder Kapazität“ beschrieben [53]. In Übereinstimmung damit wird, aufbauend auf den bereits geklärten Begriffen, für diese Arbeit definiert:

*Der Vorgang des Rekonfigurierens wird als **Rekonfigurierung** bezeichnet.*

Bild 2.3 zeigt, wie durch Rekonfigurierung die Leistungsmerkmale einer Maschine verändert werden können. Während die Flexibilität nur Anpassungen innerhalb einer gegebenen Bandbreite ermöglicht, lässt sich mit einer Rekonfigurierung die Lage und Grösse dieser Bandbreite an jeweils aktuelle Anforderungen anpassen. Um diese Anpassung jederzeit vornehmen zu können, ist ein sehr kleines Verhältnis der Dauer der Rekonfigurierung zur anschliessenden Nutzungsdauer anzustreben, wie es auch TAKEDA allgemein für die Produktion fordert [130].

¹Geringer Aufwand: Die Arbeiten können von einer ausgebildeten Person durchgeführt werden. Dazu müssen folgende technische Hilfsmittel zur Verfügung stehen: Hallenkran oder sonstiges Hebezeug, Werkzeug für die Montage, Computer für die Vorbereitung der Steuerungskonfiguration.

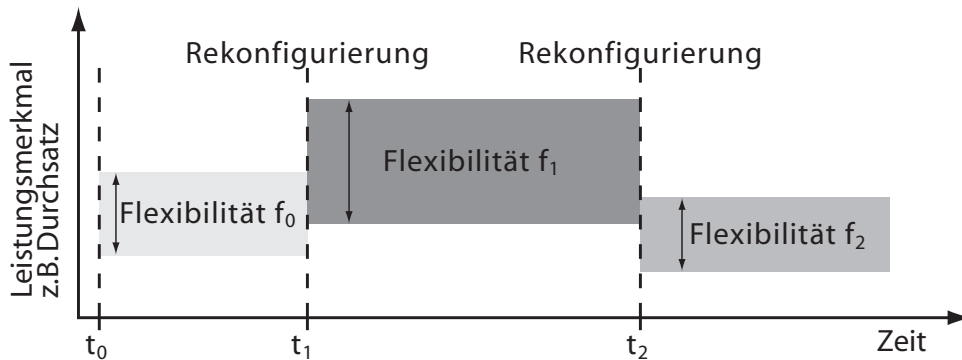


Bild 2.3: Der Unterschied zwischen Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit liegt darin, dass Flexibilität innerhalb einer definierten Bandbreite verfügbar ist während mit einer Rekonfigurierung die Lage und Grösse dieser Bandbreite verändert werden kann (in Anlehnung an ZÄH [152]).

Rekonfiguration – Konfiguration

Das Suffix „-ation“ drückt meist die Handlung oder das Resultat der Handlung des zugrunde liegenden Verbs aus [23]. Eine Konfiguration, abgeleitet vom lateinischen Verb *configurare*, bezeichnet eine bestimmte Art der Gestaltung [20]. Speziell in der Informatik kann damit eine Zusammenstellung eines Computersystems aus Komponenten, aber auch die Anpassung der Hard- und Software gemeint sein. Zielführender für die Begriffsklärung ist die Definition der Implementation als das Resultat einer Implementierung [20]. In Anlehnung an diesen Gebrauch in der Informationstechnik wird für diese Arbeit definiert:

*Eine **Konfiguration** stellt das Ergebnis einer Konfigurierung dar. Analog dazu wird mit **Rekonfiguration** das Resultat einer Rekonfigurierung bezeichnet.*

Eine Rekonfiguration ist somit lediglich ein anderer Zustand als vor der Rekonfigurierung. Dieser kann auch einfach als Konfiguration bezeichnet werden, so dass der umständlichere Begriff Rekonfiguration nur dazu verwendet wird, um zwei aufeinanderfolgende Konfigurationen zu unterscheiden.

2.1.3 Modularität

Da Modularität als erforderliche Eigenschaft für Rekonfigurierbarkeit gilt, wird auch dieser Begriff genauer betrachtet. In der Praxis wird oft von Modularität gesprochen, sobald ein Produkt oder System eine Baukastenstruktur aufweist [89]. Diverse sogenannte „modulare“ Werkzeugmaschinenkonzepte, bei denen der Kunde nur bei der Erstkonfiguration der Maschine zwischen verschiedenen Komponenten aus einem Baukasten wählen kann,

unterstreichen diese Aussage [41, 133]. Vor der Definition der Modularität wird daher zunächst auf Module eingegangen.

Modul

Die Verwendung von Modulen ist insbesondere in der Informatik und Elektrotechnik weit verbreitet. Das spiegelt die Beschreibung in [20] wider, wonach ein Modul „ein Stück Hardware (Gerät) oder Software (Programm) [ist], das als klar umgrenzte Bau- oder Funktionsgruppe einen Teil eines Ganzen bildet und geändert oder ausgetauscht werden kann, ohne dass Eingriffe oder Veränderungen im übrigen System erforderlich werden“.

POUGET orientiert sich bei seiner Arbeit über Produktionssysteme aus autonomen Produktionsmodulen (APM) stark an den Konzepten der objektorientierten Programmierung in der Informatik. Charakteristisch für ein APM ist, dass es über eine eigene Steuerung und damit vollständige Funktionalität verfügt. Das ermöglicht die autonome Ausführung einer Produktionsaufgabe, auch ohne – ebenfalls mögliche – Einbettung in ein übergeordnetes Produktionssystem [90].

Da auch eine rekonfigurierbare WZM zumindest zur Koordination der vorhandenen Module über eine zentrale Steuerung verfügen wird, müssen die Module nicht zwingend mit einer eigenen Steuerung ausgestattet sein. Sicherlich wird aber auch bei Verwendung von Modulen immer ein Eingriff in das System nötig sein. Dieser Eingriff sollte soweit wie möglich automatisiert ablaufen, wie es bei PCs heute üblich ist. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wird für die weitere Arbeit folgendes definiert:

*Ein **Modul** ist eine klar umgrenzte Baugruppe mit definierter Funktionalität, die über standardisierte Schnittstellen in ein übergeordnetes System integriert werden kann und damit ein Ganzes bildet.*

Modularität

Obwohl der Begriff Modularität oft verwendet wird, findet sich keine Definition in den allgemeinen Nachschlagewerken. Da auch in der Literatur kein Konsens über Definition und Verwendung des Begriffs besteht, haben GERSHENSON et al. eine Umfassende Untersuchung in den Feldern Informatik, Ingenieurwissenschaften, Biologie, Architektur und Kunst durchgeführt. Neben der ausführlichen Diskussion verschiedener Definitionen von Modularität wird auch ihr Nutzen besprochen, der sich vor allem in Skaleneffekten, leichter Austauschbarkeit und den immer wichtiger werdenden Recyclingmöglichkeiten zeigt [35]. In [34] wird die Diskussion so zusammengefasst, dass Modularität als der Grad definiert werden kann, in dem ein Produkt aus unabhängigen Modulen besteht, die nicht miteinander interagieren.

Gemäss der Studie *Wandlungsfähige Produktionssysteme* ermöglicht Modularität den einfachen Austausch standardisierter, funktionsfähiger Einheiten oder Elemente [83]. Für die Verwendung im Hinblick auf WZMn bietet sich eine Definition an, die auf den Einsatz von Modulen zielt:

*Eine Werkzeugmaschine ist **modular**, wenn sie für den Einsatz von Modulen geeignet ist und ganz oder teilweise aus Modulen besteht.*

2.1.4 Umrüstbarkeit

Laut REFA bezeichnet Rüsten „das Vorbereiten des Arbeitssystems für die Erfüllung der Arbeitsaufgabe sowie – soweit erforderlich – das Rückversetzen des Arbeitssystems in den ursprünglichen Zustand“ [97]. Diese Tätigkeit wird vom Maschinenbediener durchgeführt und umfasst im Allgemeinen das Bestücken mit und Einrichten von Werkzeugen, Werkstücken und Spannvorrichtungen. Die Steuerungskonfiguration ist davon nicht betroffen, allenfalls werden Werkzeugdaten und Korrekturwerte gesetzt.

Umrüsten kann demnach als die Tätigkeit verstanden werden, mit der ein Arbeitssystem von einem Rüstzustand in den nächsten übergeführt wird. Nach WIENDAHL ist Umrüstbarkeit eine Eigenschaft von einzelnen Maschinen oder Arbeitsplätzen. Der operative Charakter dieser Eigenschaft zeigt sich darin, dass eine Umrüstung zu jedem Zeitpunkt und mit minimalem Aufwand durchgeführt werden kann. Dies ist deshalb möglich, weil Umrüsten nur Anpassungen für definierte Arbeitsoperationen innerhalb eines gegebenen Rahmens zulässt [147]. Im Weiteren gilt folgende Definition:

*Eine Werkzeugmaschine ist **umrüstbar**, wenn sie sich jederzeit und mit minimalem Aufwand durch Tausch oder Veränderung passiver Komponenten (Werkzeuge, Spannvorrichtungen etc.) ohne Eingriff in die Steuerungskonfiguration für die Ausführung definierter Arbeitsoperationen innerhalb eines gegebenen Rahmens anpassen lässt.*

2.1.5 Wandelbarkeit

Zur Beschreibung von Anpassungsmöglichkeiten, die über die bereitgestellte Flexibilität eines technischen Systems hinausgehen, wird in der Literatur häufig der Begriff Wandelbarkeit verwendet. Laut KIRCHER et al. lassen sich wandelbare Bearbeitungssysteme zielgerichtet und kurzfristig neuen Anforderungen aus dem Produktionsprozess anpassen [52]. Sie benutzen den Begriff im Sinne von Rekonfigurierbarkeit und fordern autarke, mechatronische Module in Kombination mit einer selbstadaptierenden Steuerung als Grundlage für wandelbare Bearbeitungssysteme [54].

Eine Abgrenzung der Begriffe Flexibilität, Wandelbarkeit und Wandlungsfähigkeit erfolgt in [146]. Danach bezieht sich Wandelbarkeit nur auf technische Teilsysteme, lässt aber im Gegensatz zur Flexibilität Veränderungen der räumlichen Struktur und der Funktion zu:

*„Ein System wird als **wandelbar** bezeichnet, wenn seine räumliche Strukturierung sowie sein Verhaltensspektrum aufgrund einer Anpassung des Umfangs an Merkmale [sic!] sowie deren Ausprägungen auch an zunächst unbekannte Gegebenheiten veränderbar sind.“ [146, S. 24]*

Aus dieser Definition geht hervor, dass Wandelbarkeit die grundlegenden Aspekte der Rekonfigurierbarkeit umfasst. REINHART et al. definieren Wandlungsfähigkeit als ein Paket aus Flexibilität und Reaktionsfähigkeit [99]. In Anlehnung an diese eingängige Formulierung lässt sich für Wandelbarkeit folgender Ausdruck aufstellen:

$$\text{Wandelbarkeit} = \text{Flexibilität} + \text{Rekonfigurierbarkeit}$$

Wandelbarkeit erlaubt also die kurzfristige Reaktion eines technischen Systems innerhalb eines vorgedachten Umfangs sowie die mittelfristige Reaktion auf ungeplante Anforderungen über diesen Umfang hinaus.

2.1.6 Komplexität

Der Begriff Komplexität wird in dieser Arbeit vornehmlich in Verbindung mit Werkstücken und Prozessen verwendet. Bei ersteren bezieht er sich auf die Geometrie, bei letzteren auf das Zusammenspiel von Verfahren und Werkzeugen. Soll der Begriff in einem weiten Feld über viele Fachbereiche verwendet werden, ist eine allgemeingültige Definition sinnvoll. SUH fasst Komplexität als relative Grösse auf, nämlich als Mass für die Unsicherheit des Verständnisses für eine bestimmte Aufgabe oder Anforderung [129]. Für die konkrete Verwendung im oben genannten Zusammenhang eignen sich solche abstrakten Definitionen nur beschränkt, so dass wie in [47] situationsbedingte Definitionen aufgestellt werden müssen. Eine Anlehnung an eine allgemeinere Definition nach der sich Komplexität durch eine Vielfalt an einwirkenden Faktoren, gegenseitigen Interdependenzen und schlechte Strukturierbarkeit auszeichnet [132], bietet sich jedoch an:

*Ein **Werkstück** ist aus fertigungstechnischer Sicht **komplex**, wenn es viele Fertigungsmerkmale (Geometriemerkmale, Features, Toleranzen, . . .) und keine oder wenig Symmetrien, Rotationsachsen oder Wiederholmuster aufweist, wodurch sich die Fertigungsmerkmale nur schlecht strukturieren lassen. Die Herstellung der Fertigungsmerkmale muss daher aus vielen unterschiedlichen Raumrichtungen erfolgen (z.B. Freiformfläche). Zudem bestehen sowohl bekannte als auch unbekannte oder intransparente funktionale Abhängigkeiten zwischen den Fertigungsmerkmalen.*

Für einen komplexen Fertigungsprozess lässt sich eine ähnliche Definition aufstellen:

*Ein **Prozess** ist aus fertigungstechnischer Sicht **komplex**, wenn er mehrere unterschiedliche Verfahren enthält und zur Ausführung verschiedene Prozessparameter, Werkzeuge oder Vorrichtungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten benötigt, wodurch sich die Abfolge der Bearbeitungsschritte nur schlecht strukturieren lässt. Zudem bestehen sowohl bekannte als auch unbekannte oder intransparente Abhängigkeiten zwischen den Bearbeitungsschritten.*

Parallelisierbarkeit

Zur Analyse der notwendigen Bearbeitungsschritte für die Fertigung eines Werkstücks ist der Begriff Parallelisierbarkeit hilfreich. Die Parallelisierbarkeit bezieht sich auf das gleichzeitige Ausführen mehrerer Operationen an einem Werkstück. Bestehen beispielsweise keine Abhängigkeiten in der Abfolge der Operationen innerhalb einer Spindelorientierung, kann die Bearbeitung mit mehreren Werkzeugen an einer Werkzeugspindel erfolgen, wie es beispielsweise mit einem Mehrfachbohrkopf möglich ist [10, 88, 103]. Bestehen zwar innerhalb der Spindelorientierungen Abhängigkeiten zwischen den Operationen, nicht jedoch zwischen den verschiedenen Spindelorientierungen, so ist eine Parallelbearbeitung von verschiedenen Seiten mit mehreren angetriebenen Werkzeugspindeln denkbar. In Bild 2.4 sind die verschiedenen Möglichkeiten graphisch dargestellt.

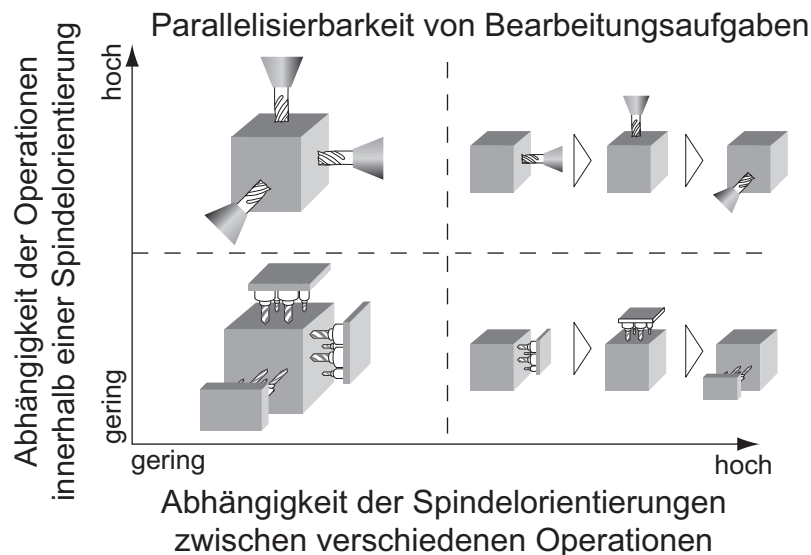


Bild 2.4: Die Parallelisierbarkeit von Bearbeitungsaufgaben ergibt sich aus den Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Operationen und den Spindelorientierungen.

Parallelisierbarkeit kann somit folgendermassen definiert werden:

Parallelisierbarkeit ist das Verhältnis einer Menge m an Bearbeitungsoperationen, die unabhängig von der Ausführungsreihenfolge zum selben Ergebnis führen, bezogen auf die Gesamtmenge M an Bearbeitungsoperationen.

2.2 Übersicht der Fertigungssysteme

Bei WZMn wird zwischen Einzelmaschinen und Mehrmaschinensystemen unterschieden. Bild 2.5 zeigt die Maschinenlandschaft unter den Gesichtspunkten Produktivität und Flexibilität. Die in der Graphik adressierte Flexibilitätsart ist die Auftragsflexibilität mit ihren Unterarten Produkt- und Mengenflexibilität.

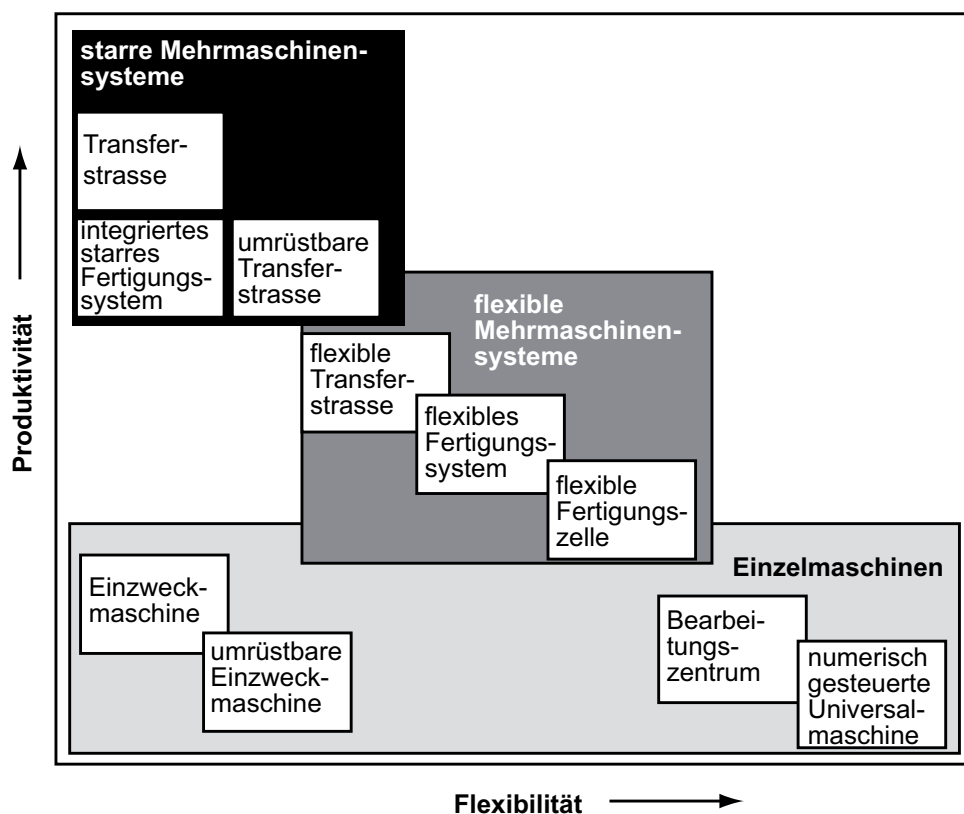


Bild 2.5: Zusammenhang zwischen Auftragsflexibilität und Produktivität verschiedener Fertigungssysteme. Der zunehmende Automatisierungsgrad führt zu gegenläufigem Verhalten [32].

Die Graphik offenbart das bekannte Dilemma der Fertigungstechnik, wonach Produktivität und Flexibilität invers miteinander gekoppelt sind. Mit zunehmendem Automatisie-

ungsgrad steigt zwar die Produktivität, doch gleichzeitig sinkt die Flexibilität. Beginnend bei manuell bedienten NC-Universalmaschinen wird der menschliche Eingriff durch Speicher- und Wechselsysteme für Werkzeuge und Werkstücke sowie Verkettung mehrerer Systeme stetig reduziert, bis bei flexiblen Fertigungssystemen und Transferstrassen schliesslich die Werkstücke automatisiert zwischen den einzelnen Stationen fließen [32]. Während NC-Maschinen zwar hochflexibel aber nur mässig produktiv sind, glänzen Transferstrassen durch höchste Produktivität, die jedoch durch sehr eingeschränkte Flexibilität erkauft wird. Die Automatisierung führt nämlich zu einem deutlich höheren Formspeichergrad des Systems, der sich negativ auf die Flexibilität auswirkt [143]. Als Formspeichergrad versteht man den Anteil der im System vorhandenen Aktivteile, welche die Geometrie des Werkstücks enthalten bzw. speziell dafür ausgelegt sind. Aktivteile sind alle Teile, die mit dem Werkstück in Berührung kommen [143].

Rekonfigurierbare Fertigungssysteme

Weder Transferstrassen noch flexible Fertigungssysteme sind unter den in Abschnitt 1.1 dargelegten Umständen ideale Produktionsmittel für die Serienfertigung. Aus diesem Grund führen KOREN et al. in [60] den neuen Typ der rekonfigurierbaren Fertigungssysteme ein. Diese Systeme vereinigen die Vorteile der klassischen Systeme: Die hohe Produktivität und niedrigen Stückkosten der Transferstrasse gepaart mit der Skalierbarkeit der flexiblen Fertigungssysteme und erweitert um die Möglichkeit zur schnellen und einfachen Anpassung hinsichtlich Struktur, Kapazität und Funktionalität führen zu einem kostengünstigen und wandelbaren Fertigungssystem. Ein solches System ist, im Gegensatz zu heutigen Fertigungssystemen, von Anfang an für den Wandel ausgelegt. Spätere Anpassungen der Struktur können auf Systemebene, beispielsweise durch Hinzufügen neuer Maschinen, und auf Maschinenebene durch Austausch von Hard- und Software erfolgen.

Viele Artikel über rekonfigurierbare Fertigungssysteme behandeln primär organisatorische und fabrikplanerische Themen. [1] liefert eine Entwurfsmethodik für rekonfigurierbare Fertigungssysteme, die auf dem Analytic Hierarchy Process (AHP) basiert. Die Entscheidungsfindung bei der Wahl eines Fertigungssystems geschieht über eine multikriterielle Bewertung der Erfüllung von Anforderungen, wobei sowohl technologische als auch strategische Aspekte berücksichtigt werden können. In [84] ist eine auf Zustandsübergangsdiagrammen basierende Methodik zur Modellierung von Fertigungsprozessen beschrieben. Die Methodik bildet den Werkstückfluss, den Fertigungsprozess sowie die Ressourcen ab und soll die effiziente Rekonfigurierung der Zellensteuerung ermöglichen. GALAN et al. haben eine Methodik zur Bildung von Teilefamilien entwickelt, die zur effizienten Nutzung von RMS beitragen soll. Das Ergebnis ist ein sog. „Dendrogramm“, aus dem sich der Ähnlichkeitsgrad verschiedener Produkte ablesen lässt [34]. Auch die Nutzung der Rekonfigurierbarkeit von Systemen zur Behandlung aussergewöhnlicher Ereignisse im

Produktionsprozess, wie zum Beispiel Maschinenausfälle oder Maschinenbelegungs- oder Auftragsprioritätsänderungen ist Gegenstand der Forschung [21, 22]. Technische Überlegungen betreffen bislang meist Ansätze zur Automatisierung oder die Elektronik für die Steuerung dieser Systeme. So wird zum Beispiel in [63] die Verwendung einer Netzwerk-Struktur anstatt Punkt-zu-Punkt-Verbindungen für zeitkritische Signalübertragungen in rekonfigurierbaren Fertigungssystemen und WZMn untersucht. Eine technische Wissensbibliothek zur Rekonfigurierung von Fertigungssystemen und insbesondere WZMn haben HEISEL und MEITZNER entwickelt. Das System generiert und visualisiert zulässige Varianten und unterstützt den Anwender bei der Auswahl [38].

Rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen

Gleichzeitig mit den rekonfigurierbaren Fertigungssystemen führen KOREN et al. die rekonfigurierbaren WZMn ein [60]. Diese Maschinen, die aufgrund ihres modularen Aufbaus immer wieder an die gerade aktuellen Betriebsanforderungen angepasst werden können, gelten als elementarer technischer Bestandteil rekonfigurierbarer Fertigungssysteme [59, 62]. Besonders aktiv auf diesem Gebiet war anfangs das Engineering Research Center for Reconfigurable Manufacturing Systems (ERC/RMS) an der University of Michigan (USA), dessen Forschung – wie es der Name schon andeutet – auf Rekonfigurierbarkeit in der Fertigung ausgerichtet ist und das diverse Patente auf diesem Gebiet angemeldet hat [109, 111, 110]. Dort wurde auch der Prototyp einer rekonfigurierbaren WZM entwickelt und patentiert, die sogenannte Arch-Type RMT [108], die in Abschnitt 2.4.4 im Detail diskutiert wird. Diese Maschine war die Grundlage für weitere Arbeiten auf dem Gebiet der Steuerungstechnik [50], der Messtechnik [36] und der Entwicklungsmethodik [49].

Eine Reihe von Autoren hat sich vor allem mit Entwicklungsmethoden beschäftigt und verschiedene Beiträge dazu geliefert. In [102] wird eine Metrik zur Evaluierung des Rekonfigurierbarkeitsgrades von WZMn vorgeschlagen und auf eine Beispielmaschine angewendet. In [6] werden Anpassbarkeit und Erweiterbarkeit als bestimmende Faktoren für den Nutzwert von Modulen identifiziert und im Rahmen einer Fallstudie bei der Modulentwicklung durch Betrachtung der möglichen Weiterentwicklung der Maschine berücksichtigt. ABELE und WÖRN beschäftigen sich in [5] mit den Merkmalen von Modulen für eine rekonfigurierbare WZM sowie den deren Schnittstellen.

Existieren bereits Module, so kann man mit der in [24] beschriebenen Methode die optimalen Module zur Bearbeitung einer gegebenen Teilefamilie bestimmen. Bei dieser zweistufigen Methode werden zuerst funktionale Anforderungen aus den CAD-Features abgeleitet und danach mit den Design Parametern der verfügbaren Module abgeglichen. MOON und KOTA haben eine Methodik entwickelt, mit der aus einer gegebenen Bearbeitungsaufgabe zulässige Kinematikvarianten generiert werden können [81]. Ein ähnlicher Ansatz findet sich in [112], wo gleichartige Operationen zu Clustern zusammengefasst werden aus

denen sich die erforderliche Kinematik für die untersuchte Bearbeitungsaufgabe ergibt. [53] beschreibt ein mechatronisches Informationsmodell, das modellbasiertes Rekonfigurieren von WZMn unter Beachtung der Zusammenhänge und Abhängigkeiten, die sich aus dem Zusammenspiel von Mechanik und Elektrik/Elektronik ergeben, erlaubt. Keine der genannten Arbeiten berücksichtigt jedoch physikalische Effekte, wie sie in einem elastisch gekoppelten Mehrmassensystem auftreten. Einen Ansatz dazu liefert [68], wo ein Werkzeug zur Untersuchung des statischen und dynamischen Verhaltens verschiedener Konfigurationsvarianten beschrieben wird, das die Grundlage für diese Arbeit bildet.

Intensiv mit der Modularisierung von WZMn beschäftigt sich WURST, der in [151] eine Vorgehensweise zur Schaffung autarker, mechatronischer Module erläutert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Reduktion der Schnittstellen und der Festlegung geeigneter Systemgrenzen, was durch Dezentralisierung einzelner Komponenten erreicht wird.

2.3 Maschinenentwicklung

WZMn sind heutzutage hoch komplexe, mechatronische Produkte, deren Entwicklung interdisziplinäres Fachwissen erfordert. Die gewünschte Funktion einer Maschine wird erst durch das abgestimmte Zusammenspiel von Mechanik, Elektronik und Informationstechnik erreicht. Aus diesem Grund muss der traditionelle Entwicklungsprozess um eine die einzelnen Fachdisziplinen verbindende Dimension erweitert werden [82].

2.3.1 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

Die Forschung hat gezeigt, dass kein allgemeingültiger Prozess existieren kann, dem strikt gefolgt werden könnte. Die heute bekannten Methoden mit den zugehörigen Abläufen sind eher als Leitfäden zu verstehen [82]. Einen solchen stellt die VDI-Richtlinie 2206 [135] dar, die drei Elemente im Entwicklungsprozess kombiniert. Der *Problemlösungszyklus* als Mikrozyklus, das sogenannte *V-Modell* als Makrozyklus sowie *Prozessbausteine* für wiederkehrende Arbeitsschritte setzen auf unterschiedlichen Ebenen an und geben jeweils einen Handlungsrahmen für bestimmte Situationen vor.

Der Problemlösungszyklus wird prinzipiell für jede einzelne Aufgabe durchlaufen. Seine Gültigkeit und Effektivität ist unbestritten, so dass er auch ausserhalb der Ingenieurwissenschaften angewendet wird. Er umfasst die Schritte Situationsanalyse, Analyse und Synthese, Analyse und Bewertung, Entscheidung sowie Planen des weiteren Vorgehens.

Das V-Modell beschreibt das Vorgehen bei der Entwicklung mechatronischer Systeme. Es wird auf das Produkt als Ganzes angewendet und dem jeweiligen Fall entsprechend konkretisiert. Ausgehend von den Anforderungen an das Produkt entsteht aus der ganzheitlichen Betrachtung des Lösungsraumes der Systementwurf. Nach der weiteren Konkretisierung

im domänenpezifischen Entwurf werden die Ergebnisse aus den einzelnen Domänen bei der Systemintegration zusammengeführt. Zur Eigenschaftsabsicherung wird der Entwurfsfortschritt laufend gegenüber dem Lösungskonzept und den Anforderungen überprüft, wobei Modellbildung und -analyse zum Einsatz kommt. Das Produkt schliesslich ist das Ergebnis des – im allgemeinen mehrfach – durchlaufenen Makrozyklus’.

Bestimmte Teilschritte treten bei jedem Entwurf auf. Für diese ist es möglich und sinnvoll, Prozessbausteine zu definieren, die das Vorgehen konkreter beschreiben. Solche Prozessbausteine können für jede Phase innerhalb der Methodik zur Verfügung gestellt werden, wobei ihre Detaillierung und ihr Umfang je nach Bedarf variieren.

Die VDI-Richtlinie 2206 ist in der Werkzeugmaschinenbranche international anerkannt, auch wenn sie nicht alle Aspekte lückenlos abdecken kann. Der grösste Mangel ist das Fehlen der Kommunikation zwischen den Domänen während der Erarbeitung der spezifischen Entwürfe. Eine strikte Trennung ist kontraproduktiv und hinderlich auf dem Weg zu einem guten Ergebnis. Auch die im Falle von WZMn wichtige und auch offenstehende Möglichkeit des Einbezugs von Informationen von bereits im Feld befindlichen Systemen wird nicht behandelt [82].

2.3.2 Ebenen des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine

Erst das Konzept der Mechatronik ermöglicht die Präzision und die Fülle an Funktionalitäten wie sie moderne WZMn bieten. Für das Zusammenspiel der beteiligten Domänen werden in [82] drei Ebenen unterschieden:

Mechatronisches System Werkzeugmaschine: Mit Hilfe von Sensoren in den Komponenten und dem restlichen Aufbau der Maschine lässt sich der Zustand des Gesamtsystems abbilden. Ein Abgleich dieses Abbildes mit zugehörigen Modellen erlaubt die Korrektur von Positionierfehlern mit Hilfe der Steuerung und der Antriebe.

Mechatronische Komponenten der Werkzeugmaschine: Diese Ebene umfasst im Wesentlichen Komponenten wie die Antriebe, die selbst ein mechatronisches System sind. Diese Komponenten sind meist als Integraldesign ausgeführt und erzielen ihren Funktionszuwachs hauptsächlich durch den Einsatz der Informationstechnik.

Integration zusätzlicher mechatronischer Lösungen: Auf dieser Ebene werden zusätzliche Komponenten verwendet, um bestehende Mängel der WZM zu beheben. Sie korrigieren durch ihren Eingriff die Fehler anderer Komponenten.

Mechatronische Kompaktlösungen für Werkzeugmaschinen werden bereits heute kommerziell als Produkt angeboten. Ein Beispiel für dafür ist das KomTronic[®] u-axis System der *KOMET GROUP*, das an einer konventionellen Werkzeugaufnahme befestigt wird und über integrierte Servoantriebe zur Verstellung des Werkzeugs verfügt [56].

2.3.3 Designkonzept

Bei der Produktentwicklung stellt sich grundsätzlich die Frage nach dem Designkonzept, der Art und Weise des strukturellen Aufbaus. Auf jeder Produktebene muss entschieden werden, ob eine Lösung in Integraldesign oder in Modulardesign gesucht werden soll.

Über Integraldesign lässt sich ein Produkt mit höchster Leistungsfähigkeit realisieren. Bezogen auf WZMn ist zum Beispiel die Präzision ein solches Leistungsmerkmal. Die Anschaffungskosten liegen im Allgemeinen niedriger, da keine normierenden Elemente wie Schnittstellen benötigt werden. Modulardesign hingegen ist der beste Weg zu schnellen Entwicklungszyklen und kurzer time-to-market. Ebenso weist es für internationale Projekte oder bei standortübergreifenden Entwicklungsaufgaben Vorteile auf. Durch geschickte Abgrenzung der Module und der Aufgaben können Abhängigkeiten und somit die Komplexität reduziert werden. Die Modularität zeigt ihre Stärke, wenn Integraldesign nicht mehr handhabbar ist [19]. Zudem ermöglicht sie die Wandelbarkeit des Produkts, wodurch es dem Kunden auch unter geänderten Bedingungen in der Zukunft potentiell Nutzen bringt.

Rekonfigurierbare WZMn erfordern gemäss ihrer Definition Modulardesign auf Maschinenebene. Auf Modulebene und darunter lassen sich mit Integraldesign leistungsfähige und kostengünstige Lösungen realisieren.

2.4 Maschinentchnik

Ein umfassender Überblick über die Maschinentchnik würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, daher wird nur punktuell auf Entwicklungen eingegangen, die im Hinblick auf die Rekonfigurierbarkeit von WZMn von Interesse sind. Dennoch werden mit der Mechanik, Elektrik bzw. Elektronik und Steuerungstechnik alle relevanten Bereiche behandelt.

2.4.1 Mechanik

Eine rekonfigurierbare WZM muss in ihrer mechanischen Gestaltung prinzipiell den selben Ansprüchen genügen wie eine konventionelle WZM. Der grosse Unterschied besteht jedoch darin, dass universelle Schnittstellen benötigt werden, die Modularität ermöglichen.

Im Rahmen des Projektes METEOR 2010 [2] wurde die sogenannte statische Schnittstelle SST-60 entwickelt, die auf dem Prinzip der HSK-Spanntechnik basiert. Bild 2.6 zeigt links eine einzelne Schnittstelle und rechts eine Adapterplatte mit fünf x-förmig angeordneten Schnittstellen. Die Verbindung wird geschlossen, indem der Zapfen des Spannmotors, je nach Ausführung hydraulisch, elektromechanisch oder manuell, selbsthemmend mit dem Flanschadapter verspannt wird. Messungen haben eine Federsteifigkeit bei Zugbelastung von circa 2,6 kN/ μm ergeben. Die Spannwiederholgenauigkeit wurde mit Messungen am

nicht näher spezifizierten Tool Center Point (TCP) überprüft, wobei für 20 Wiederholungen ein Wert von 3-4 μm genannt wird. Eine detaillierte Untersuchung der Steifigkeit bei Zug-, Druck- und Schubbelastung und Wiederholgenauigkeit findet sich in [3].

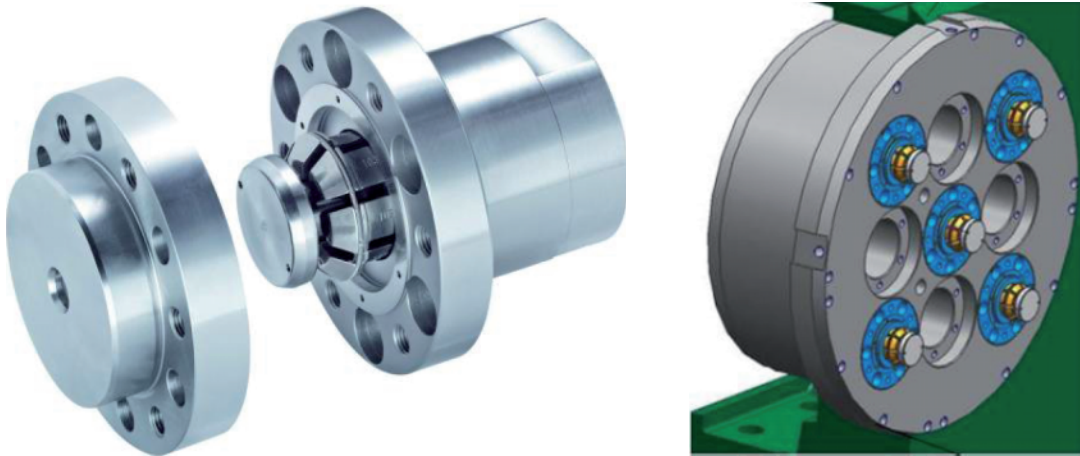


Bild 2.6: Die Statische Schnittstelle SST-60 (links) basiert auf dem HSK-Prinzip. Eine einfach lösbare mechanische Verbindung für Module (rechts) [2].

Eine umfassende Übersicht über kinematisch definierte mechanische Verbindungen liefert SLOCUM in [122]. Er geht darin auf die Prinzipien ein, die hinter den heute in der Technik üblichen Verbindungen stehen und untersucht diese hinsichtlich Positioniergenauigkeit und Steifigkeit. In [37] wird das sog. „canoe ball“ Verbindungselement behandelt. Dieses ist speziell auf hohe Belastung bei gleichzeitig hoher Wiederholgenauigkeit ausgelegt.

WURST et al. schreiben zwar, dass existierenden Baukastensystemen bei WZMn definierte mechanische Schnittstellen zugrunde liegen, nennen jedoch keine konkreten Beispiele dafür. Sie betonen, dass Rekonfigurierbarkeit eine sinnvolle Abstimmung funktionaler und physischer Systemgrenzen erfordert [150].

2.4.2 Elektrik und Installationstechnik

Relevante Arbeiten auf dem Gebiet der Elektrik betreffen bis heute hauptsächlich die Standardisierung und Bündelung von Steckverbindungen. Im Auftrag des Vereins Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW) wurde am iwv der TU München das Projekt Desina (DEzentralisierte und Standardisierte INstallationstechnik) bearbeitet. Das Ziel war die Entwicklung eines einheitlichen Konzepts für die elektrische und fluidtechnische (Hydraulik, Pneumatik) Installation an WZMn und Produktionssystemen. Das Ergebnis sind Spezifikationen für die dabei benötigten Komponenten. Desina ist seit 2005 als internationaler Standard ISO 23570 anerkannt [46, 140].

Um den Wechsel von Modulen schnell und einfach zu gestalten wurde im METEOR-Projekt ein so genannter Multistecker entwickelt, der elektrische und pneumatische Anschlüsse in einem Gehäuse vereint. Beim Funktionstest an einem Werkzeugrevolver zeigt sich, dass die elektrische Schirmung ein kritischer Punkt ist [2].

Kommerziell sind einige Produkte erhältlich, die mehrere Anschlüsse in einer Steckverbindung integrieren. Die Mehrfachanschlussplatten der Firma Stäubli beispielsweise sind für hydraulische, pneumatische und elektrische Anschlüsse geeignet [128].

Alle angesprochenen Verbindungssysteme zielen darauf ab, einen einzigen Stecker als Schnittstelle für alle Anschlüsse zu verwenden. In der Praxis werden diese Möglichkeiten bisher allerdings noch selten in WZMn eingesetzt.

Im Projekt Kontenda des Instituts für Automation und Kommunikation e.V. (ifak) in Magdeburg wird an der kontaktlosen induktiven Energie- und Datenübertragung geforscht. Das Funktionsprinzip basiert auf der Trennung von Primär- und Sekundärspule eines Transformators. Damit sollen bis zu mehreren kW Leistung übertragen werden können [40], womit auch im Maschinen- und Anlagenbau bewegliche Verbraucher ohne Stromschienen oder Schleppkabel mit elektrischer Energie versorgt werden könnten.

2.4.3 Elektronik und Steuerungstechnik

Moderne WZMn werden erst durch den Einsatz von Elektronik und Steuerungstechnik zu dem mechatronischen Produkt mit grosser Funktionalität und hoher Präzision, wie es heute existiert. Rekonfigurierbare WZMn sind noch mehr auf diese Technologien angewiesen, um die aus der Modularität erwachsenden Probleme zu lösen.

Open Architecture Control (OAC) ist ein Ansatz, um die plattformunabhängige Implementierung von Steuerungsfunktionalitäten zu ermöglichen und damit den Austausch von Hardware zu erleichtern. Zusätzlich zu den üblichen externen Kommunikationsschnittstellen werden über Application Programming Interfaces (API) steuerungsinterne Zugriffsmöglichkeiten geboten. Anfang der 90er Jahre begannen Industriegruppierungen weltweit, Spezifikationen für solche offenen Steuerungssysteme, deren Schnittstellen sowie die zugehörigen Protokolle auszuarbeiten. Ein detaillierter Überblick findet sich in [93], wo auch die Kernpunkte der verschiedenen Projekte in Europa (OSACA), den USA (OMAC) und Japan (OSEC, JOP) erläutert werden.

Exemplarisch ist in Bild 2.7 die Struktur der OSACA-Systemplattform (Open System Architecture for Controls within Automation systems) dargestellt. Allgemeine Funktionsbausteine, hier Architecture Objects (AO) genannt, kommunizieren über die neutrale Programmierschnittstelle API mit dem darunter liegenden Betriebssystem. Eine gewünschte Maschinenfunktionalität kann somit plattformunabhängig entwickelt werden [71, 123].

Die OMAC-Nutzergruppe (Open Modular Architecture Controller) verfolgt einen objekt-

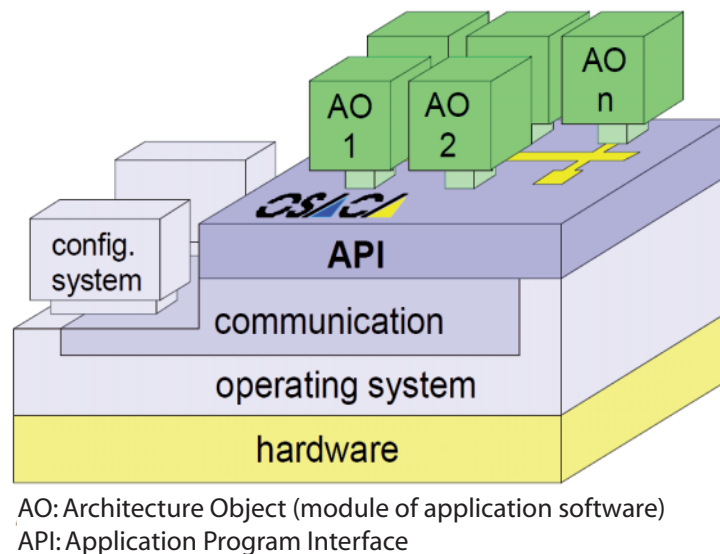


Bild 2.7: Struktur der OSACA Systemplattform. Funktionsbausteine in Form von Architecture Objects können über die Programmierschnittstelle API auf das Betriebssystem der Steuerung zugreifen [123].

orientierten Ansatz und verwendet Schnittstellenklassen zur Definition der API. Komponenten (components), Module (modules) und Aufgaben (tasks) können dann darauf aufsetzen [13]. Mittlerweile hat sich aus der Nutzergruppe eine Organisation mit weiter gefasstem Handlungsauftrag entwickelt (Organization for Machine Automation and Control), die derzeit circa 500 Mitgliedsfirmen umfasst [85]. Sowohl *Siemens* wie auch *Bosch Rexroth* bieten OMAC für ihre Automatisierungslösungen an [117, 18].

Die italienische Firma *Sintesi* hat in Zusammenarbeit mit Steuerungsanwendern aus der Industrie die Orchestra Control Engine entwickelt. Dabei handelt es sich um eine offene und modulare Software für die Bahn- (motion control, G-Code Programmierung nach DIN 66025) und Ablaufsteuerung (logic control). Sie basiert auf Linux und ist echtzeitfähig. In der für die Bahnsteuerung zuständigen Komponente OrchestraCore kann der Anwender in so genannten Modulen seine eigenen Algorithmen implementieren. Diese werden während der Laufzeit dynamisch geladen, was situationsspezifische Anpassungen erlaubt [119, 120].

Eine kommerziell erhältliche und in der Industrie weit verbreitete NC-Steuerung, die auf allen Ebenen Eingriffsmöglichkeiten bietet, ist die Sinumerik 840D von *Siemens*. Der Maschinenhersteller kann auf die Bedienoberfläche (HMI), die NC und die PLC über bereitgestellte Schnittstellen zugreifen und diese bedarfsgerecht anpassen, wobei Eingriffe bis in den NC-Kern möglich sind. Mit der Programmierung von Compile-Zyklen, die mit den Herstellerzyklen in den NC-Kern eingebunden werden, lassen sich beispielsweise weitere Technologiefunktionen realisieren [118].

Im Rahmen der Forschung an offenen Steuerungsarchitekturen wird der Einsatz von Field Programmable Gate Arrays (FPGA) anstelle digitaler Signalprozessoren (DSP) untersucht. Über FPGAs können die Hardwareschnittstellen für neue Modulbausteine, also die Belegung der einzelnen Pins, einfach umprogrammiert werden [91].

Zur automatisierten Konfigurierung von Maschinensteuerungen gibt es kaum kommerzielle Softwareunterstützung. Für Serienmaschinen legen die Hersteller Konfigurationsarchive an, die bei der Maschineninbetriebnahme auf die Steuerung übertragen werden. Bei niedrigen Stückzahlen konfiguriert ein Maschineneinrichter während der Inbetriebnahme die Steuerung, wobei er sich üblicherweise im Voraus erstellter SPS-Programmteile bedient. In beiden Fällen jedoch sind manuelle Anpassungen nötig, die detaillierte Fachkenntnisse und langjährige Erfahrung erfordern [52]. WURST et al. fordern in [150] geeignete Konfigurierungs- und Planungshilfsmittel für rekonfigurierbare Bearbeitungssysteme.

Ein für modulare, rekonfigurierbare Maschinen interessantes Konzept sind Antriebe mit integrierter Leistungs- und Regelelektronik wie die IndraDrive Mi-Reihe von *Bosch Rexroth*. Die an den Antrieben angebrachten Steuergehäuse werden über sog. Hybridkabel, die sämtliche Signal- und Energieleitungen umfassen, seriell mit dem Schaltschrank verbunden. Ein direktes Wegmesssystem kann derzeit nicht angeschlossen werden [16, 17].

Auf der IMTS 2008 in Chicago wurden die ersten Ergebnisse des MTConnect-Projektes vorgestellt. MTConnect wurde knapp zwei Jahre zuvor auf Initiative der US-amerikanischen Association for Manufacturing Technology (AMT) ins Leben gerufen. Ziel ist ein offener, gebührenfreier Standard zum Datenaustausch in Industrienetzwerken bis hinunter auf Maschinenebene, was CNC-Steuerungen einschließt. Das Protokoll basiert auf XML (Extensible Markup Language) und wird über Internet Protocol übertragen [9].

2.4.4 Beispiele für rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen

Rekonfigurierbare WZMn sind noch Gegenstand der Forschung, bisher existieren nur zwei Prototypen. Allmählich beginnen aber auch Maschinenhersteller, das Thema aufzugreifen.

Die erste als rekonfigurierbar bezeichnete WZM ist die in Bild 2.8 (links) dargestellte Arch-Type RMT. Die Maschine wurde in den 90er Jahren am ERC/RMS der University of Michigan entwickelt und in den USA zum Patent angemeldet [108]. Die Maschine wurde für die Bearbeitung unterschiedlich geneigter Zylinderkopfflächen von Kurbelgehäusen für V6- und V8-Motoren konzipiert. Die Maschine verfügt nur über drei NC-Achsen, wobei die Neigung der Spindelachse der jeweils zu bearbeitenden Variante angepasst wird. Die Spindelachse ist auf einer beweglichen Trägerplatte angebracht, welche über einen Stellmotor auf der Bogenplatte verfahren und in 15°-Stufen arretiert werden kann. Der Stellmotor ist nicht NC-gesteuert und dient einzig der Positionierung der Spindelachse, die für die Bearbeitung zusätzlich über Schrauben fixiert wird [25, 49, 50, 59].

Diese Maschine ist die erste unter dem Blickwinkel der Rekonfigurierbarkeit entwickelte WZM und diente zur Erklärung und Rechtfertigung des Prinzips. Zu beachten ist, dass ihr die Ausrichtung auf eine Teilefamilie als Kern der Rekonfigurierbarkeit zugrunde liegt. Mit ihrer passiven Stellachse kann die Konfiguration nur innerhalb eines sehr begrenzten Rahmens geändert werden. Das Tauschen, Hinzufügen oder Entfernen von Komponenten ist dabei nicht vorgesehen. Da die möglichen Konfigurationen durch die Bauausführung vorgegeben sind, handelt es sich um eine Art diskreter Produktflexibilität, nicht um Rekonfigurierbarkeit im Sinne der Definition in Abschnitt 2.1.

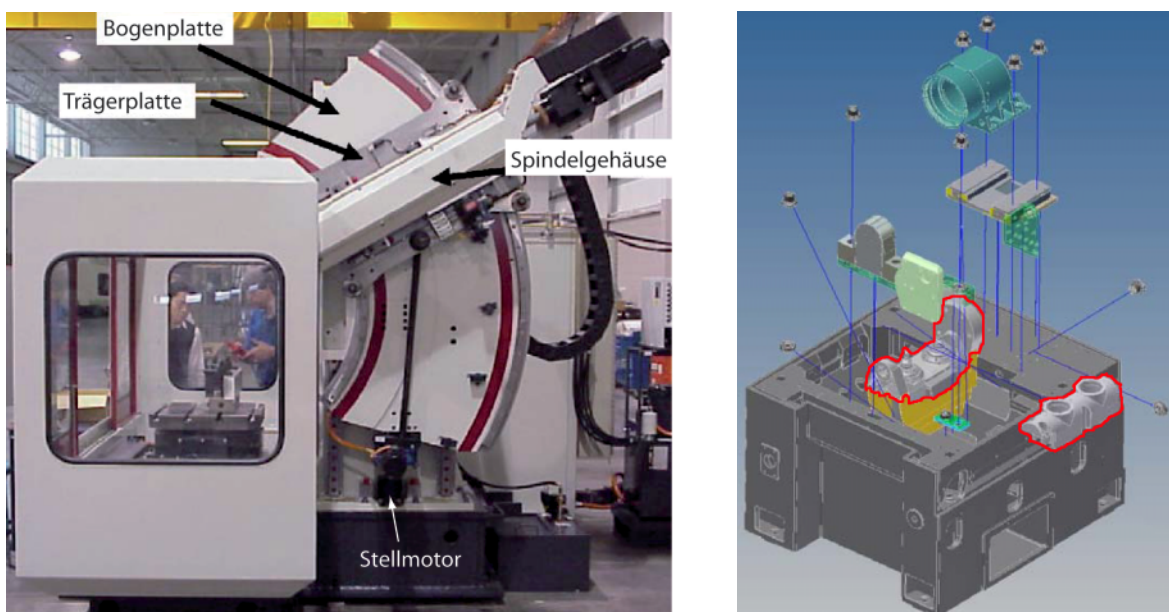


Bild 2.8: Die Neigung der Spindel an der Arch-Type RMT (links) lässt sich in 15°-Stufen verstellen [25]. Der METEOR-Demonstrator (rechts) kann verschiedene Module für unterschiedliche Bearbeitungen (rot umrahmt) aufnehmen [2].

Die zweite rekonfigurierbare WZM entstand im Rahmen des Projektes METEOR 2010. Der METEOR-Demonstrator basiert auf einer modifizierten XG 242 von *MAG Powertrain*, in deren Maschinengrundkörper bis zu drei Modulbrücken mit spezifischen Werkzeugen eingehängt werden können (Bild 2.8, rechts). Die Positionierung und Fixierung der Bearbeitungsmodule erfolgt über die statische Schnittstelle SST-60.

Eine regelbasierte Software zur virtuellen Rekonfigurierung unterstützt den Anwender bei der Wahl der Module. Für jedes Modul ist hinterlegt, welche Verwendung erlaubt ist, und die Software verhindert unzulässige Kombinationen. Die Steuerungskonfiguration wurde jeweils im Vorhinein konventionell an der Maschine erstellt und als Archiv gespeichert, das bei der Rekonfigurierung dann geladen wird. Anfang 2008 wurde diese Maschine bei *GKN Driveline* installiert, wo sie im industriellen Einsatz getestet wird [2, 73, 124].

Auf Basis einer ähnlichen Situationsanalyse wie in Abschnitt 1.1, bietet die Firma *EMAG* mit der Bohrkopfmaschine BM 1250 ein Produkt an, das einige wesentliche Eigenschaften rekonfigurierbarer WZMn besitzt, jedoch ohne sich explizit auf Rekonfigurierbarkeit zu beziehen. Im Vordergrund stehen die Modularität und Skalierbarkeit einer produktspezifischen Maschine, die sich auch nach dem Erwerb anpassen lässt [29].

Einen modularen Ansatz verfolgt auch *Schuler* mit der Lasermaschine PEDILAS. Die Portalmaschine besteht aus zwei nicht miteinander verbundenen Seitenwangen, auf die eine Y-Brücke mit Z-Achse und dem Laserkopf montiert wird. Alle Komponenten existieren in verschiedenen Ausführungen, aus denen der Kunde seine Maschine zusammenstellen kann. Durch die modulare Bauweise können auch zu späteren Zeitpunkten die Verfahrenswege der Hauptachsen oder die Freiheitsgrade des Laserkopfs angepasst werden, worauf die Bezeichnung als „mitwachsende Maschine“ beruht [107]. Im Unterschied zur Definition der rekonfigurierbaren WZMn erfolgt diese Anpassung ausschliesslich durch den Hersteller.

2.5 Entwicklungswerkzeuge

Bei der Entwicklung von WZMn kommen je nach Entwicklungsphase und -gegenstand verschiedenste Werkzeuge zum Einsatz. Die Betrachtung wird daher auf die für diese Arbeit wesentlichen Werkzeuge für Berechnungen und Simulationen eingeschränkt.

Der Aufwand für die Modellerstellung und die Fülle der dazu benötigten Informationen steigen mit zunehmender Detaillierung stark an. Gleichzeitig steigen auch die Detaillierung und die Verlässlichkeit der gelieferten Ergebnisse an, wenn auch unterproportional. Daraus ergibt sich eine quasi natürliche Reihenfolge der Einsatzzeitpunkte jedes Werkzeuges, an der sich auch die nachfolgende Behandlung orientiert.

Der Arbeit mit allen Werkzeugen ist gemein, dass sie, neben den eigentlichen Erkenntnissen aus der Analyse, zu einem besseren Verständnis des untersuchten Objekts führen. Beides schlägt sich normalerweise in besseren Produkten und kürzeren Entwicklungszeiten nieder, da Fehler schon in frühen Phasen entdeckt und behoben werden können.

Nicht zuletzt aufgrund der komplexen Bedienung muss weiterhin an geeigneten und bedienerfreundlichen Anwendungen für die Werkzeugmaschinenentwicklung geforscht werden [8], insbesondere für rekonfigurierbare Systeme [150].

2.5.1 Starrkörpersimulation

Als erste Methode, um einen Eindruck vom Verhalten einer Maschine zu bekommen, eignet sich die Starrkörpersimulation. Bereits wenige Informationen reichen aus, um Modelle zu erstellen, die grundlegende Untersuchungen während der Konzeptphase ermöglichen [67].

Starrkörpermodelle bestehen aus unverformbaren, masse- und trägheitsbehafteten Körpern, die über idealisierte Verbindungen miteinander gekoppelt sind. Für kinematische Untersuchungen werden die Geometrie und Kinematik der Verbindungselemente sowie Bahninformationen als Weg-, Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsprofile über der Zeit benötigt [8]. Werden Feder-Dämpfer-Elemente für die Verbindungen verwendet, lassen sich das Frequenzverhalten und dynamisch bedingte Bahnfehler am TCP betrachten [157].

Als gut geeignet für Starrkörpersimulationen hat sich die Software MATLAB von *The MathWorks* erwiesen. Eine Stärke von MATLAB ist die graphische Darstellung von Ergebnissen, und es bietet eine relativ einfache Möglichkeit, graphische Benutzeroberflächen zu programmieren. Als Anwendungsbeispiel sei der am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (IWF) der ETH Zürich entstandene Achsbaukasten (ABK) genannt, der speziell auf die Bedürfnisse im Werkzeugmaschinenbau zugeschnitten ist. Damit können auf effiziente Weise Modellvarianten erstellt und vergleichend untersucht werden [67, 144].

Eine Alternative zu MATLAB stellt die Software Dymola von *Dassault Systèmes* (ursprünglich *Dynasim*) dar. Damit lassen sich Modelle verarbeiten, die in der objektorientierten Modellierungssprache Modelica geschrieben sind. Modelica ermöglicht eine sehr anschauliche und stark an der Physik orientierte Modellierung mechatronischer Systeme.

2.5.2 Finite-Elemente-Methode

Nach der Konzeptfindung folgt die Konstruktion, wo alle Bauteile und Komponenten einer Maschine ausgearbeitet werden. In dieser Phase wird die Finite-Elemente-Methode (FEM) angewendet. Damit lässt sich das Strukturverhalten unter statischer, dynamischer und thermischer Last ermitteln [8]. An den gefundenen Schwachstellen können dann gezielt Optimierungen vorgenommen werden. Sehr gut eignet sich die FEM auf Komponentenebene zur Analyse und Optimierung von Bauteilen [7, 153].

Modelle kompletter WZMn enthalten so viele Elemente, dass ihre Handhabung und Auflösung mit heutigen Rechensystemen oft nicht praktikabel ist. Die Rechenzeiten können jedoch drastisch verkürzt werden, indem Ansätze zur Modellreduktion angewendet werden, bei denen ein System mit vielen Freiheitsgraden auf ein um Größenordnungen kleineres mit wenigen Hauptfreiheitsgraden reduziert wird, das dennoch das dynamische Verhalten und die wesentliche Eigenschaften des ursprünglichen Modells enthält [76]. Dadurch verkürzt sich die Rechenzeit auf eine für die Entwicklung vertretbare Dauer im Bereich einiger Minuten [74].

In der Werkzeugmaschinenbranche ist die FE-Software Ansys der Firma *Ansys Inc.* weit verbreitet. Eine effiziente Nutzung erfordert jedoch viel Erfahrung in der Bedienung und gute Kenntnisse der Materie. Zur Abschätzung des Verhaltens kompletter Maschinen sind Starrkörpersimulationen mindestens ebenso gut geeignet, wenn nicht überlegen [57].

2.5.3 Integrierte und mechatronische Entwicklungswerkzeuge

Die wachsende Sensibilisierung für eine ganzheitliche Betrachtung mechatronischer Systeme führte zu sogenannten integrierten oder mechatronischen Entwicklungswerkzeugen. Für die Nutzung rekonfigurierbarer WZMn ist der mechatronische Ansatz deshalb so bedeutend, da der Anwender eine Maschine nur dann selbstständig und erfolgreich rekonfigurieren kann, wenn er dabei durch geeignete Werkzeuge unterstützt wird. Die nachfolgenden Beschreibungen konzentrieren sich auf Arbeiten zur Wahl geeigneter Strukturkonfigurationen sowie zur Steuerungskonfigurierung.

Tools und Erweiterungen zur Modellreduktion für kommerzielle FEM-Software sind bereits heute erhältlich [104], wobei weiterhin auf diesem Gebiet geforscht wird [75]. Zur Reduzierung des Rechenaufwands für die Simulation kleiner Verformungen bei grossen Verfahrbewegungen, werden Starrkörpersimulation und FEM in so genannten Hybridverfahren kombiniert. Während die lokale Berechnung der Verformung über FEM erfolgt, werden für die Verfahrbewegung Methoden aus der Starrkörpermechanik angewendet [113]. Implementiert ist das Verfahren zum Beispiel in der Software RecurDyn [33].

Für die zeiteffiziente Simulation des thermo-mechanischen Verhaltens von Maschinenstrukturen kombinieren MAYR et al. zwei bekannte Verfahren. Mit der Finite-Differenzen-Methode (FDM) wird eine Temperaturverteilung berechnet, für die mittels FEM die Verlagerungen ermittelt werden. Diese Methode ermöglicht es zudem, ein Maschinenmodell zur Laufzeit auszuwerten und die Ergebnisse zur Kompensation von thermisch induzierten TCP-Verlagerungen zu nutzen [77, 78].

Durch Erweiterung des Analysetools SAMCEF Mecano um eine Bibliothek mit durch den Benutzer parametrierbaren Komponenten, entstand im Projekt MECOMAT (MEchatronic COmpiler for MACHine Tool design) ein integriertes Entwicklungswerkzeug. Modelle können darin als Starrkörpersystem, FE-System oder kombiniert untersucht werden. Der mechatronische Ansatz umfasst auch die Einbindung einer Umgebung zur Entwicklung von Steuerungsstrukturen sowie die Möglichkeit, diese in Simulink zu testen [105, 134].

Entwicklungswerkzeuge, die mit mechatronischen Modellen arbeiten, zielen darauf ab, Fehler im Programmcode frühzeitig zu beheben und damit die eigentliche Inbetriebnahme zu beschleunigen. Auf Basis dieser Modelle lassen sich SPSen virtuell in Betrieb nehmen [26] oder genormte SPS-Programme für die Inbetriebnahme von SPSen erstellen [11]. ZÄH modelliert die Maschinenstruktur in UML und das Maschinenverhalten als Zustandsmaschine (Finite State Machine, FSM), woraus sich die Ablaufdiagramme für die SPS-Programme ableiten lassen [154].

Für Hardware-in-the-Loop-Simulationen (HiL) wird Hardware, zum Beispiel ein elektronisches Steuergerät, an eine Simulationsumgebung angeschlossen, die das Verhalten der späteren Einsatzumgebung nachbildet. STOEPLER et al. beschreiben die Nutzung des

Siemens Machine Simulators als HiL-Umgebung zur Überprüfung von SPS-Programmen, indem die SPS über Profibus an den Simulations-PC angeschlossen wird. Da SPS und CNC in einem Gerät integriert sind, können auch NC-Programme getestet werden, jedoch ohne Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften der Maschine [127]. Eine HiL-Simulation, deren zugrundeliegendes Modell eben diese physikalischen Eigenschaften der Maschine beinhaltet, wird in [92] erläutert.

Problematisch bei Simulationen ist generell die Bestimmung brauchbarer Modellparameter, zum Beispiel der Dämpfungswerte an den Koppelstellen, die von einer Vielzahl unterschiedlicher Einflussfaktoren abhängen [8]. Die Qualität der Parameter wirkt sich direkt und massgeblich auf die Qualität der Simulationsergebnisse aus.

2.6 Maschineninbetriebnahme

Die Inbetriebnahme von WZMn ist heute immer noch ein sehr zeitaufwendiger Vorgang. Die Bestimmung und Einstellung der richtigen Parameterwerte für die Steuerung und insbesondere die Regler geschieht meist manuell durch einen Maschineneinrichter. Der Umfang der einzustellenden Parameter ist bei allen Steuerungen ähnlich und die Werte physikalischer und regelungstechnischer Parameter sind identisch. Der konkrete Parametervorgang an den Steuerungen variiert jedoch stark. Die Hersteller stellen dazu in der Regel umfangreiche Dokumentation bereit. Programme für speicherprogrammierbare Steuerungen können üblicherweise in mindestens einer der in IEC 61131-3 [39] genormten Sprachen geschrieben werden. Darüberhinaus bieten manche Hersteller die Möglichkeit, herstellerspezifische Programmiersprachen zu nutzen, die besser auf die Steuerungsfunktionalitäten zugeschnitten sind (z.B. Siemens HiGraph).

Welche Methoden und Werkzeuge heute bereits in der Praxis angewendet werden und an welchen Themen die Forschung arbeitet, wird im folgenden kurz beschrieben.

2.6.1 Virtuelle Inbetriebnahme

Virtuelle Inbetriebnahme zielt darauf ab, das Software-Engineering früher in die Entwicklungsphase einzubeziehen, wodurch einerseits Zeit bei der eigentlichen Inbetriebnahme gespart und andererseits Fehler (Logik, Verschaltung, Hardware-Konfiguration etc.) frühzeitig und gefahrlos entdeckt werden sollen. Dabei werden zwei Ansätze unterschieden: Die Komplettsimulation von Maschine/Anlage und Steuerung sowie die Hardware-in-the-Loop-Simulation (HiL), bei der eine reale Steuerung mit einer simulierten Maschine/Anlage gekoppelt wird. Im vorangehenden Abschnitt wurden bereits einige Arbeiten erwähnt, die Methoden und Werkzeuge für die HiL-Simulation zur Unterstützung bei der SPS-Projektierung im Werkzeugmaschinenbau [92, 127] behandeln.

Für den zweiten Ansatz, die Komplettsimulation, finden sich hauptsächlich Forschungsarbeiten, in denen ganze Anlagen – meist Verpackungsanlagen – simuliert werden. Zur realistischeren Abbildung des Materialflusses von losem Transportgut in der Simulation werden in [101] dessen physikalische Eigenschaften modelliert, so dass die ungesteuerten Bewegungen (Rutschen, Fallen, Kippen etc.) gemäss physikalischen Gesetzen berechnet werden können. In [154] wird gleichzeitig mit der SPS-Software ein zugehöriges Modell erstellt, mit dem die erstellte Software getestet werden kann. Neuere Arbeiten automatisieren einige dieser Vorgänge, so dass sich die SPS-Software direkt aus dem Modell ableiten lässt [100]. In [86] erfolgt die Programmierung der Pfadsteuerung in einer höheren Programmiersprache und wird dann über einen Algorithmus in SPS-Code übersetzt. Gemein ist allen Arbeiten, dass sie auf die Programmierung rein ablaufgesteuerter Anlagen fokussieren und somit nicht direkt die Probleme adressieren, die bei der Inbetriebnahme NC-gesteuerter WZMn relevant sind. Viel wichtiger als die Programmierung an sich ist hier das Zusammenfügen vorhandener SPS-Blöcke zu einem funktionierenden Gesamtprogramm sowie die Definition und Konfiguration der Hardware-Komponenten.

2.6.2 Inbetriebnahme von Serienmaschinen

Hersteller von Serienmaschinen nutzen für die Inbetriebnahme die Möglichkeit, die Steuerungskonfiguration einmalig zu erstellen und diese danach auf beliebig viele Steuerungen zu übertragen. Die erste Maschine eines Typs wird von einem Fachmann in Betrieb genommen, was mehrere Stunden bis Tage dauern kann. Weitere Maschinen des selben Typs mit identischer Technik können dann innerhalb einiger Minuten durch Einlesen des passenden Steuerungsarchivs eingerichtet werden. Problematisch bei diesem Vorgehen ist einerseits die Erstellung des ersten Archivs und der damit verbundene hohe Initialaufwand sowie die reduzierte Performance zugunsten der erforderlichen Robustheit.

Siemens bietet zum Beispiel die Möglichkeit, mit dem *SinuCom Update Agent* ein Installationspaket zu erstellen, das über Dialogfelder vorhandene Maschinenoptionen abfragt und so ein an die vorliegende Maschinenvariante angepasstes Archiv auf die Steuerung überträgt. Auch diese Methode bringt einen sehr hohen Aufwand im Vorfeld mit sich und lässt sich nur bei entsprechend hoher Stückzahl rentabel einsetzen. Siemens hat für 2010 die Ablösung des *SinuCom Update Agent* durch den *SinuCom Installer V2.6* mit einer Vielzahl neuer Funktionalitäten angekündigt.

2.6.3 Inbetriebnahmeregeln

Die Steuerungshersteller beschreiben in Handbüchern, wie ihre Steuerungen in Betrieb genommen werden und was dabei zu beachten ist. Ausführliche Erklärungen beziehen sich jedoch nur auf Basiseinstellungen, die üblicherweise benötigt werden [115]. Bei den meisten

Maschinen müssen noch viele Einstellungen zusätzlich und manche andere eventuell gar nicht vorgenommen werden. Aus diesem Grund wird eine Maschineninbetriebnahme in der Regel durch einen spezialisierten Fachmann mit ausreichend Erfahrung durchgeführt.

Im Fokus der Forschungsarbeiten zur Automatisierung und Beschleunigung des Inbetriebnahmeprozesses steht die Optimierung der NC-Parameter. In [94] wird ein Algorithmus für Selbsttuning der Reglereinstellungen vorgestellt. ZIRN beschäftigt sich in [155] mit der Parametrierung von Steuerungen für WZMn. Er zeigt, wie WZMn für die Reglerauslegung modelliert und wie daraus die zugehörigen Parameterwerte bestimmt werden können. Für die Parameterbestimmung stellt er Regeln auf, mit denen vor einer Inbetriebnahme auf einfache Weise rechnerisch ein ausgewogener Parametersatz ermittelt werden kann. Die selben Themen werden auch in [156] behandelt, wobei hier der Fokus noch stärker auf ein praxisnahes Vorgehen bei der Antriebsinbetriebnahme von WZMn gerichtet wird.

2.7 Zielsetzung der Arbeit

Aus den Ausführungen zum Stand der Technik leitet sich die derzeit bestehende Forschungslücke und damit die Zielsetzung dieser Arbeit ab: Bisher wurde keine zufriedenstellende Antwort auf die Frage gegeben, ob und wie die Produktion mit rekonfigurierbaren WZMn prinzipiell funktionieren kann. In diesem Zusammenhang fehlt eine ganzheitliche Betrachtung, welche wirtschaftliche, betriebsorganisatorische und technische Fragestellungen gemeinsam abdeckt.

Seit der Einführung der Konzepte rekonfigurierbarer Fertigungssysteme in [60] und rekonfigurierbarer WZMn in [62] haben sich die bestehenden Maschinenkonzepte, insbesondere Bearbeitungszentren, weiterentwickelt, so dass die damals aufgestellten Annahmen nicht unbesehen übernommen werden dürfen. Unter welchen Bedingungen und auf welche Weise rekonfigurierbare WZMn in der Produktion ökonomisch sinnvoll und gewinnbringend eingesetzt werden können, wurde bis heute nicht stichhaltig dargelegt. *Ein erstes Teilziel dieser Arbeit ist folglich eine Beschreibung von Einflussparametern auf die Wirtschaftlichkeit rekonfigurierbarer WZMn sowie darauf aufbauend ein Satz von Einsatzszenarien, in denen rekonfigurierbare WZMn nachweislich einen wirtschaftlichen Vorteil bringen.*

Die Methoden und Werkzeuge zur Rekonfigurierung von WZMn konzentrieren sich bislang auf spezielle, abgegrenzte Aspekte, zum Beispiel die Erstellung einer geeigneten Kinematik zur Bearbeitung eines gegebenen Werkstücks oder die korrekte Beschreibung funktionaler Abhängigkeiten. Es wurde weder ein Vorgehen beschrieben noch ein Werkzeug vorgestellt, das die Rekonfigurierung einer WZM inklusive automatisierter Erstellung einer funktionierenden Steuerungskonfiguration für NC und PLC abdeckt. Bisherige Forschungsarbeiten an realen Maschinen fokussieren auf mechanische Schnittstellen und klammern den Aspekt der Steuerungstechnik aus, indem sie auf im Voraus konventio-

nell erstellte Steuerungsarchive zurückgreifen. Steuerungsorientierte Arbeiten behandeln zwar die automatisierte Steuerungskonfiguration, das jedoch rein auf PLC-Ebene (Maschinenlogik) und ohne Einbezug physikalischer Eigenschaften von Maschinenmodulen. Das aber ist eine notwendige Voraussetzung für die Maschineninbetriebnahme. Kein existierendes Rekonfigurierungswerkzeug beinhaltet Angaben zur Physik, die für die Vorhersage des Maschinenverhaltens benutzt werden können. Simulationsprogramme wiederum, die anhand physikalischer Daten das Maschinenverhalten vorhersagen können, sind sehr allgemein gehalten und nicht auf konkrete Modulbeschreibungen zugeschnitten. Zudem sind letztere für den Einsatz in der Entwicklungsabteilung eines Maschinenherstellers und nicht beim Anwender gedacht. Die aus Simulationen gewonnenen Erkenntnisse werden bislang stets zu konstruktiven Verbesserungen eingesetzt, was bei aus Modulen zusammengesetzten rekonfigurierbaren Maschinen allerdings konzeptbedingt nicht möglich ist. *Ein zweites Teilziel ist somit ein Ansatz für ein integriertes Rekonfigurierungstool zur einfachen Erstellung und Analyse von Maschinenmodellen auf Basis von Modulen, deren Informationen zur Generierung dazu passender Steuerungskonfigurationen verwendet werden und ohne externe Unterstützung bei der Inbetriebnahme zu einer funktionsfähigen Maschine führen.* Die einzustellenden Parameterwerte werden dabei automatisch aus den Modelldaten berechnet.

Es ist keine rekonfigurierbare WZM bekannt, die konsequent aus Modulen aufgebaut ist. Die bisher realisierten Konzeptmaschinen zielen auf spezielle Aspekte der Rekonfigurierbarkeit, behandeln die Modularität jedoch nur in beschränktem Mass. *Ein drittes Teilziel sind demnach physische Maschinenmodule, die in unterschiedlichen Kombinationen in einer Maschinenhalle zu einer WZM zusammengesetzt werden können.* Die entstehenden Maschinenvarianten dienen zudem zur Überprüfung der generierten Steuerungskonfigurationen und Maschinenmodelle.

Das vierte und letzte Teilziel ist schliesslich der Nachweis, dass die vorgeschlagene Methodik prinzipiell funktioniert. Dazu werden verschiedene Konfigurationsvarianten aufgebaut und mit geeigneten Tests auf Funktion inklusive Präzision hin untersucht. Es soll gezeigt werden, dass mit Hilfe der vorbereiteten Konfigurationsdaten eine entsprechend geschulte Person in der Lage ist, eine Maschine aus Modulen zusammenzusetzen und vollständig in Betrieb zu nehmen.

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich an den vier genannten Teilzielen, die in der selben Reihenfolge wie hier aufgezählt behandelt werden.

3 Einsatzszenario

In diesem Kapitel wird ein mögliches Szenario für den Einsatz rekonfigurierbarer WZMn diskutiert. Ziel ist die Beschreibung eines Szenarios, in dem die Fertigung mit einer rekonfigurierbaren WZM nachweislich einen wirtschaftlichen Vorteil bietet.

Dazu werden eingangs die Charakteristika von WZMn analysiert und konzeptbedingte Unterschiede zwischen herkömmlichen und rekonfigurierbaren WZMn aufgezeigt. Danach werden Kosten und Nutzen der verschiedenen Konzepte untersucht und deren Parameter evaluiert. Aus den Ergebnissen der beiden vorangehenden Abschnitte werden dann kritische Faktoren zur Beeinflussung der Wirtschaftlichkeit bestimmt.

3.1 Charakterisierung von Werkzeugmaschinenklassen

Jede WZM besitzt bestimmte Eigenschaften und Merkmale, anhand derer sie sich charakterisieren lässt. Von Interesse sind nun die Charakteristika, welche eine für diese Arbeit sinnvolle Klassifizierung erlauben. Die wesentlichen Unterschiede zwischen den Werkzeugmaschinenklassen werden abschliessend genauer analysiert.

3.1.1 Betrachtete Werkzeugmaschinenklassen

Es existiert keine detaillierte Klassifizierung für WZMn, die allgemein anerkannt ist und auf die einheitlich Bezug genommen wird. Der Grund dafür ist in der grossen Vielfalt an Maschinen zu suchen, die sich in Konzept und Funktionsumfang so stark unterscheiden, dass sich je nach eingenommener Sicht ganz andere Gruppen ergeben. Üblicherweise werden die in DIN 8580 [28] definierten Fertigungsverfahren für eine Grobeinteilung herangezogen, z.B. in WZMn für spanende oder umformende Bearbeitung.

Die folgenden Überlegungen sind auf spanende WZMn fokussiert, da diese in der mechanischen Fertigung sehr weit verbreitet und folglich sehr anschaulich sind. Wie aus Abschnitt 2.2 ersichtlich ist, beschränkt sich die wenige maschinenbezogene Forschung bis heute ebenfalls auf diese Art von Maschinen. Für diese Untersuchung bietet sich eine Unterscheidung in drei Klassen an, die sich am Grad der Wandelbarkeit orientiert.

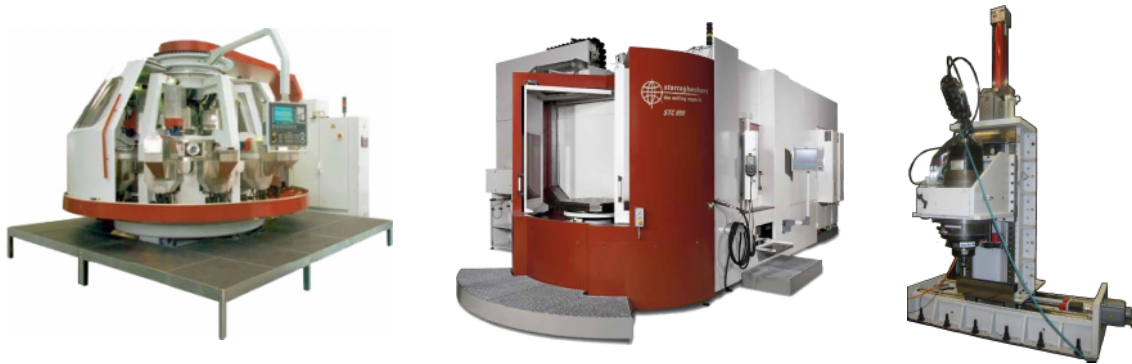


Bild 3.1: Typische Vertreter der untersuchten Maschinenklassen: Eine Rundtaktmaschine (links, Quelle: Hug Maschinenfabrik) als Sondermaschine, ein 5-Achs Bearbeitungszentrum (Mitte, Quelle: StarragHeckert) für eine herkömmliche WZM und eine Fahrständerkonfiguration (rechts) für die rekonfigurierbaren WZMn.

Sondermaschinen

Sondermaschinen werden in der Serienfertigung eingesetzt und werden auftragsbezogen, das heisst speziell für die Fertigung eines ganz bestimmten Teils, entwickelt. Sie bieten hohe Produktivität bei keiner bis geringer Flexibilität, was zu einem grossen Teil durch den hohen Automatisierungsgrad bedingt ist. Übliche Ausführungen sind Bearbeitungsstationen in Produktionslinien oder Rundtaktmaschinen (Bild 3.1 links), in denen das Werkstück die einzelnen Arbeitsstationen sequentiell durchläuft.

Herkömmliche Werkzeugmaschinen

Diese Klasse fasst auftragsneutrale Serienmaschinen mit CNC-Steuerung zusammen. Da diese Maschinen in höheren Stückzahlen auf Basis einer einheitlichen Grundkonstruktion hergestellt werden, bezeichnet man sie auch als Standardmaschinen. Sie zeichnen sich durch hohe Flexibilität und dadurch vielseitige Einsetzbarkeit aus. Bearbeitungszentren (Bild 3.1 Mitte) finden sich als Einzelmaschinen für Werkstattfertigung, wie auch in flexiblen Fertigungszellen (FFZ) als verkettete Stationen mit hohem Automatisierungsgrad.

Rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen

Den höchsten Grad der Wandelbarkeit bieten rekonfigurierbare WZMn gemäss der Definition in Abschnitt 2.1.2. Diese Maschinen werden zwar jeweils für eine bestimmte Aufgabe projektiert, können aber trotzdem einen gewissen Grad an Flexibilität bieten und zudem schnell und mit geringem Aufwand für andere Aufgaben umgebaut werden. Vertreter dieser Maschinenklasse existieren bisher nur als Forschungsobjekte oder Prototypen.

3.1.2 Merkmale zur Beschreibung von Werkzeugmaschinen

Um Unterschiede zwischen einzelnen WZMn untersuchen zu können, müssen diese geeignet beschrieben werden. Für die angestrebte Analyse muss die Beschreibung anhand von Eigenschaften und Merkmalen erfolgen, mit denen eine Maschine allgemein, also ohne Bezug auf eine konkrete Bearbeitungsaufgabe, charakterisiert werden kann. Diese Merkmale lassen sich in zwei Gruppen kategorisieren: In technische und in betriebliche Merkmale.

Technische Merkmale

Die Beschreibung der technischen Umsetzung einer WZM und der von ihr gebotenen Funktionalitäten und eingesetzten Technologien lässt sich unter technischen Merkmalen zusammenfassen. Bild 3.2 veranschaulicht die acht Blöcke, die für eine umfassende Beschreibung herangezogen werden. Die einzelnen Merkmale, welche die Blöcke umfassen, sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Je nach Art lassen sie sich durch Nominal- oder Kennwerte quantifizieren oder qualitativ beschreiben.

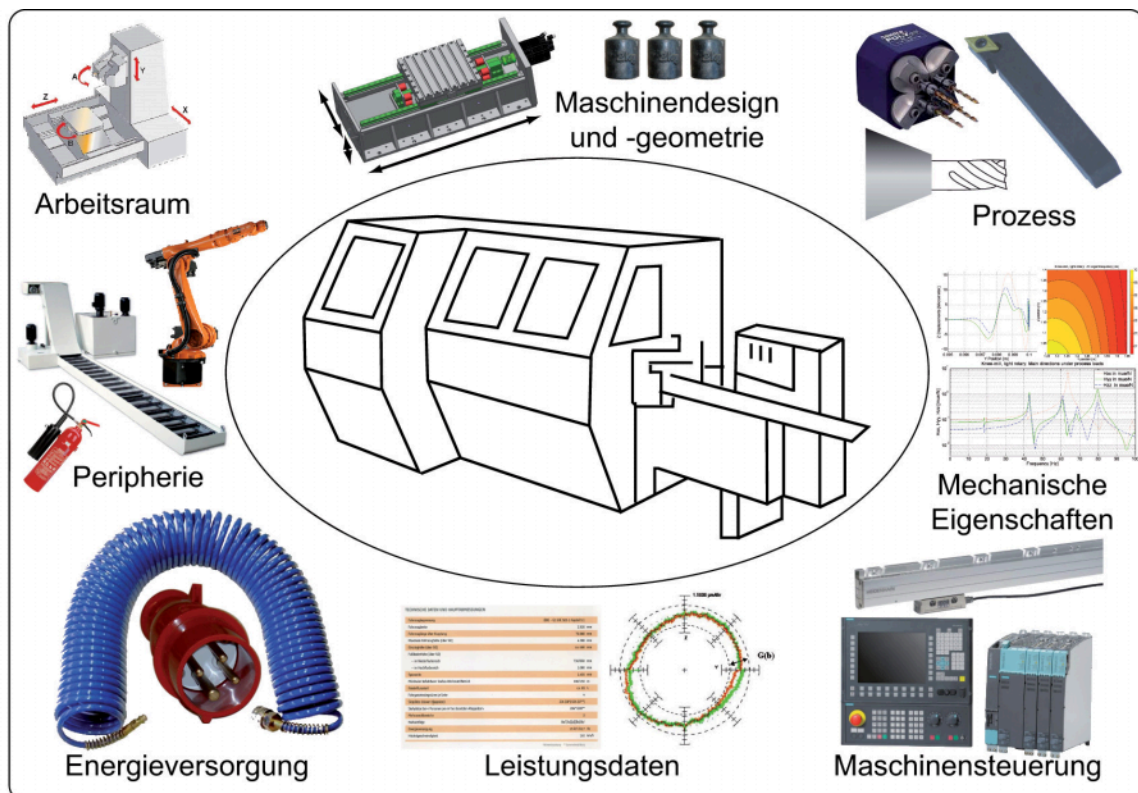


Bild 3.2: Die technischen Merkmale zur Beschreibung von WZMn lassen sich in acht Blöcke einteilen.

Tabelle 3.1: Technische Merkmale zur Beschreibung von Werkzeugmaschinen

Maschinen- design und -geometrie	<ul style="list-style-type: none"> • Bauweise (Grundstruktur) • Standardisierungsgrad • Material (Gestell, Bett) • Gesamtmasse 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufstellfläche, Aufstellhöhe • Aufstellart <ul style="list-style-type: none"> – 3-Punkt – Fundament
Prozess	<ul style="list-style-type: none"> • implementierte Verfahren <ul style="list-style-type: none"> – Kombinationsmöglichkeiten – Integrationsmöglichkeiten • bearbeitbare Materialien • Bearbeitungsschritte <ul style="list-style-type: none"> – Reihenfolge, Anzahl – Komplexität • Verkettungsmöglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • bearbeitbares Teilespektrum • Werkstückspannsystem • verfügbare Werkzeuge <ul style="list-style-type: none"> – Spannfutter – Mehrfachbohrkopf • Werkzeugbruchererkennung • Verschleissererkennung
Arbeitsraum	<ul style="list-style-type: none"> • Art der Achsen • Anzahl der Achsen • Achsanordnung, Kinematik • Verfahrswege der Achsen 	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl der WZ-Spindeln • Störvolumen • Maximale WS-Masse
Leistungs- daten	<ul style="list-style-type: none"> • WZ-Spindelleistung • WZ-Spindeldrehzahl • WZ-Spindeldrehmoment • Max. Achsgeschwindigkeit • Max. Achsbeschleunigung 	<ul style="list-style-type: none"> • Genauigkeit <ul style="list-style-type: none"> – Positionierung – Wiederholung – Driftverhalten
Mechanische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Eigenfrequenzen • Eigenformen • Steifigkeit am TCP • Dämpfungsverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermisches Verhalten <ul style="list-style-type: none"> – Warmlaufdauer – Dauerbetrieb
Maschinen- steuerung	<ul style="list-style-type: none"> • Hersteller, Typ • Anzahl der Regelkreise • Anzahl unabhängiger Kanäle • Schnittstellen, Bussystem 	<ul style="list-style-type: none"> • Messsysteme <ul style="list-style-type: none"> – Art (direkt/indir., abs./ink.) – Auflösung • Sonderfunktionen
Peripherie	<ul style="list-style-type: none"> • WZ-Wechsler • WS-Wechsler • Handhabungsroboter • Späneförderer 	<ul style="list-style-type: none"> • KSM-Anlage • Spezielle Medien • Nebelabsaugung • Feuerlöschanlage
Energie- versorgung	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrik <ul style="list-style-type: none"> – Leistungsaufnahme – Anzahl der Umrichter 	<ul style="list-style-type: none"> • Druckluft • Hydraulik • Hochdrucksysteme

Maschinendesign und -geometrie: Diese Merkmale ergeben sich aus dem Maschinenkonzept und der Konstruktion. Eine Maschinengrundstruktur kann in Integral- oder Modularbauweise ausgeführt sein, wohingegen Baugruppen in der Regel modular sind. Unabhängig davon wird der Standardisierungsgrad angegeben, der sich durch die Verwendung standardisierter Baugruppen oder Aggregate und das Vorhandensein definierter Schnittstellen ergibt. Weitere Merkmale sind das verwendete Material – insbesondere für Maschinenbett und -gestell – sowie die Art der Konstruktionsausführung (Guss-, Schweisskonstruktion). Quantitativ lassen sich die resultierende Gesamtmasse der Maschine sowie die erforderliche Aufstellfläche und -höhe angeben. Für die Aufstellung ist zudem relevant, ob die Maschinenstruktur eigensteif ist und mit einer 3-Punkt-Aufstellung auskommt oder ob sie ein Fundament benötigt.

Prozess: Hier sind Merkmale zu dem auf der Maschine möglichen Fertigungsprozess aufgeführt. Charakteristisch für jede Maschine ist, welche Verfahren auf ihr implementiert sind und ob bzw. wie diese kombiniert oder integriert werden können. Der Prozess ist die Anwendung eines Verfahrens auf ein Werkstück [143], daher muss bekannt sein, welche Werkstoffe die Maschine bearbeiten kann. Die Reihenfolge, Anzahl und Komplexität der ausführbaren Bearbeitungsschritte sind zur Beschreibung sinnvoll. Wichtige Informationen für die Prozessplanung sind zudem die Verkettungsmöglichkeiten, das auf der Maschine bearbeitbare Teilespektrum sowie Informationen über vorhandene Werkstückspannsysteme und Vorrichtungen zur Werkzeugbruch- oder Verschleisserkennung. Anzugeben sind auch die verfügbaren Werkzeuge, das vorhandene Spannfutter sowie die Möglichkeit zur Verwendung von Mehrfachbohrköpfen und ähnlichen Werkzeugapparaten zur Parallelisierung von Bearbeitungsaufgaben.

Arbeitsraum: Unter diesem Punkt sind Merkmale zusammengefasst, die die Maschinenachsen und den Raum für die Werkstückbearbeitung betreffen. Die Kinematik beschreibt die Anordnung der verfahrbaren Achsen im Raum. Für jede Achse wird die Art (linear, rotatorisch) sowie ihr Verfahrensweg spezifiziert. Einschränkungen für das Werkstück ergeben sich aus der maximal zulässigen Werkstückmasse sowie dem Störvolumen, also den maximal zulässigen Abmessungen des Werkstücks. Schliesslich ist für die Aufspannung und Bearbeitung eines Werkstücks die Anzahl der gleichzeitig im Eingriff befindlichen Werkzeugspindeln ein Differenzierungsmerkmal.

Leistungsdaten: Dieser Block beinhaltet messbare, technische Daten der eingebauten Komponenten. Sie lassen sich alle quantitativ mit Nominalwerten angeben. Zu den Angaben über die Werkzeugspindel zählen die Spindelleistung, die Nenn- und Maximaldrehzahl sowie das Nenn- und Maximaldrehmoment der Spindel. Bei den Bewegungsachsen interessieren die maximale Achsgeschwindigkeit v_{max} bzw. ω_{max} sowie die maximale Achsbeschleunigung a_{max} bzw. $\dot{\omega}_{max}$. Die Präzision einer WZM lässt sich über die Positioniergenauigkeit und die Wiederholgenauigkeit beschreiben.

Mechanische Eigenschaften: Wie der vorangehende enthält auch dieser Block messbare oder berechenbare Werte, die in diesem Fall jedoch das Gesamtsystem betreffen. Charakteristische Eigenschaften sind die Eigenfrequenzen mit den zugehörigen Eigenformen, die Steifigkeit am TCP bzw. die Nachgiebigkeit der Struktur sowie das Dämpfungsverhalten. Eine weitere relevante Eigenschaft ist das thermische Verhalten der Maschinenstruktur, vor allem im Warmlauf und im Dauerbetrieb.

Maschinensteuerung: Die Steuerungen der grossen, marktbeherrschenden Hersteller sind proprietäre Systeme, die sich für den Anwender vor allem über die Benutzeroberfläche und damit die Bedienung unterscheiden. Dafür und für die Einbindung in die Maschinenlandschaft in der Fertigung interessieren der Hersteller und der Typ der Steuerung. Für eventuelle Erweiterungen und Modifikationen der Maschinen sind Angaben über die Anzahl der Regelkreise und die Anzahl unabhängiger Kanäle sowie die vorhandenen Schnittstellen und Bussysteme nötig. Zusätzliche Informationen liefern Angaben über die Auflösung der Messsysteme und ihre Art(direkt/indirekt, absolut/inkrementell). Die Einsatzmöglichkeiten einiger Maschinen können durch Sonderfunktionen erweitert sein.

Peripherie: Hierunter werden alle Systeme verstanden, die nicht zum eigentlichen Bearbeitungsprozess gehören, dazu aber nötig sind oder ihn unterstützen. Viele Maschinen verfügen über Vorrichtungen zum automatisierten Wechsel von Werkzeugen oder Werkstücken, womit sich die Nebenzeiten verkürzen lassen. Späneförderer werden für schnellen und zuverlässigen Spänetransport aus dem Arbeitsraum heraus benötigt. Dessen Ausführung und Leistungsfähigkeit beeinflussen das thermische Verhalten der Maschine. Je nach implementiertem Verfahren benötigt eine WZM eine Kühlschmiermittelanlage (KSM-Anlage), spezielle Medien (z.B. Dielektrikum), eine Nebelabsaugung oder eine Feuerlöschanlage.

Energieversorgung: Hier werden alle für den Maschinenbetrieb benötigten und von der Maschine zur Verfügung gestellten Energien spezifiziert. Die Elektrik bezieht sich auf den Schaltschrank, dort sind im Wesentlichen die Leistungsaufnahme der gesamten Maschine sowie die Anzahl der Umrichteranschlüsse relevant. Für die Druckluft und die Hydraulik werden Angaben zum Massenstrom und zum Betriebsdruck benötigt. Auch Informationen über eventuell vorhandene Hochdrucksysteme werden hier aufgeführt.

Betriebliche Merkmale

Die betrieblichen Merkmale umfassen sowohl organisatorische als auch wirtschaftliche Aspekte. Bild 3.3 zeigt beide Aspekte mit ihren Merkmalsblöcken.

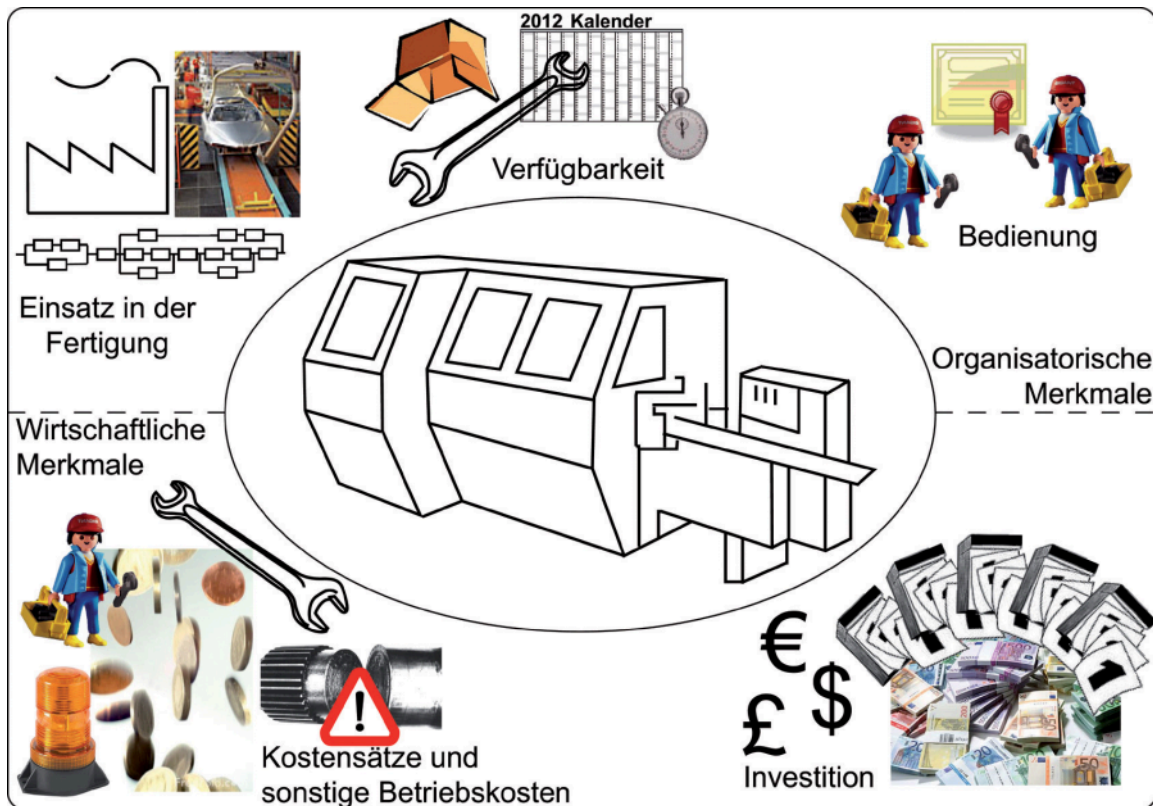


Bild 3.3: Die betrieblichen Merkmale zur Beschreibung von WZMn können in organisatorische und wirtschaftliche Aspekte unterschieden werden.

In Tabelle 3.2 sind die **organisatorischen Merkmale** aufgelistet. Sie sind aus produktionsplanerischer Sicht von Bedeutung, da sie den Spielraum für den Einsatz festlegen.

Tabelle 3.2: Betriebsorganisatorische Merkmale zur Beschreibung von WZMn

Einsatz in der Fertigung	• Fertigungsart, Seriengröße	• Einrichtaufwand
	• Fertigungsprinzip, Anlagenlayout	• Anpassungsmöglichkeiten
	• Verkettung/Anbindung	• Mobilität
Bedienung	• Personalbedarf	• erforderliche Infrastruktur
	• Personalqualifikation	• Autonomie
Verfügbarkeit	• technisch	• fixe Belegung
	• organisatorisch	

Einsatz in der Fertigung: An den Kategorien der Fertigungsart lässt sich ablesen, für welche Seriengrößen eine Maschine geeignet ist. Das Fertigungsprinzip beschreibt

ihre räumliche Zuordnung zum Produktionsprozess. Zusammen mit Informationen zur Verkettung bzw. Anbindung ist ersichtlich, wie eine Maschine in die Fertigungsstruktur eingebunden ist. Die Bandbreite an Produkten, für deren Fertigung eine Maschine genutzt werden kann, hängt von den Möglichkeiten zur Anpassung an unterschiedliche Teile- und Prozessspezifikation sowie dem zur Maschineneinrichtung erforderlichen Aufwand ab, was auch für die zeitliche Planung relevant ist. Im Hinblick auf die Wandelbarkeit von Fabrikstrukturen ist eine Beschreibung für die Mobilität einer Maschine und der für den Betrieb erforderlichen Infrastruktur nötig.

Bedienung: Die Bedienung bezieht sich auf die Quantität und Qualität des Personals sowie die Häufigkeit erforderlicher Eingriffe durch Personal. Anzugeben ist der Personalbedarf für die Bedienung einer Maschine und damit verbundene Tätigkeiten. Die Personalqualifikation definiert die Anforderungen an die Ausbildung und den Wissensstand. Unter dem Merkmal Autonomie wird die Häufigkeit des Benutzereingriffs für einen reibungslosen Fertigungsablauf verstanden, sei es zur Bedienung der Maschine (starten, quittieren, überwachen etc.), sei es zur Versorgung der Maschine mit Werkstücken, Werkzeugen oder anderen Betriebs- und Betriebshilfsmitteln.

Verfügbarkeit: Wesentliche Eigenschaften einer Maschine sind die technische und die organisatorische Verfügbarkeit, wie sie nach VDI 3423 [137] berechnet werden. Für die Einsatzplanung muss zudem bekannt sein, welcher Anteil der Nutzungszeit für die Auftragseinlastung frei verfügbar ist und wieviel Zeit für langfristige oder wiederkehrende Fertigungsaufträge reserviert ist.

Tabelle 3.3 zeigt die **wirtschaftlichen Merkmale**. Damit werden die für den Betrieb über den Betriebszeitraum anfallenden Kosten beschrieben. Auch Angaben für die Herleitung kalkulatorischer Grössen sind darin enthalten.

Tabelle 3.3: Betriebswirtschaftliche Merkmale zur Beschreibung von WZMn

Investition	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionssumme • Abschreibungsmöglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionssicherheit • Geplante Nutzungsdauer
Kostensätze und sonstige Betriebskosten	<ul style="list-style-type: none"> • Maschinenstundensatz • Lohnstundensatz 	<ul style="list-style-type: none"> • Wartungskosten • Instandsetzungskosten • Ausfallkosten (Panne)

Investition: Bei der Investition wird neben der Investitionssumme auch die Investitionssicherheit beurteilt. Dabei handelt es sich um eine Bewertung der erwarteten Nutzungsmöglichkeiten und der Nutzungsdauer, welche für sich genommen ebenfalls spezifiziert wird. Aus buchhalterischer Sicht sind Informationen zu den Abschreibungsmöglichkeiten nötig.

Kostensätze und sonstige Betriebskosten: Dieser Block beschreibt die während des Betriebs anfallenden Kosten. Eine herausragende Rolle bei der Wahl eines Fertigungsmittels spielen der zugeordnete Maschinenstundensatz und der Lohnstundensatz für das erforderliche Personal. Wartungs-, Instandsetzungs- und Ausfallkosten – oftmals durch Schätzung oder mit Hilfe von Erfahrungswerten ermittelbar – komplettieren die kostenseitige Charakterisierung.

3.1.3 Charakterisierung der Maschinenklassen

Nachdem im vorangehenden Abschnitt die Merkmale zur Beschreibung von WZMn erläutert wurden, kann nun herausgearbeitet werden, wodurch sich die in Abschnitt 3.1.1 eingeführten Werkzeugmaschinenklassen auszeichnen. Zu diesem Zweck werden die Maschinenklassen über die Merkmale hinweg miteinander verglichen. Dadurch lassen sich die Unterschiede zwischen den einzelnen Klassen aufzeigen. Der besseren Lesbarkeit halber werden den drei Maschinenklassen Buchstaben zugeordnet: Sondermaschinen bilden die Klasse A, herkömmliche WZMn die Klasse B und rekonfigurierbare WZMn die Klasse C.

Technische Merkmale

Tabelle 3.4 zeigt eine Übersicht der technischen Unterschiede der drei Maschinenklassen. Unterschiede im Maschinendesign und der Maschinengeometrie sind hauptsächlich auf die Bauweise und den damit einhergehenden Standardisierungsgrad zurückzuführen. Bei Maschinen der Klasse C können sich aufgrund der Rekonfigurierbarkeit auch physikalische Eigenschaften wie Material, Masse, Aufstellmasse und Aufstellart verändern.

Die Prozessmerkmale variieren in allen Klassen von Maschine zu Maschine in der Art und im Umfang. Markante Unterschiede sind in der Bearbeitungsfolge und -effizienz zu sehen sowie in der nachträglichen Anpassbarkeit der Verfahren bei Maschinen der Klasse C.

Auch die Arbeitsraummerkmale lassen sich bei Maschinen der Klasse C anpassen. Charakteristisch ist zudem die aufgabenbezogene Ausrichtung bei Maschinen der Klassen A und C im Gegensatz zur universellen Verwendung von Maschinen der Klasse B.

Die Leistungsdaten und die mechanischen Eigenschaften sind bei Maschinen der Klasse C prinzipbedingt nicht auf optimale Performance ausgelegt, lassen sich aufgrund des Modulardesigns aber variieren. Dafür ist erstens die Energieversorgung mit Reserve dimensioniert und zweitens die Maschinensteuerung durch den Anwender selbst parametrierbar. Letzteres umfasst auch Möglichkeiten zur Kompensation suboptimalen Verhaltens.

Die für den Betrieb erforderliche Peripherie ist bei allen drei Klassen stark maschinen- bzw. prozessabhängig. Sie wird bei Bedarf angepasst. Die Unterschiede sind in der konzeptionellen Ausrichtung, dem Produktionsumfeld und dem Automatisierungsgrad begründet.

Tabelle 3.4: Technische Unterschiede der betrachteten Maschinenklassen

	Sondermaschinen Klasse A	Herkömmliche Werkzeugmaschinen Klasse B	Rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen Klasse C
<i>Maschinendesign und -geometrie</i>			
Bauweise	Integraldesign	Integraldesign	Modulardesign
Standardisierungsgrad	gering	mittel	hoch
restliche Merkmale	unveränderlich	unveränderlich	konfigurationsabhängig
<i>Prozess</i>			
Implementierte Verfahren	unveränderlich	unveränderlich	anpassbar
Anzahl implementierter Verfahren	1 . . . n	1 oder 2	1 . . . n
Bearbeitungsschritte	sequentiell, parallel	sequentiell	sequentiell, parallel
Teilekomplexität	mittel	hoch	niedrig
Verkettung bearbeitbares Teilespektrum	üblich/Standard klein (1 Teil)	beschränkt möglich gross	möglich mittel (Teilefamilie)
Mehrfachbohrkopf	häufig eingesetzt	selten eingesetzt	Einsatz möglich
<i>Arbeitsraum</i>			
Anzahl der Achsen	viele	3 – 5	2 – n
Kinematik	aufgabengerecht, seriell	orthogonal, seriell	aufgabengerecht, seriell
Anzahl der WZ-Spindeln	viele	1	1 - mehrere
Störvolumen	teilespezifisch	zylindrisch, kubisch	teilespezifisch
<i>Leistungsdaten</i>			
Maximale Achsgeschwindigkeit	mittel	hoch	mittel
Maximale Achsbeschleunigung	mittel	hoch	mittel
<i>Mechanische Eigenschaften</i>			
	unveränderlich optimiert	unveränderlich optimiert	beeinflussbar suboptimal
<i>Maschinensteuerung</i>			
Parametrierung	komplett durch Hersteller konfiguriert		durch Anwender möglich
<i>Peripherie</i>			
WZ-Wechsler	selten vorhanden	vorhanden	optional
WS-Wechsler	vorhanden	optional	optional
Handhabungsroboter	häufig vorhanden	optional	optional
<i>Energieversorgung</i>			
Dimensionierung	genau nach Bedarf		mit Reserve

Betriebliche Merkmale

Die wesentlichen Unterschiede der organisatorischen und wirtschaftlichen Merkmale sind in Tabelle 3.5 aufgeführt. Jede der drei Maschinenklassen eignet sich für unterschiedliche Fertigungsprinzipie und Fertigungsarten. Bestimmend für den Einsatz in der Fertigung sind zudem die Anpassungsmöglichkeiten des jeweiligen Fertigungssystems.

Unterschiede beim Merkmal Bedienung manifestieren sich in der erforderlichen Personalqualifikation, an die bei Maschinen der Klasse C die höchsten Anforderungen gestellt werden. Die erreichbare Autonomie wirkt sich auf die Bedienung aus, hängt jedoch insbesondere von der Verkettung und dem Automatisierungsgrad ab.

Die technische Verfügbarkeit wird grundlegend durch das Designkonzept beeinflusst, da die Gesamtverfügbarkeit von den Einzelverfügbarkeiten der vorhandenen Komponenten abhängt. Die jeweils beabsichtigten Verwendungszwecke führen zu unterschiedlichen Belegungsprofilen in den drei Maschinenklassen.

Die Investitionssumme hängt wesentlich vom auftragsspezifischen Herstelleraufwand ab, der bei Maschinen der Klasse C aufgrund der Standardisierung der Module niedrig ausfällt. Gleichzeitig wirkt sich diese Universalität positiv auf die Investitionssicherheit aus.

Unterschiede bei den Betriebskosten entstehen vor allem durch unterschiedliche Lohnkostensätze aufgrund der Personalqualifikation. Instandsetzungs- und Ausfallkosten hängen hauptsächlich von der Zeit und dem Aufwand für die Fehlerbehebung ab, die mit zunehmender Standardisierung und Modularisierung sinkt.

3.1.4 Analyse der Unterschiede zwischen den Maschinenklassen

Untersucht man die Maschinenklassen auf Unterschiede in den zuvor beschriebenen Merkmalen, so kristallisieren sich vier Blöcke heraus, in denen die Eigenschaften rekonfigurierbarer WZMn unter bestimmten Bedingungen klare Vorteile gegenüber den anderen Maschinenklassen¹ aufweisen.

Die **Prozessmerkmale** sind einzig bei rekonfigurierbaren WZMn mit geringem Aufwand veränderbar. So sind Technologiewechsel auf andere Verfahren oder Kombinationen verschiedener Verfahren realisierbar. Durch Parallelbearbeitung sowie Verwendung von Mehrfachbohrköpfen kann die Zeit je Einheit T_{eB} auf rekonfigurierbaren WZMn deutlich reduziert werden gegenüber herkömmlichen WZMn. Durch Ausrichtung auf Teilefamilien und die Einschränkung auf Teile mit geringer Komplexität positionieren sich rekonfigurierbare WZMn zwischen den beiden anderen Klassen als eine Art von Sondermaschinen, die stets gemäss aktuellen Anforderungen zusammengestellt werden können.

¹Ein expliziter Vergleich mit flexiblen Fertigungszellen wird nicht durchgeführt, da diese über die herkömmlichen Werkzeugmaschinen als Bestandteile einer FFZ berücksichtigt sind.

Tabelle 3.5: Betriebliche Unterschiede der betrachteten Maschinenklassen

	Sondermaschinen Klasse A	Herkömmliche Werkzeugmaschinen Klasse B	Rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen Klasse C
<i>Einsatz in der Fertigung</i>			
Fertigungsart, Seriengrösse	Grossserien- und Massenfertigung ($\gg 1000$ Stück p.a.)	Einzelfertigung, Klein- und Mittel- serienfertigung (1 - 1000 Stück p.a.)	Klein- und Mittel- serienfertigung, evtl. Grossserienfertigung (10 - 10000 Stück p.a.)
Fertigungsprinzip, Anlagenlayout	Fliessfertigung	Werkstattfertigung; Fließfertigung (in FFZ)	Gruppenfertigung; Fließfertigung (in FFZ)
Anpassungsmöglichkeiten	beschränkt	beschränkt	vielfältig
<i>Bedienung</i>			
Personalqualifikation	Bedienung	Bedienung, CNC-Programmierung	Bedienung, CNC-Programmierung, Rekonfigurierung
Produktionsautonomie	hoch	niedrig ... mittel	niedrig ... mittel
<i>Verfügbarkeit</i>			
technische Verfügbarkeit	mittel	mittel	hoch
Anteil der fixen Belegung	sehr hoch	niedrig	mittel ... hoch
<i>Investition</i>			
Investitionssumme	hoch	niedrig ... hoch	niedrig ... mittel
Investitionssicherheit	mittel	hoch	hoch
<i>Kostensätze und sonstige Betriebskosten</i>			
Lohnstundensatz	niedriger	höher	höher
Instandsetzungskosten	hoch	mittel	mittel
Ausfallkosten (Panne)	hoch	mittel	niedrig

Auch die **Arbeitsraummerkmale** können nur bei rekonfigurierbaren WZMn nachträglich angepasst werden. Je nach Aufgabe können die Verfahwege, die Kinematik oder die Anzahl der Werkzeugspindeln variiert werden, um so z.B. die Verwendung eines Mehrfachbohrkopfs zu ermöglichen oder Zustellbewegungen in einer einzigen Richtung zu realisieren und damit Fehler aufgrund geschichteter Achsen und Interpolation zu vermeiden. Bei Sondermaschinen werden diese Überlegungen von Anfang an berücksichtigt, führen dann aber zu einer unveränderlichen Maschine. Herkömmliche WZMn bieten mit ihrer orthogonalen Standardkinematik grösstmögliche Bearbeitungszugänglichkeit im Arbeitsraum.

Durch Modultausch lassen sich bei rekonfigurierbaren WZMn relativ einfach die **Leistungsdaten** verändern. Wird für die Bearbeitung eines Werkstücks aus einem bestimmten Material eine Werkzeugspindel mit anderer Leistung benötigt, kann das Spindelmodul ausgetauscht werden. Bei den beiden anderen Maschinenklassen muss in diesem Fall auf Maschinen ausgewichen werden, die die geforderte Leistung bereitstellen.

Bei den Merkmalen für den **Einsatz in der Fertigung** sticht bei rekonfigurierbaren WZMn hervor, dass sie für mittlere Seriengrößen konzipiert sind, genau dort, wo herkömmliche Maschinen nicht mehr und Sondermaschinen noch nicht rentabel betrieben werden können. Durch die vielfältigen Anpassungsmöglichkeiten rekonfigurierbarer WZMn ist ihr potentieller Einsatzbereich breit. Der grösste Nutzen wird dann gezogen, wenn jede einzelne Aufgabe sehr begrenzte Anforderungen stellt, die verschiedenen Aufgaben aber an weit entfernten Orten des Anforderungsspektrums liegen.

Neben diesen vier klaren Ansatzpunkten bringen möglicherweise auch Eigenschaften aus den folgenden Blöcken Vorteile mit sich: Die Peripherie lässt sich zwar bei allen Maschinen bei Bedarf anpassen. Bei rekonfigurierbaren WZMn ist dieser Vorgang aber unkomplizierter als bei anderen, da die Programmstruktur der Maschinenlogik auf häufige Änderungen ausgerichtet ist. Sind die Zeiten für die Rekonfigurierung ausreichend kurz und zudem Austauschmodule vorhanden, so kann durch schnellen Modultausch anstatt langwieriger Reparatur vor Ort die technische Verfügbarkeit bei rekonfigurierbaren WZMn drastisch erhöht werden. Bei den wirtschaftlichen Merkmalen differenzieren sich rekonfigurierbare WZMn über die Investition. Die Investitionssumme wird niedrig angesetzt, da nur benötigte Module beschafft werden und kaum auftragspezifische Herstellerleistung anfällt. Aufgrund der höheren Investitionssicherheit könnten gerade solche Aufträge bearbeitet werden, für die wegen unsicherer Auslastung keine Sondermaschine angeschafft würde.

3.2 Wertschöpfung

Der Zweck einer WZM ist, ein Rohteil so zu bearbeiten, dass das entstehende Fertigteil eine bestimmte, zuvor nicht vorhandene Funktionalität und damit für den Kunden höheren Wert aufweist. Ein Fertigungsunternehmen benötigt also WZMn, um Wertschöpfung zu betreiben. Je höher die Wertschöpfung ist, die mit einer Maschine bei gegebenen Kosten erzielt werden kann, desto profitabler kann sie der Betreiber einsetzen.

Einsatz der Produktionsmittel

Für einen Lohnfertiger sind viele Randbedingungen gegeben: Die Rohteile werden vom Kunden geliefert oder zumindest spezifiziert, die Kosten für Personal, Energie und Betriebsmittel sind regional grösstenteils einheitlich und die Funktionalitäten vieler WZMn sind vergleichbar. Jedem Fertigungsunternehmen stellt sich somit die Frage, wie es möglichst hohe Wertschöpfung mit den vorhandenen Produktionsfaktoren generieren kann.

Antworten darauf müssen unternehmensspezifisch gesucht werden, da auch kleine Unterschiede bei den Produktionsmitteln oder beim Know-How im Unternehmen zu merklich anderen Ergebnissen führen können. Ein Fertigungsunternehmen wird sich demnach um

Aufträge für solche Teile bemühen, die es mit seinen Maschinen und dem Wissen des Personals besonders effizient bearbeiten kann. Im Laufe der Zeit bildet sich oftmals eine Spezialisierung für gewisse Teile heraus, zum Beispiel für die Bearbeitung von Drehteilen, Platten, kubischen oder grossvolumigen Teilen. Ein Lohnfertiger beeinflusst die Rentabilität des Unternehmens bereits bei der Auftragsakquise durch gezielte Auswahl der Teile.

Dynamik durch Innovationen

Ein weiterer Aspekt ist die Dynamik des Marktes aufgrund von Technologie- und Prozessinnovationen, welche zu Substitution, Zusammenfassung oder Elimination von Prozessschritten führen. Unternehmen, die über die neuen Technologien und Prozesse verfügen, können damit eine bestimmte Wertschöpfung bei niedrigeren Kosten als ihre Konkurrenten erzielen. Somit können sie mehr Profit erwirtschaften, der natürlich auch für die Anschaffung von Maschinen oder Anlagen für die neuen Prozesse benötigt wird. Die erwähnten hohen Margen lassen sich aber nur zu Beginn, also solange eine Technologie wirklich neu ist, realisieren. Für ein Unternehmen ist es deshalb wichtig, möglichst früh über diese neuen Prozesse zu verfügen. Schnelligkeit bei der Anpassung der Produktion ist demnach ein entscheidender Faktor, um trotz stetigen Wandels in der Technik konstant hohe Wertschöpfung erzielen zu können. Um die Bedürfnisse der Kunden optimal erfüllen zu können, müssten sich die Produktionsmittel jederzeit anpassen oder austauschen lassen. In der Praxis jedoch ist oftmals weder die kurzfristige Anschaffung einer neuen Maschine noch die schnelle Anpassung einer bestehenden Maschine möglich.

Gerade ein Lohnfertiger ist darauf angewiesen, sich gegenüber seiner Konkurrenz zu differenzieren. Das kann entweder über günstigere Preise geschehen oder über Leistungen, die andere nicht bieten können. In beiden Fällen ist die Wertschöpfung, die auf den vorhandenen Maschinen erzielt werden kann, der Schlüsselfaktor. Hohe Wertschöpfung erfordert den richtigen Prozess zum richtigen Zeitpunkt auf der richtigen Maschine.

3.3 Kostenstruktur und Einflussfaktoren

Die Fertigungsindustrie, insbesondere in der Lohnfertigung, ist stückkostengetrieben. Zwischen den Vertragspartnern werden Stückpreise ausgehandelt. Um konkurrenzfähig zu bleiben und dennoch genügend Gewinn zu erwirtschaften, müssen in einem Fertigungsbetrieb folglich niedrigere Stückkosten anfallen als bei den Wettbewerbern. Im Fokus der Untersuchung stehen daher die Stückkosten für einen gegebenen Auftrag und ihre Zusammensetzung. Von Interesse ist dabei, welche Parameter die Stückkosten auf welche Weise beeinflussen und wie diese Einflussfaktoren mit der Maschinenklasse zusammenhängen. Mit diesen Informationen werden beispielhaft einige Berechnungen durchgeführt.

Der zugrundeliegende Auftrag wird jeweils als unveränderliche Randbedingung aufgefasst. Für die Analyse der Einflussfaktoren werden nun die Parameter identifiziert, durch die sich mit der Wahl der Maschinenklasse die Stückkosten für einen Auftrag beeinflussen lassen. Kosten, die bei allen Maschinenkonzepten identisch anfallen, werden der Übersichtlichkeit halber nach ihrer Identifikation ausgeschlossen und nicht weiter betrachtet. Die Stückkosten ergeben sich, indem die Selbstkosten durch die Auftragsmenge, also die Anzahl der zu fertigenden Teile, dividiert werden. Für einen Vergleich verschiedener Maschinenklassen können folgende Vereinfachungen vorgenommen werden: Der Gewinnzuschlag wird als absoluter Wert angenommen, der unabhängig von der benutzten Maschine gefordert wird. Ebenso werden die Verwaltungs- und Vertriebskosten als identisch für alle Fälle angenommen. Schliesslich können auch die Materialkosten für das Rohteil als fixe Grösse postuliert werden, die allein vom Rohteil und nicht von der für die Bearbeitung eingesetzten Maschine abhängen. Als einzige Stellgrösse in der Kostenstruktur eines Produkts bleiben die Fertigungskosten übrig, die in Bild 3.4 rot hervorgehoben sind.

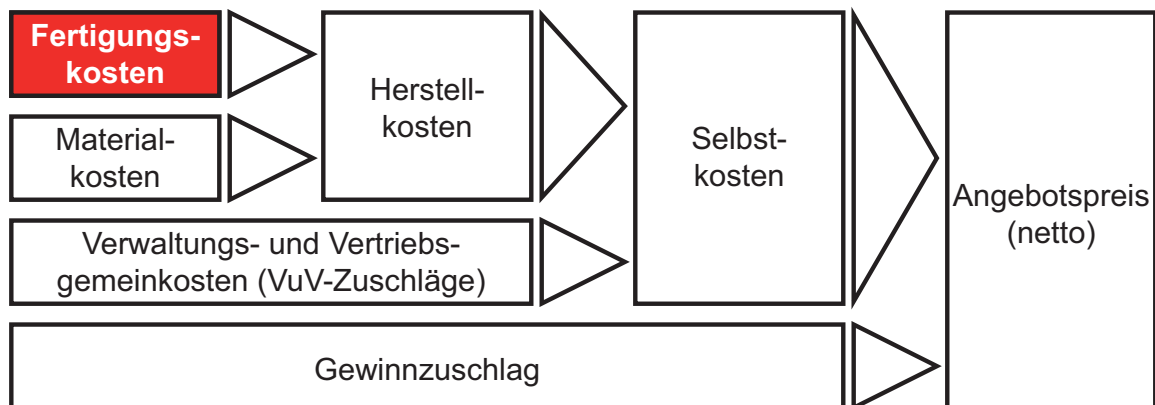


Bild 3.4: Kostenstruktur eines Produkts [143]. Rot hervorgehoben ist der Kostenblock, der durch die Wahl der Maschinenklasse beeinflusst werden kann.

Die Fertigungskosten K_F setzen sich nach [136] aus den Maschinenkosten K_M , den Werkzeugkosten K_W , den Lohn- und Lohnnebenkosten K_L sowie den Rest-Fertigungsgemeinkosten K_x zusammen (3.1). Letztere ergeben sich aus Kosten, die für den gesamten Betrieb anfallen und keinem Kostenträger eindeutig zugeordnet werden können. Sie werden nach einem betriebseigenen Schlüssel auf die Kostenträger verteilt und können deshalb wieder für alle Maschinenklassen als identisch angesehen werden.

$$K_F = K_M + K_W + K_L + K_x \quad (3.1)$$

K_F	Fertigungskosten	K_M	Maschinenkosten	K_L	Lohn- und Lohnnebenkosten
		K_W	Werkzeugkosten	K_x	Rest-Fertigungsgemeinkosten

Somit verbleiben die Lohn- und Lohnnebenkosten als Produkt aus dem zugehörigen Stundensatz K_{LH} und der Auftragszeit T (3.2), die Maschinenkosten als Produkt aus dem Maschinenstundensatz K_{MH} und der Belegungszeit des Betriebsmittels T_{bB} (3.3) sowie die Werkzeugkosten als Produkt aus der Summe der Werkzeugkosten pro Standmenge $K_{WM,i}$ und der Anzahl notwendiger Werkzeuge $n_{WM,i}$ über alle unterschiedlichen Werkzeuge i für die Ausführung des Auftrags (3.4). Mit Ausnahme der Auftragsmenge m sind alle diese Faktoren maschinen- oder prozessabhängig und müssen deshalb genauer untersucht werden. Die Analyse der Stundensätze und der Zeiten erfolgt nacheinander, so dass die von der Art und vom Aufbau ähnlichen Faktoren gemeinsam behandelt werden.

$$K_L = K_{LH} \cdot T \quad (3.2)$$

$$K_M = K_{MH} \cdot T_{bB} \quad (3.3)$$

$$K_W = \sum_{i=1}^n K_{WM,i} \cdot n_{WM,i} \quad \text{mit} \quad n_{WM,i} = \frac{m}{M_i} \quad (3.4)$$

K_{LH}	Lohn- und Lohnnebenkosten pro Stunde	T	Auftragszeit
K_{MH}	Maschinenstundensatz	T_{bB}	Belegungszeit
$K_{WM,i}$	Werkzeugkosten für WZ i pro Standmenge		
$n_{WM,i}$	Anzahl benötigter Werkzeugsätze für die Bearbeitung der Auftragsmenge		
m	Auftragsmenge	M	Standmenge des WZs i

3.3.1 Kostensätze

Kostensätze werden in Betrieben festgelegt, um Berechnungen zu vereinfachen, indem diese auf fixe oder einfach zu ermittelnde Größen zurückgeführt werden. Sämtliche Kostensätze sind betriebsspezifisch und ein Teil der enthaltenen Parameter sind buchhalterische Größen (Verzinsung, Abschreibungsdauer etc.), die nach betrieblichen Gesichtspunkten gewählt werden. Bei einem Wirtschaftlichkeitsvergleich innerhalb eines Betriebs sind diese Parameter also konstant, wodurch die Analyse der Kostensätze simplifiziert werden kann.

Der zu zahlende Lohnstundensatz K_{LH} ist in einigen Ländern tariflich geregelt, in Deutschland zum Beispiel im Tarifvertrag. Jedoch orientieren sich auch viele andere Unternehmen an den Tarifen, so dass diese in der Mehrheit der Betriebe zur Anwendung kommen. Die ausgehandelten Verträge gelten streng genommen nur für die Unternehmen, die in den Verbänden der aushandelnden Parteien organisiert sind. Auch die Lohnnebenkosten fallen nach gesetzlichen Bestimmungen an. Welche Lohnstufe gezahlt wird, hängt von der erforderlichen Qualifikation des ausführenden Werkers ab. In vielen anderen Ländern, darunter auch der Schweiz, bildet sich zumindest eine Art Marktpreis heraus, den die Arbeitgeber in einer geographischen Region an ihre Arbeitnehmer zahlen müssen, so dass auch hier

ein einheitlicher Stundensatz angenommen werden kann. Für den Vergleich verschiedener Maschinenkonzepte lässt sich die Formel für den Lohnstundensatz somit auf den in (3.5) dargestellten Zusammenhang reduzieren.

$$K_{LH} = f(\text{erforderliche Qualifikation des Werkers}) \quad (3.5)$$

Auch der Maschinenstundensatz enthält viele betriebspezifische Komponenten und die genaue Formel kann von Fall zu Fall variieren. In der Literatur findet man jedoch stets dieselben Grundbestandteile, die in die Berechnungsformel eingehen [32, 142, 98]: Kalkulatorische Abschreibungskosten, kalkulatorische Kapitalkosten, Unterhalts-/Instandhaltungskosten, Raumkosten und Energiekosten. Formel (3.6) berücksichtigt alle genannten Komponenten zur Berechnung des Maschinenstundensatzes, allerdings sind auch leicht abgewandelte Formeln (z.B. Unterhaltskosten als Prozentsatz des Anschaffungspreises) denkbar und kommen zum Einsatz. In der weiteren Betrachtung wird auf die hier zitierte Formel Bezug genommen.

$$K_{MH} = \frac{1}{T_E} \left(\underbrace{\frac{A}{D_N}}_{\text{Abschreibung}} + \underbrace{\frac{A \cdot p}{2}}_{\text{Kapital}} + \underbrace{k_R \cdot F}_{\text{Raum}} + \underbrace{k_{UH} \cdot T_E}_{\text{Unterhalt}} + \underbrace{k_E \cdot P_{eff} \cdot T_E}_{\text{Energie}} \right) \quad (3.6)$$

$$= \frac{1}{T_E} \left[A \left(\frac{1}{D_N} + \frac{p}{2} \right) + k_R \cdot F \right] + k_{UH} + k_E \cdot P_{eff} \quad (3.7)$$

T_E	Einsatzzeit	p	Zinssatz	k_{UH}	Unterhaltskostenfaktor
A	Anschaffungskosten	F	Maschinenfläche	k_R	Raumkostenfaktor
D_N	Nutzungsdauer	P_{eff}	Maschinenleistung	k_E	Energiekostenfaktor

Rein betriebspezifisch, betriebsweit gleich und somit irrelevant als Stellgrösse sind der kalkulatorische Zinssatz p , der Raumkostenfaktor k_R und der Energiekostenfaktor k_E .

Allein von der Maschine hängen die Anschaffungskosten A , die Maschinenfläche F und die effektive Maschinenleistung² P_{eff} ab. Die partielle Ableitung des Maschinenstundensatzes nach der jeweiligen Grösse, gibt die Sensitivität an. Aus (3.8) geht hervor, dass ein höherer Zinssatz und eine kürzere Nutzungsdauer ebenso wie eine kürzere Einsatzzeit das Gewicht des Anschaffungspreises erhöhen. Die von der Maschine eingenommene Fläche gewinnt mit steigendem Raumkostenfaktor und kürzerer Einsatzzeit an Bedeutung, wie (3.9) zeigt. Gemäss (3.10) schliesslich wächst das Gewicht der effektiven Maschinenleistung linear mit dem Energiekostenfaktor.

²Die effektive Maschinenleistung kann als Mittelwert aus der maximal aufgenommenen Leistung P_{Max} und der Leistungsaufnahme im Standby-Betrieb $P_{Standby}$ abgeschätzt werden: $P_{eff} = \frac{P_{Max} + P_{Standby}}{2}$

$$\frac{\partial K_{MH}}{\partial A} = \frac{1}{T_E} \left(\frac{1}{D_N} + \frac{p}{2} \right) \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial K_{MH}}{\partial F} = \frac{k_R}{T_E} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial K_{MH}}{\partial P_{eff}} = k_E \quad (3.10)$$

Sowohl von der Maschine als auch von der Buchhaltung hängen der Unterhaltskostenfaktor k_{UH} und die zur Abschreibung geplante Nutzungsdauer D_N ab. Der Unterhaltskostenfaktor geht nach (3.11) direkt ein, da er bereits als Stundensatz in die Berechnung eingeht. Eine längere Nutzungsdauer wirkt sich gemäss (3.12) mindernd auf den Maschinenstundensatz aus, gleichzeitig nimmt jedoch die Sensitivität quadratisch ab. Mit dem Anschaffungspreis nimmt diese linear zu und mit längerer Einsatzzeit wiederum ab.

$$\frac{\partial K_{MH}}{\partial k_{UH}} = 1 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial K_{MH}}{\partial D_N} = \frac{-1}{D_N^2} \cdot \frac{A}{T_E} \quad (3.12)$$

Die Einsatzzeit T_E schliesslich ist die Zeit, während der eine Maschine grundsätzlich für den Einsatz zur Verfügung steht und mit der somit geplant wird. Wie viele Stunden die Einsatzzeit umfasst hängt grösstenteils von der Betriebsorganisation ab (5-, 6-, 7-Tage-Woche, 1-, 2-, 3-Schichtbetrieb). Allerdings können auch bestimmte Maschinenmerkmale wie die Autonomie einen Einfluss haben. Wie schon bei der Nutzungsdauer verringert auch hier eine längere Einsatzzeit den Maschinenstundensatz, wobei ihr Einfluss quadratisch abnimmt. (3.13) ist weiter zu entnehmen, dass der Anschaffungspreis, der kalkulatorische Zinssatz, die Maschinenfläche und der Raumkostenfaktor gleichgerichtet auf die Sensitivität wirken, die Nutzungsdauer dagegen invers.

$$\frac{\partial K_{MH}}{\partial T_E} = \frac{-1}{T_E^2} \left[A \left(\frac{1}{D_N} + \frac{p}{2} \right) + k_R \cdot F \right] \quad (3.13)$$

Die Erkenntnisse über Kostenkomponenten, deren Sensitivität von mehr als einem Faktor abhängt, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Je höher der Anschaffungspreis einer Maschine ist, desto wichtiger sind lange Einsatzzeit und Nutzungsdauer.
- Je grösser die von einer Maschine eingenommene Fläche ist, desto wichtiger ist eine lange Einsatzzeit.

Um die effektive Gewichtung und die effektive Sensitivität der einzelnen Komponenten bewerten zu können, müssen Zahlenwerte in die Gleichungen eingesetzt werden. Für eine Abschätzung bietet sich eine Untersuchung auf Basis der Grössenordnungen der beteiligten Werte an. Eine exemplarische Analyse mit Erfahrungswerten führt zu dem Ergebnis, dass der Anschaffungspreis und die Energiekosten den grössten Anteil des Maschinenstundensatzes ausmachen. Betrachtet man die Auswirkung einer 10-prozentigen positiven Parametervariation, so zeigt sich, dass diese beim Anschaffungspreis, bei der Nutzungsdauer sowie bei der Einsatzzeit am grössten ist. Bild 3.5 veranschaulicht diesen Sachverhalt.

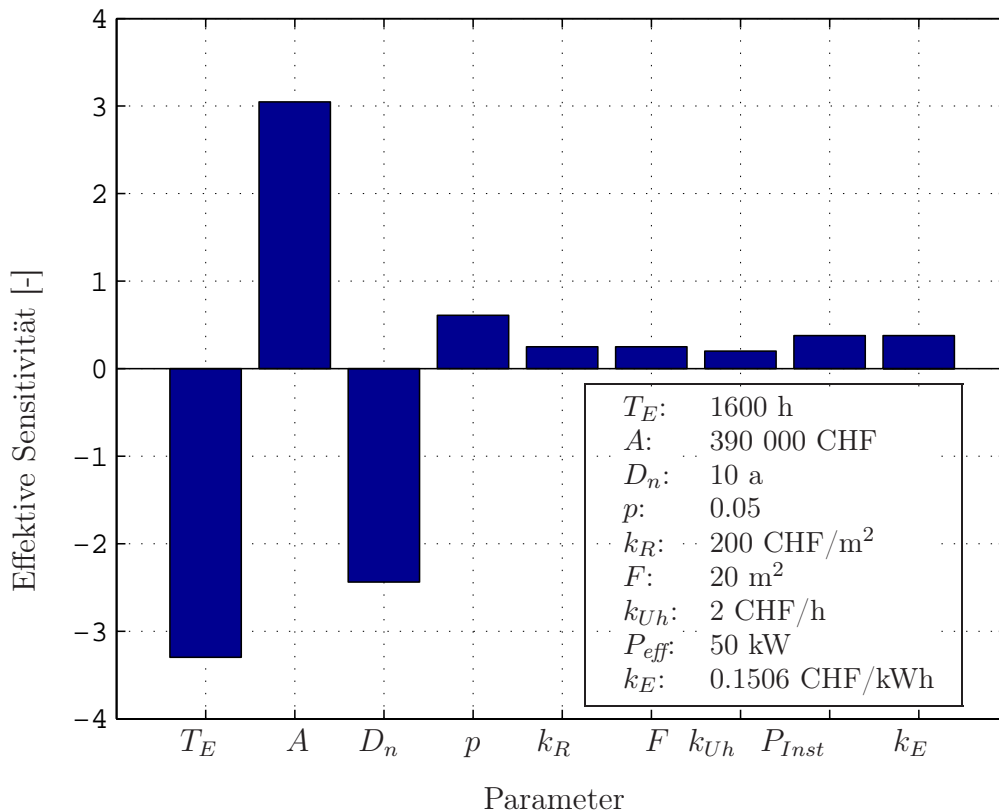


Bild 3.5: Effektive Sensitivität des Maschinenstundensatzes M_h auf eine 10-prozentige positive Änderung der einzelnen Parameter für eine herkömmliche WZM bei 5-Tage-Woche und 1-Schicht-Betrieb.

Je nach Bearbeitungsaufgabe und Maschine werden Werkzeuge mit unterschiedlicher Funktion und Qualität benötigt. Die Werkzeugkosten pro Standmenge $K_{WM,i}$ für ein Werkzeug i werden für alle erforderlichen Werkzeuge mit der jeweils benötigten Anzahl multipliziert und aufsummiert. Der Zusammenhang in (3.14) verdeutlicht, dass die Höhe der Kosten durch geschickte Wahl der verwendeten Werkzeuge beeinflusst werden kann.

$$K_{WM,i} = f(\text{erforderliche WZ-Qualität und Funktion}) \quad (3.14)$$

$$T_S = c_v \cdot v_c^k \quad (3.15)$$

T_S Standzeit c_v Proportionalitätskonstante
 v_c Schnittgeschwindigkeit k Exponent der Steigung

Der Werkzeugverschleiss geht über die Standmenge M und somit die benötigte Anzahl an gleichartigen Werkzeugen $n_{WM,i}$ in die Werkzeugkosten K_W ein. Gemäss der Taylor-Gleichung (3.15) verkürzt sich die Standzeit T_S exponentiell mit der Schnittgeschwindigkeit v_c . Die Schnittgeschwindigkeit ist prozessabhängig und kann somit für den Maschinenvergleich als konstant angesehen werden. Die Standmenge kann die Werkzeugkosten dann beeinflussen, wenn aufgrund von Parallelbearbeitung mit mehreren Werkzeugen die Schnittgeschwindigkeit gesenkt wird und sich somit Standzeit und Standmenge erhöhen.

3.3.2 Zeit

Neben den jeweiligen Kostensätzen werden die Lohnkosten (3.2) und die Maschinenkosten (3.3) durch die Auftragszeit T bzw. die Belegungszeit T_{bB} bestimmt. Die beiden Zeiten sind analog aufgebaut und setzen sich gemäss [32] und [96] aus der Zeit für die Ausführung der Aufgabe und der Zeit für das Rüsten der Maschine zusammen. Zusätzlich ist in den Gleichungen (3.16) und (3.17) ein Zeitanteil für die Rekonfigurierung einer Maschine vorgesehen.

$$T = t_e \cdot m + t_r + t_{reko} \quad (3.16)$$

$$T_{bB} = t_{eB} \cdot m + t_{rB} + t_{rekoB} \quad (3.17)$$

T	Auftragszeit	T_{bB}	Belegungszeit des Betriebsmittels
t_e	Zeit je Einheit	t_{eB}	Betriebsmittelzeit je Einheit
t_r	Rüstzeit	t_{rB}	Betriebsmittelrüstzeit
t_{reko}	Rekonfigurierzeit	t_{rekoB}	Betriebsmittelrekonfigurierzeit

Die Rüstzeiten t_r bzw. t_{rB} hängen in erster Linie vom Teil und der Bearbeitungsaufgabe ab, so dass diese für alle Maschinenklassen als ähnlich angesehen werden. Die Rekonfigurierzeiten t_{reko} bzw. t_{rekoB} fallen nur bei rekonfigurierbaren WZMn an. Um dennoch einen wirtschaftlichen Vorteil zu bieten, muss diese Mehrzeit durch Einsparungen bei der Ausführungszeit überkompensiert werden können. Je höher die Auftragsmenge m ist, desto mehr Hebelwirkung erzielt die Zeit je Einheit t_e bzw. t_{eB} .

$$t_g = t_t + t_w \quad (3.18)$$

$$t_{er} = z_{er} \cdot t_g \quad (3.19)$$

$$t_v = z_v \cdot t_g \quad (3.20)$$

$$t_e = t_g + t_{er} + t_v = t_g \cdot (1 + z_{er} + z_v) \quad (3.21)$$

t_t Tätigkeitszeit t_w Wartezeit z_{er} Erholzeitfaktor z_v Verteilzeitfaktor
 t_g Grundzeit t_{er} Erholungszeit t_v Verteilzeit

Die Erholungszeit t_{er} sowie die Verteilzeit t_v werden üblicherweise über Faktoren bestimmt, die sich auf die Grundzeit t_g beziehen. Nach Einsetzen von (3.18), (3.19) und (3.20) in (3.21) ist die Proportionalität von t_e und t_g klar ersichtlich. Der Verteilzeitfaktor z_v ergibt sich aus der Betriebsorganisation und ist somit identisch für alle Maschinenklassen. Gleiches gilt für den Erholzeitfaktor t_{er} , der von der physischen Anforderung der Arbeitsaufgabe abhängt. Als Stellgrößen bleiben somit die Tätigkeitszeit t_t und die Wartezeit t_w übrig.

$$t_{gB} = t_h + t_n + t_b \quad (3.22)$$

$$t_{vB} = z_v \cdot t_{gB} \quad (3.23)$$

$$t_{eB} = t_{gB} + t_{vB} = t_{gB} \cdot (1 + z_v) \quad (3.24)$$

t_h Hauptnutzungszeit t_n Nebennutzungszeit t_b Brachzeit
 t_{gB} Betriebsmittelgrundzeit t_{vB} Betriebsmittelverteilzeit z_v Verteilzeitfaktor

Nach der selben Überlegung wie bei der Zeit je Einheit t_e verhält sich die Betriebsmittelzeit je Einheit t_{eB} proportional zur Betriebsmittelgrundzeit t_{gB} , deren Bestandteile t_h , t_n und t_b die maschinenseitigen Stellgrößen darstellen.

3.3.3 Sonstige Kosten

Gemäss der Diskussion der Kostenstruktur nach Bild 3.4 dienen nur die Fertigungskosten als Stellgrösse zur Kostenoptimierung. Einige Kostenfaktoren verdienen jedoch zusätzliche Erklärungen, um diese Sicht zu rechtfertigen.

Unter Infrastrukturkosten werden alle Kosten zusammengefasst, die für die Bereitstellung der erforderlichen Infrastruktur für den korrekten Betrieb einer Maschine anfallen. Darunter fallen Kosten für Fundamente, zentrale Kühl- oder Schmiermittelanlagen, Energieanschlüsse in der Werkhalle und sonstige Installationen. Sind diese Kosten nicht einer bestimmten Maschine zurechenbar, werden sie über die Gemeinkosten verrechnet und fallen somit in jedem Fall für alle Maschinen an. Fallen diese Kosten nun explizit für eine im

Vergleich betrachtete Maschine an, ist es sinnvoll, sie dem Anschaffungspreis zuzuschlagen. Da eine Vergleichsrechnung stets für ein bestimmtes Teil durchgeführt wird, bewegen sich die Anforderungen an die Infrastruktur für die zu vergleichenden Maschinen auf ähnlichem Niveau. Die Infrastrukturkosten können somit näherungsweise als eine Konstante für alle Maschinenklassen betrachtet werden.

Durch die Rekonfigurierung entstehen bei rekonfigurierbaren WZMn zusätzliche Kosten gegenüber den anderen Maschinenklassen. Die Kosten für den eigentlichen Rekonfigurierungsvorgang jedoch werden bereits den Lohn- und den Maschinenkosten über die Rekonfigurierzeit t_{reko} und die Betriebsmittelrekonfigurierzeit t_{rekoB} zugerechnet. Je nach Ausgestaltung des Konzepts zur Nutzung von Modulen für rekonfigurierbare WZMn können dann noch Lagerhaltungskosten für die Bevorratung der Module anfallen oder aber für die Logistik von unternehmensübergreifenden Modul-Pools. Im Gegenzug müssen Universalmaschinen, die für vergleichbare Aufgaben eingesetzt werden sollen, mehr Funktionalität vorhalten als für jede Bearbeitungsaufgabe einzeln nötig wäre, was neben der höheren Initialinvestition auch grösseren Platzbedarf nach sich zieht.

3.4 Einsatz rekonfigurierbarer Werkzeugmaschinen

Aus den charakteristischen Merkmalen aus Abschnitt 3.1 und den Einflussfaktoren auf die Fertigungskosten aus Abschnitt 3.3 können nun kritische Faktoren bestimmt werden, über welche die Wirtschaftlichkeit verschiedener Maschinenklassen beeinflusst wird. Damit lassen sich Fertigungsszenarien für den Einsatz rekonfigurierbarer WZMn ableiten, deren Vorteilhaftigkeit anhand einer exemplarischen Kostenrechnung beurteilt wird.

3.4.1 Bestimmung kritischer Faktoren

Aus der Untersuchung der Kostenstruktur geht hervor, dass man die Stückkosten durch niedrige Stundensätze oder kurze Auftrags- bzw. Belegungszeit senken kann. Die Auftrags- und die Belegungszeit werden durch die Auftragsmenge einerseits und die (Betriebsmittel-) Grundzeit andererseits bestimmt. Rekonfigurierbare WZMn bieten nun die Möglichkeit, durch Parallelbearbeitung mit mehreren Spindeln oder Spezialbohrköpfen die Haupt- und Nebenzeiten gegenüber herkömmlichen WZMn drastisch zu reduzieren. In Kombination mit dem Fokus auf 3 – 4-stellige Stückzahlen bei rekonfigurierbaren WZMn ergibt sich ein Einsparpotential, das die zusätzliche Rekonfigurierzeit sogar überkompensieren kann.

Je höher der Automatisierungsgrad einer Fertigungsanlage ist, desto weniger fällt der Lohnstundensatz ins Gewicht. Aufgrund ihrer vielfältigen Anpassungsmöglichkeiten ist die Nutzung rekonfigurierbarer WZMn in automatisierten flexiblen Fertigungssystemen vorstellbar. Die Lohnkosten für den Maschinenbediener können unter diesen Umständen

auf ein Niveau deutlich unter dem für herkömmliche WZMn gesenkt werden. Gleiches gilt, wenn ein hochqualifizierter Maschinenbediener aufgrund der Automatisierung durch eine günstigere, geringer qualifizierte Arbeitskraft ersetzt werden kann. Dabei muss beachtet werden, dass für die Programmierung und die Rekonfigurierung hochqualifiziertes Personal benötigt wird, so dass in diesem Fall unterschiedliche Lohnsätzen anzusetzen sind.

Die Analyse des Maschinenstundensatzes zeigt, dass die Einsatzzeit, die Nutzungsdauer und der Anschaffungspreis einen signifikanten Einfluss haben. Gegenüber Sondermaschinen werden rekonfigurierbare WZMn günstiger in der Anschaffung sein, da sich die Module wirtschaftlicher herstellen lassen als die einzeln angefertigten Komponenten einer Sondermaschine. Ein weiterer Vorteil aus der Modularität rekonfigurierbarer WZMn schlägt sich in der erhöhten Verfügbarkeit nieder. Da fehlerhafte Module schnell ausgetauscht werden können, reduziert sich die Ausfallzeit, wodurch die technische Verfügbarkeit und damit die Nutzungszeit steigen. Im Maschinenstundensatz wirkt sich dies durch einen niedrigeren Unterhaltskostenfaktor aus. Zudem verlängert sich durch den Austausch einzelner Module die Nutzungszeit einer rekonfigurierbaren WZM gegenüber den anderen Maschinenklassen. Technologische Neuerungen können so punktuell ohne längeren Maschinenstillstand implementiert werden, womit sich die hohe Investitionssicherheit begründet.

Lange Einsatzzeiten wirken sich positiv auf den Maschinenstundensatz aus³. Rekonfigurierbare WZMn ermöglichen tendenziell höhere Autonomie als herkömmliche WZMn. Auch ein höherer Automatisierungsgrad kann zur Steigerung der Einsatzzeit beitragen. Rekonfigurierbare WZMn stehen demnach funktional in vielerlei Hinsicht in der Nähe von Sondermaschinen. Die starke Konkurrenz zu herkömmlichen WZMn beruht vor allem auf ihren Anpassungsmöglichkeiten – der Rekonfigurierbarkeit eben.

3.4.2 Ableitung von Fertigungsszenarien

Anhand der in den vorherigen Abschnitten gewonnenen Erkenntnisse lassen sich nun Fertigungsszenarien ableiten, in denen der Einsatz rekonfigurierbarer WZMn wirtschaftlich vorteilhaft ist. Der grosse Einfluss der Betriebsmittelgrundzeit auf die Fertigungsgemeinkosten legt den Gedanken nahe, dass bei einem solchen Szenario durch Parallelbearbeitung anstatt vieler serieller Operationen am Werkstück Zeit und somit Kosten gespart werden können. Als Parallelbearbeitung gilt sowohl der gleichzeitige Eingriff mehrerer Werkzeuge eines Spezialwerkzeugkopfs an einer einzigen Werkzeugspindel (z.B. ein Mehrfachbohrkopf) als auch die gleichzeitige Bearbeitung von mehreren Seiten durch verschiedene Werkzeugspindeln, sowie beides kombiniert. Neben der Zeitersparnis bei der Hauptzeit kann damit auch die Nebenzeit deutlich reduziert werden, da beispielsweise durch die direkte Integration von Werkzeugen in einen Spezialwerkzeugkopf gewisse Werkzeugwechsel eliminiert werden können.

³Auf Umsatz und Gewinn natürlich nur, wenn die Einsatzzeit auch produktiv genutzt wird.

Ein positiver Einspareffekt bei der Zeit je Einheit verstärkt sich mit steigender Auftragsmenge. Da bei rekonfigurierbaren WZMn die Rekonfigurierzeit zusätzlich anfällt, kann der erwähnte Einspareffekt erst ab einer bestimmten Auftragsmenge eintreten, weswegen aussichtsreiche Szenarien in der Mittel- bis Grossserienfertigung angesiedelt werden.

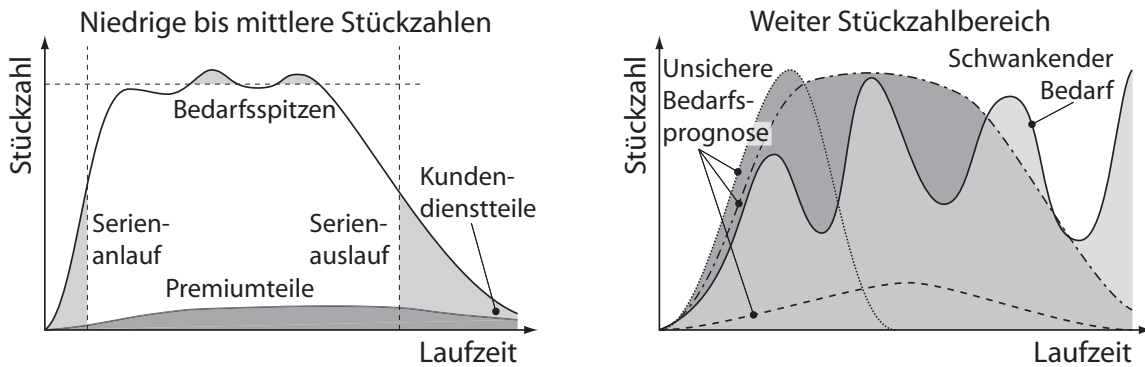


Bild 3.6: Rekonfigurierbare WZMn eignen sich für den Einsatz in der Mittel- und Grossserienfertigung bei niedrigen und mittleren Stückzahlen (links, Darstellung in Anlehnung an Fa. Hackerodt). Auch zur Abdeckung eines weiten Stückzahlbereichs über eine ungewisse Laufzeit können sie eine gute Wahl sein (rechts).

Bild 3.6 zeigt qualitativ verschiedene Stückzahlverläufe, aufgetragen über der Produktlaufzeit, die zu den angesprochenen Stückzahlbedürfnissen führen können. Die linke Graphik zeigt Verläufe, wie sie in der Automobilindustrie häufig vorkommen. Premiumprodukte bewegen sich in einem Bereich von hundert bis wenigen tausend Stück, die oft nur über einen sehr beschränkten Zeitraum produziert werden. Doch auch bei Standardprodukten in Grossserien- oder Massenfertigung gibt es Phasen, in denen das auf die Nominalstückzahl ausgelegte Hauptfertigungsmittel nicht ausgelastet oder überlastet ist. Zu Serienanlauf des Produkts ist der Stückzahlbedarf noch so niedrig, dass die Anlage nicht ausgelastet werden kann. Ähnliches gilt am Ende des Produktlebens, wenn nur noch Kundendienstteile hergestellt werden müssen, dieser Bedarf wird dann in grössere Losmengen gebündelt. Ist das Hauptfertigungsmittel voll ausgelastet, können rekonfigurierbare WZMn für die Bearbeitung von Bedarfsspitzen genutzt werden, die die Kapazität des Hauptfertigungsmittels überschreiten. Auf der rechten Graphik sind Verläufe für stark schwankende Stückzahlbedarfe und unsichere Bedarfsprognosen dargestellt. Bei grosser Schwankungsbreite wird sowohl eine herkömmliche WZM als auch eine Sondermaschine über einen grossen Teil der Laufzeit deutlich suboptimal betrieben. Eine rekonfigurierbare WZM, die entsprechend dem Bedarf für die Fertigung eines Produkts genutzt wird, wird stets nahe an ihrem Optimum betrieben. Bei unsicheren Bedarfsprognosen kann mit einer rekonfigurierbaren WZM die Festlegung auf ein – eventuell falsches – Betriebsmittel umgangen werden, was Fehlinvestitionen vermeidet und die Investitionssicherheit erhöht.

Die Stückzahl wirkt sich über die Grundzeit auch direkt auf die Lohnkosten aus. Ein attraktiver Ansatz bei rekonfigurierbaren WZMn wäre eine deutliche Senkung der Grundzeit durch Automatisierung und Einbindung der Maschine in ein flexibles Fertigungssystem. Liesse sich das für Werkstücke realisieren, die auf herkömmlichen WZMn beispielsweise aufgrund ihrer Geometrie nicht automatisiert und somit nur mit viel Einsatz von Bedienpersonal hergestellt werden können, ergibt sich hier nochmals grosses Einsparpotential.

Die Werkstückgeometrie ist generell ein Merkmal, das je nach Ausprägung zu verschiedenen Szenarien mit dem Einsatz rekonfigurierbarer WZMn führt. Teile, deren Geometrie inkompatibel mit den gängigen Paletten- bzw. Arbeitsraumabmessungen ist, können auf herkömmlichen Maschinen schlecht oder gar nicht und nur zu hohen Kosten bearbeitet werden. Solche Teile, die im Folgenden als exotisch bezeichnet werden, weisen extreme Ausdehnungen in einer oder zwei Dimensionen auf, in den anderen dagegen nur geringe. Konkretes Beispiel ist eine 2 m lange Welle aus einem Stück, die jeweils nur an ihren Enden bearbeitet werden muss, wie sie im Grossmotorenbau vorkommen könnte. Interessant sind auch Teile, deren Bearbeitung mit einem geeigneten Bohrkopf zwar parallelisierbar ist, der jedoch für übliche WZMn und Werkzeugwechsler zu gross ist. Das kann der Fall sein, wenn die Fertigungsmerkmale grossflächig über das Werkstück verteilt sind, beispielsweise bei Flanschlochbohrungen an grösseren Gehäusen. Solche Lochmuster, wie sie an Kurbelgehäusen oder Ölwanne für Motoren zu finden sind, könnten so mit einer Zustellbewegung hergestellt werden. Die genannten Teile sind gleichzeitig Beispiele für Teile mit grossem Volumen, deren Lagerung oft problematisch ist, weshalb es sich nicht rentiert, viele Teile auf Vorrat zu produzieren. Bei ausreichend kurzen Zyklus- und Rekonfigurierzeiten ist es somit denkbar, eine rekonfigurierbare WZM in kurzen Zeitintervallen für das jeweils benötigte Produkt zu konfigurieren und kleinere Losgrössen zu bearbeiten. Losgrössenreduktion ist das Ziel moderner Produktionsphilosophien wie Lean Six Sigma, die dafür nötige schnelle Umrüstung der Linie (Single Minute Exchange of Die, SMED) wird mit rekonfigurierbaren WZMn möglich.

Neben der Werkstückgeometrie ist auch der Werkstoff ein Merkmal, das gewisse Anforderungen an eine Maschine nach sich zieht. Ändert sich nun der Werkstoff für ein Werkstück oder sollen verschiedene Werkstücke aus unterschiedlichen Werkstoffen bearbeitet werden, könnten an einer rekonfigurierbaren WZM stets die Module eingesetzt werden, die die Anforderungen durch den Werkstoff am besten erfüllen. Für eine Schlichtbearbeitung eines Werkstücks aus Aluminium könnte somit eine andere Spindel verwendet werden als für eine Schruppbearbeitung an einem Werkstück aus Gusseisen.

3.4.3 Exemplarische Kostenrechnung

Für die exemplarische Diskussion eines möglichen Szenarios mit Kostenrechnung sei als Umfeld ein Fertigungsbetrieb angenommen, der grossvolumige Teile für den Dieselmoto-

renbau bearbeitet. Der Kunde benötigt Zylinderdeckel mit den Abmessungen 600 mm x 600 mm x 80 mm (Teil 1) sowie massive, 1800 mm lange Wellen mit einem Durchmesser von 300 mm (Teil 2). Von beiden Teilen existieren mehrere, leicht unterschiedliche Varianten, so dass die Bezeichnung „Teil“ eigentlich Teilefamilie bedeutet. An Teil 1 müssen 18 Bohrungen für die Befestigung am Zylindergehäuse angebracht werden. Teil 2 muss an jedem Ende in Radialrichtung von zwei Seiten feinbearbeitet werden, zudem werden in Achsrichtung 8 Bohrungen mit spezifischem Lochmuster angebracht. Die Auftragsdaten und Bearbeitungszeiten sind in Tabelle 3.6 für alle drei Maschinenklassen aufgelistet. Der Kunde erteilt zehn solcher Aufträge pro Jahr.

Tabelle 3.6: Auftragsdaten und Zeiten für die Bearbeitung auf verschiedenen Maschinenklassen. Angaben für Teil 1 / Teil 2.

Zeichen	Einheit	Sondermaschinen	Herkömmliche	Rekonfigurierbare
		Klasse A	Werkzeugmaschinen Klasse B	Werkzeugmaschinen Klasse C
<i>Einheitliche Angaben für den Fertigungsauftrag</i>				
Arbeitszeitmodell		5-Tage-Woche mit 1 Schicht à 8 h ⇒ 40 h pro Woche		
z_v	[-]		0.1	
z_{er}	[-]		0	
m	[-]		2000 / 500	
<i>Maschinenspezifische Werte</i>				
T_{bB}	[h]	10.1 / 55.3	27.8 / 110.3	13.8 / 58.4
t_h	[s]	4 / 330	22 / 660	5 / 330
t_n	[s]	10 / 20	22 / 40	10 / 20
t_b	[s]	0 / 10	0 / 20	0 / 10
t_{rB}	[min]	90 / 20	55 / 20	95 / 25
t_{rekoB}	[min]	0 / 0	0 / 0	180 / 180
T	[h]	10.7 / 28.6	28.1 / 56.9	14.4 / 31.7
t_t	[s]	0 / 10	0 / 20	0 / 10
t_w	[s]	14 / 175	44 / 350	15 / 175
t_r	[min]	90 / 20	55 / 20	95 / 25
t_{reko}	[min]	0 / 0	0 / 0	180 / 180

Die herkömmliche WZM bearbeitet nur seriell, während bei der Sondermaschine und der rekonfigurierbaren WZM einstellbare Bohrköpfe zum Einsatz kommen, wodurch die Haupt- und Nebenzeiten für Teil 1 deutlich kürzer werden. Teil 1 wird in 20 Losen mit jeweils leicht unterschiedlichen Teilen gefertigt, wobei zwischen jedem Los für 2 bzw. 4 Minuten umgerüstet werden muss. Die bei jedem Wechsel innerhalb einer Teilefamilie

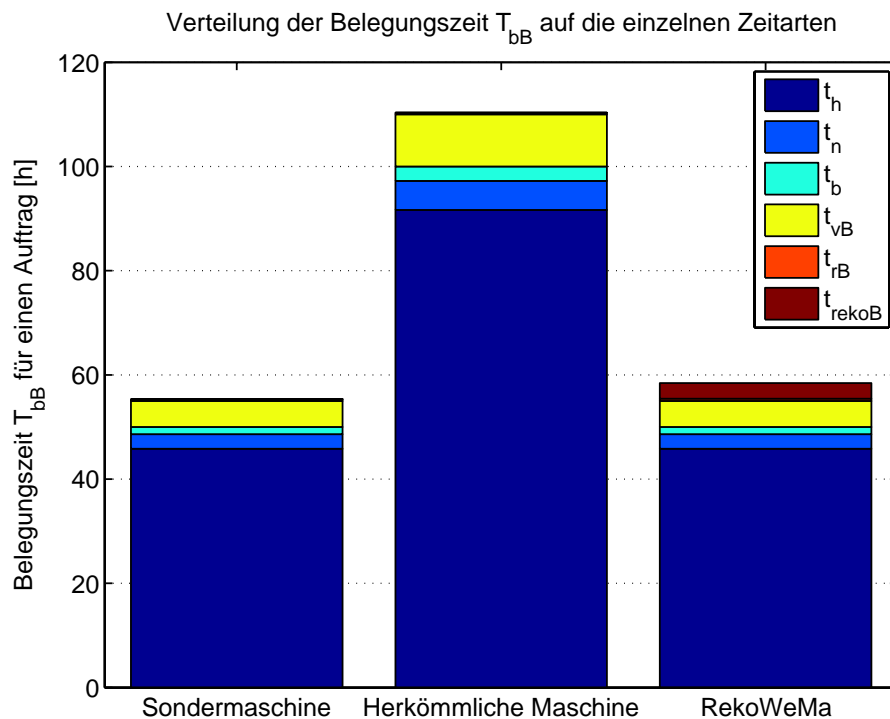
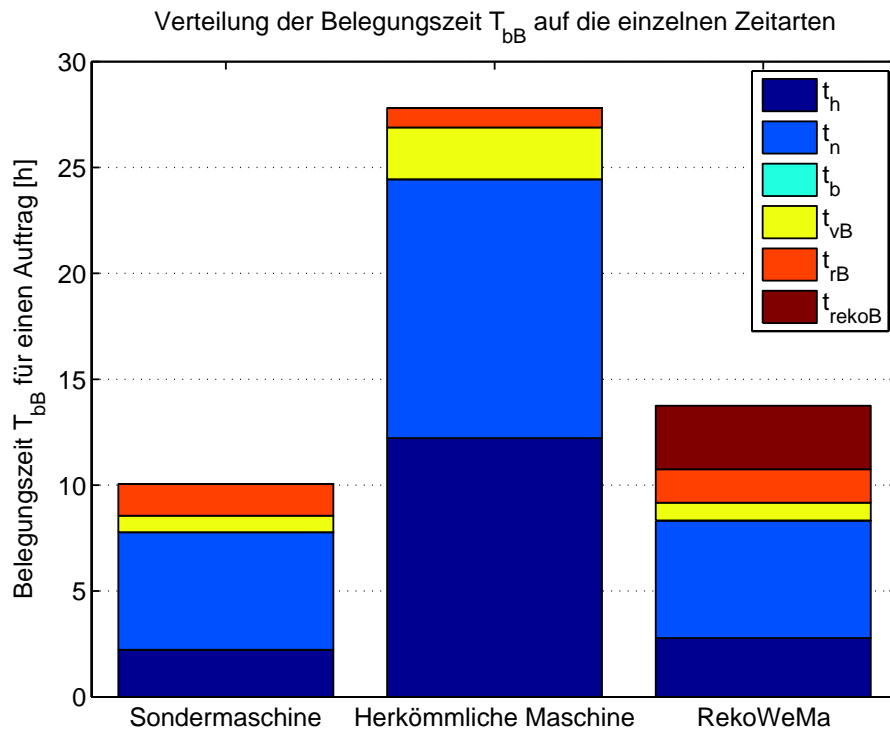


Bild 3.7: Vergleich der Belegungszeiten für die drei Maschinenklassen für die Bearbeitung von Teil 1 (oben) und Teil 2 (unten).

notwendige Zeit für die Einstellung verlängert bei Klasse A und C die Rüstzeit, wohingegen bei Klasse B nur Zeit für die Anpassung der Aufspannung benötigt wird. Von Teil 2 werden nur 2 Varianten gefertigt, so dass dort die Initialrüstzeit zwar höher ist, da aber dazwischen nur einmal umgerüstet wird, ist die Rüstzeit insgesamt kürzer. Bei Teil 2 erfolgt die Bearbeitung bei Klasse A und C mit 2 Spindeln gleichzeitig, weshalb die Belegungszeit dort etwa halb so gross ist wie bei Klasse B. Die Auftragszeit für Teil 2 beträgt etwa die Hälfte der Belegungszeit, da nur ein halber Maschinenbediener für die Fertigung angesetzt wird. Der Vergleich der Belegungszeiten zeigt, dass die Bearbeitung der beiden Aufträge mit einer herkömmlichen WZM knapp doppelt so lange dauert wie mit einer Sondermaschine oder einer rekonfigurierbaren WZM, welche sich auf ähnlichem Niveau bewegen (Bild 3.7). Die Teile sind allerdings so unterschiedlich, dass für die Bearbeitung zwei unterschiedliche Sondermaschinen zur Verfügung stehen müssten, was eine hohe Investition erforderte. Mit der rekonfigurierbaren WZM hingegen können nach entsprechender Rekonfigurierung beide Teile auf einer Maschine gefertigt werden.

In Tabelle 3.7 sind alle relevanten Werte für den Vergleich der Fertigungskosten aufgeführt. Die Anschaffungskosten für die Sondermaschinen werden klar höher angesetzt als die für Maschinen der Klassen B und C, da bei ersteren auftragsbezogenes Engineering anfällt, das sich im Preis niederschlägt. Bei den rekonfigurierbaren WZMn wird zudem zwischen den Anschaffungskosten für Basismaschine und die Infrastruktur sowie den spezifischen Anschaffungskosten, die allein für den jeweiligen Auftrag anfallen, unterschieden. Der Unterhaltskostensatz wird aufgrund der Annahme, dass bei Sondermaschinen tendenziell mehr Komponenten speziell für eine Maschine gekauft werden müssen und somit keine Skaleneffekte erzielt werden können, dort etwas höher angesetzt als bei den anderen beiden. Die Standfläche wird bei herkömmlichen WZMn kleiner angenommen, da diese Maschinen als Serienprodukte mehrere Optimierungsschleifen durchlaufen haben, was sich unter anderem in besserer Bauraumausnutzung bemerkbar macht. Die effektive Leistung wird wegen der Parallelbearbeitung und des Einsatzes von Bohrköpfen für die Klassen A und C etwas höher angesetzt.

Für die Berechnung der Stundensätze wird (3.6) so variiert, dass die Raumkosten sowie die spezifischen Anschaffungskosten A_{spez} nur auf die effektive Einsatzzeit $T_{E,eff}$ der jeweiligen Maschinenkonfiguration umgerechnet werden, woraus sich folgende Formel ergibt:

$$K_{MH} = \left(\frac{A}{T_E} + \frac{A_{spez}}{T_{E,eff}} \right) \cdot \left(\frac{1}{D_N} + \frac{p}{2} \right) + \frac{k_R \cdot F}{T_{E,eff}} + k_{UH} + k_E \cdot P_{eff} \quad (3.25)$$

Die damit errechneten Maschinenstundensätze weichen erheblich voneinander ab, was auf die unterschiedlichen Einsatzzeiten zurückzuführen ist. Für die herkömmlichen WZMn wird die jährlich für die Produktion zur Verfügung stehende Zeit verwendet, während bei den Sondermaschinen nur die effektiv für die Bearbeitung der jeweiligen Teile aufge-

Tabelle 3.7: Vergleichstabelle mit Daten und Kosten für die verschiedenen Maschinenklassen. Angaben für Teil 1 / Teil 2.

Zeichen	Einheit	Sondermaschinen	Herkömmliche Werkzeugmaschinen	Rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen
		Klasse A	Klasse B	Klasse C
<i>Einheitliche Angaben für den Fertigungsauftrag</i>				
K_{LH}	[CHF/h]		80	
D_n	[a]		10	
p	[-]		0.05	
k_R	[CHF/m ²]		200	
k_E	[CHF/kWh]		0.1506	
<i>Maschinenspezifische Werte</i>				
K_{MH}	[CHF/h]	730.95 / 217.48	49.67 / 59.80	97.63 / 73.37
A	[CHF]	580 000 / 890 000	530 000 / 650 000	400 000 / 400 000
A_{spez}	[CHF]	0 / 0	0 / 0	130 000 / 300 000
k_U	[CHF/h]	2.5 / 2.5	2 / 2	2 / 2
F	[m ²]	25 / 25	20 / 20	25 / 25
P_{eff}	[kW]	37.5 / 32.5	25 / 30	32.5 / 32.5
K_M	[CHF]	7832 / 12034	1381 / 6598	1380 / 4286
K_L	[CHF]	804.5 / 2288	2224.5 / 4549	1100 / 2534.5
K_W	[CHF]	1754 / 438.5	1900 / 475	1754 / 438.5
K_F	[CHF]	10390.5 / 14760.5	5505.5 / 11622	4234 / 7259

wendete Zeit verrechnet wird. Der hohe Maschinenstundensatz ist eine Folge der schlechten Auslastung der Maschine. In der Gesamtkostenbetrachtung liegen rekonfigurierbare WZM in beiden betrachteten Fällen am günstigsten. Die Parallelbearbeitung führt zu kurzen Belegungs- und Auftragszeiten, womit auch die Maschinen- und Lohnkosten niedrig bleiben. Je nach Teil fallen nur zwischen 40 und 77 % der Kosten für das Vergleichskonzept an. Die Bestandteile der Fertigungskosten für beide Teilvarianten sind in Bild 3.8 graphisch dargestellt.

Aus dem Vergleich kann gefolgert werden, dass rekonfigurierbare WZMn unter gewissen Bedingungen tatsächlich ökonomisch sinnvoll in einer Produktion eingesetzt werden können. Die Kombination aus kurzen Taktzeiten, niedrigen Maschinenstundensätzen und Stückzahlen, die keine Vollausslastung einer Sondermaschine erlauben, machen dieses neuartige Maschinenkonzept interessant. Grosse Kostenvorteile lassen sich erreichen, wenn ein ansonsten notwendiger Kauf einer zusätzlichen Maschine vermieden werden kann.

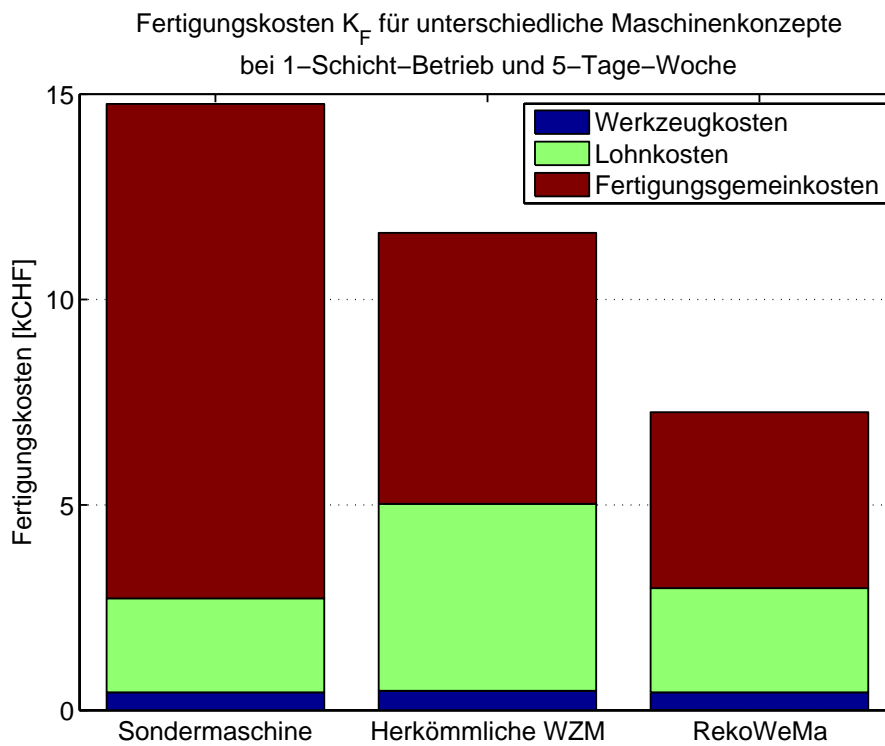
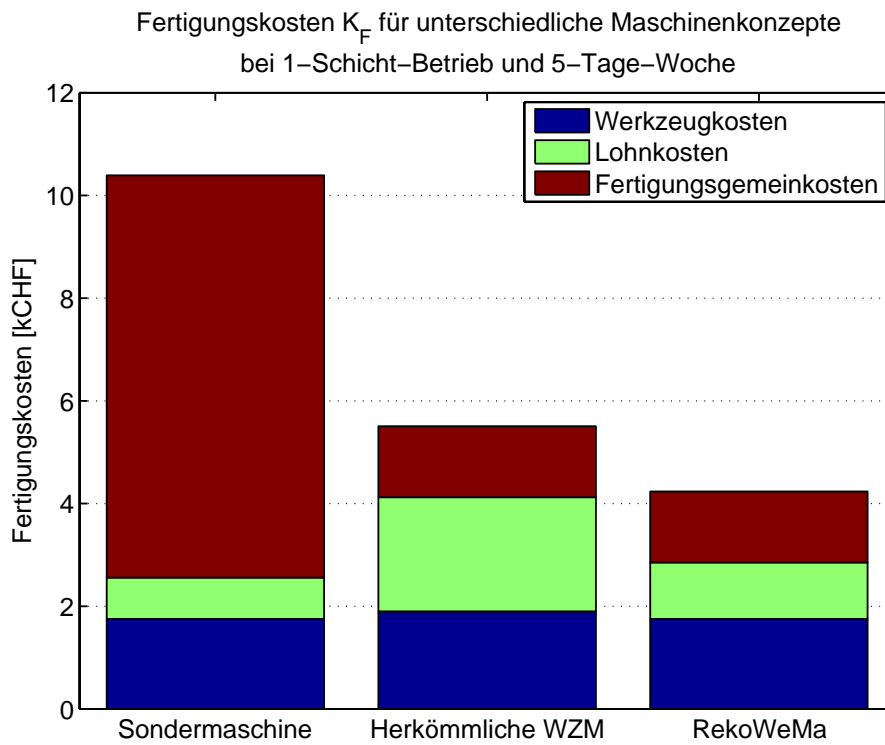


Bild 3.8: Vergleich der Fertigungskosten für die drei Maschinenklassen für die Bearbeitung von Teil 1 (oben) und Teil 2 (unten).

3.4.4 Abgrenzung des Einsatzgebiets

Wirtschaftlich vorteilhafte Szenarien ergeben sich als Kombination der in Abschnitt 3.4.2 genannten Elemente. Die Stückzahlen sollten im Bereich der Mittel- bis Grossserienfertigung liegen. Für Werkstücke mit Geometrie- oder Werkstoffeigenschaften, die auf herkömmlichen Maschinen nur zu einem nicht konkurrenzfähigen Stückpreis zu bearbeiten sind, können rekonfigurierbare WZMn zielgerichtet zusammengestellt werden. Mit einer rekonfigurierbaren WZM kann in einem solchen Fall ein Stückpreis angeboten werden, der sich auf dem Niveau von Sondermaschinen bei Volllast bewegt.

Rekonfigurierbare WZMn kommen sinnvoll dort zum Einsatz, wo eine einzige rekonfigurierbare WZM mehrere herkömmliche Maschinen (wegen der niedrigeren Belegungszeit) oder mehrere Sondermaschinen (wegen der Auslastung) ersetzen kann. Mit jeder eingesparten Maschine steigt der Kostenvorteil rekonfigurierbarer WZMn sprunghaft an. Bereits im vorgestellten Szenario mit nur zwei unterschiedlichen Teilefamilien lässt sich ein Kostenvorteil feststellen. Je mehr Teile bzw. Aufträge in einem Betrieb vorhanden sind, die zur Auslastung einer einzigen rekonfigurierbaren WZM beitragen, desto attraktiver ist das Konzept für diesen Anwendungsfall. Ist die Basismaschine einmal angeschafft, reicht die Anschaffung neuer Module anstatt einer neuen Maschine für die Auftragsbearbeitung.

Ziel der Ausrichtung einer Produktion nach dem Lean-Six-Sigma-Konzept sind kurze, stabile Durchlaufzeiten, was nur mit kleinen Losgrößen möglich ist. In einer Fließfertigung erfordert dieses Konzept Betriebsmittel mit sehr kurzen Umrüstzeiten (SMED). Rekonfigurierbare WZMn sind prädestiniert, Fließfertigung mit kleineren Stückzahlen und Losgrößen als bisher zu ermöglichen.

Eingebunden in flexible Fertigungszellen können rekonfigurierbare WZMn für die Fertigung exotischer Teile, die auf den übrigen Bearbeitungszentren nicht bearbeitet werden können, genutzt werden. Zudem ermöglichen sie das effiziente Abfangen von Auslastungsspitzen durch kurzfristige Kapazitätserweiterung, wodurch Auftragsfremdvergaben vermieden werden können.

4 Virtuelle Maschine

Dieses Kapitel behandelt die Verwendung einer virtuellen Maschine für die Entwicklung und den Einsatz rekonfigurierbarer WZMn. Als virtuelle Maschine wird in diesem Zusammenhang ein rechnergestütztes Maschinenmodell bezeichnet, das zur Planung, Untersuchung und Vorbereitung des Zusammenbaus einer realen, physischen Maschine im darauf folgenden Schritt dient.

Im ersten Abschnitt werden die für diese Arbeit verwendeten Methoden und Modelle zur Modellierung einer virtuellen Maschine beschrieben. Im zweiten Abschnitt werden die Analysemöglichkeiten vorgestellt, es wird die Durchführung der Analysen erörtert und auf die Auswertung der Ergebnisse eingegangen. Die direkte Nutzung von Simulationsergebnissen für die Antriebsregelung wird ebenfalls besprochen.

4.1 Modellierung

Voraussetzung für die Untersuchung von noch nicht realisierten Systemen ist deren Modellierung. Je nach Entwicklungsphase und Untersuchungszweck kommen unterschiedliche Modelle zum Einsatz. Als Modell bezeichnet man eine vereinfachte Nachbildung eines existierenden oder gedachten Systems in einem anderen System [138]. Es zeichnet sich dadurch aus, dass es die Realität abbildet – jedoch in abstrahierter Weise – und auf das Wesentliche des betrachteten Systems reduziert ist. Die Ausprägung des Modells wird stark vom Blickwinkel auf das zu untersuchende System beeinflusst.

Man unterscheidet zwischen materiellen (z.B. Tonmodell im Automobilbau) und immateriellen (z.B. CAD-Modell eines Produktes) Modellen. Immaterielle Modelle können verbal, mathematisch, algorithmisch oder graphisch beschrieben werden. In der Produktentwicklung finden alle diese Modellarten Verwendung. Für die Entwicklung von rekonfigurierbaren WZMn und deren Modulen wird mit den selben Modellen gearbeitet wie bei der Entwicklung konventioneller WZMn. Die dabei gewünschte Modularität erfordert allerdings die Bereitstellung zusätzlicher Informationen über Schnittstellen, Modulkomponenten und Einsatzmöglichkeiten. Im Werkzeugmaschinenbau werden solche Modelle, die Informationen aus verschiedenen Disziplinen vereinen, als mechatronische Modelle bezeichnet.

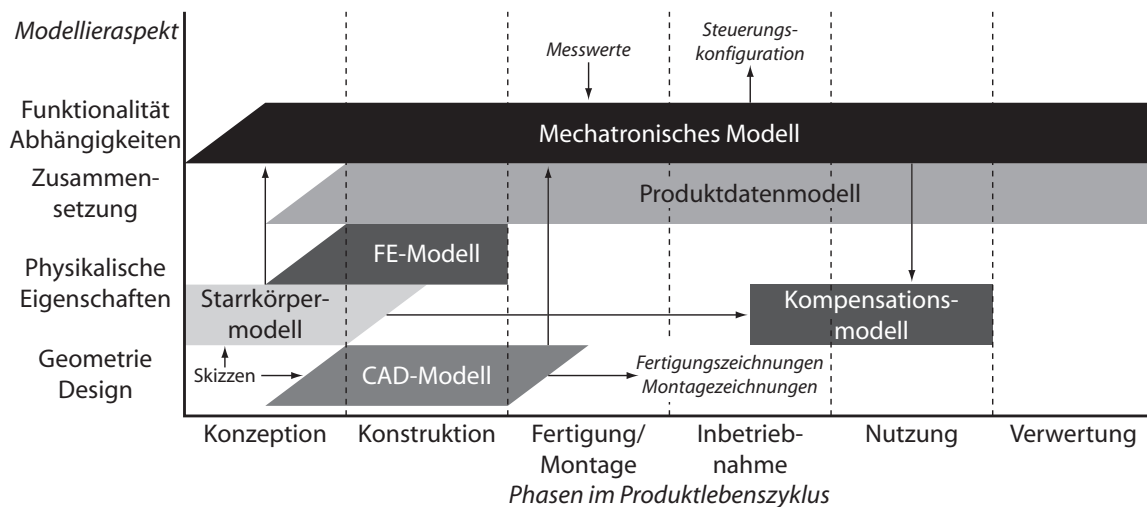


Bild 4.1: Während des Lebenszyklus von WZMn kommen verschiedene Modelle zur Anwendung. In jeder Phase des Lebenszyklus stehen zwar unterschiedliche Aspekte im Vordergrund, bei mechatronischen Produkten werden die gewonnenen Informationen aber immer mehr auch in den anderen Phasen benötigt.

Wie in Bild 4.1 dargestellt, werden Modelle in allen Phasen des Lebenszyklus eingesetzt. In der Konzeptphase muss auf effiziente Weise festgestellt werden, welche von mehreren Maschinenkonfigurationen die mechanisch geeignetste für eine gegebene Bearbeitungsaufgabe ist. Die entsprechende Modellierungsumgebung und das Untersuchungswerkzeug müssen dazu die Verwendung von Modulen unterstützen. Während der Konstruktion und Fertigung/Montage müssen die Modulhersteller die Produktdaten erfassen und konsistent halten. Für die Inbetriebnahme der Maschine werden sowohl Informationen aus der Analyse physikalischer Eigenschaften als auch produktspezifische Angaben benötigt. Die Modulmodelle müssen also zudem Produktdaten über verwendete mechanische, elektrische und elektronische Komponenten beinhalten, die zusammen mit den physikalischen Informationen des Starrkörpermodells ein mechatronisches Modulmodell ergeben. Damit sind alle für die Konfigurierung einer Maschinensteuerung erforderlichen Informationen vorhanden und lassen sich automatisiert so kombinieren, dass ein Anwender eine einfache Maschineninbetriebnahme selbst durchführen kann. Während der Nutzungsphase kann die Maschinensteuerung ein physikalisches Modell der Maschine auswerten. Ein solches Modell beschreibt das Verhalten der Maschine, so dass die NC-Steuerung aktiv gewisse mechanische Unzulänglichkeiten kompensieren kann. Durch die steigende Umweltsensibilität der Gesellschaft sowie neue Gesetze werden die Produktdatenmodelle eine Maschine bis zu ihrer vollständigen Entsorgung begleiten.

Diese Arbeit fokussiert auf Aspekte, die speziell für den Einsatz rekonfigurierbarer WZMn zu beachten sind, und hebt Unterschiede gegenüber konventionellen WZMn hervor. Bei der

Diskussion der virtuellen Maschine stehen folglich das Starrkörpermodell, das Antriebsmodell und das Produktdatenmodell für die Konfiguration der Maschinensteuerung im Vordergrund. Die Bestimmung sämtlicher Konfigurationsparameter erfordert Werte, die aus einem mathematisch-physikalischen Modell zur Vorhersage des Maschinenverhaltens gewonnen werden. Von diesem Modell kann in Zukunft auch ein dynamisches Modell zur laufzeitparallelen Auswertung auf der Steuerung abgeleitet werden. Den Kern bildet also ein mechatronisches Modulmodell, das alle erforderlichen Daten enthält und im Folgenden genauer erläutert wird.

4.1.1 Sinn und Zweck der Modellierung

Gründe, die für eine umfassende Nutzung von Modellen im Werkzeugmaschinenbau sprechen, existieren viele. Genannt seien hier nur die Reduzierung von Kosten durch die Einsparung physischer Modelle, ein bereits in frühe Entwicklungsphasen vorgezogener Erkenntnisgewinn über das Produkt oder die Möglichkeit, schnell und gefahrlos Testfälle durchzuspielen, bei denen ein physisches Modell ggf. zerstört würde. In [138] wird der Nutzen allgemein gültig formuliert: Ein Modell wird zur Lösung einer Aufgabe verwendet, deren Durchführung mittels direkter Operationen am Original nicht möglich oder zu aufwändig wäre.

Neben den üblichen Gründen für Modellierung und Simulation bei der Konstruktion von WZMn, kommen bei rekonfigurierbaren WZMn drei spezielle Aspekte hinzu. Detaillierte Modelle der Module und der daraus zusammengestellten Maschine werden benötigt für

- das Finden einer konzeptuell geeigneten Maschinenkonfiguration
- die Ermöglichung einer schnellen Inbetriebnahme bei der Rekonfigurierung
- die Kompensation von prinzipbedingten Unzulänglichkeiten der Maschinenkonfiguration zur Verbesserung des Maschinenverhaltens

Die Bedeutung der Modellierung für diesen Zweck zeigt sich in dem in Bild 4.2 illustrierten Ablauf der Konfigurierung einer rekonfigurierbaren WZM. Ausgangspunkt für die Konfigurierung ist die Modul-Bibliothek, die verschiedene, für den Bau einer WZM notwendige Module enthält. Jedes dieser Module liegt in zwei Formen vor, nämlich physisch und virtuell. Dabei ist das virtuelle Modul eine präzise und prägnante Repräsentation des physischen Moduls, enthält also alle für den weiteren Ablauf relevanten Informationen. Die physischen Module sind zwar für einen klar umrissenen Anwendungszweck gedacht, werden allerdings nicht für einen konkreten Einsatz in einer bestimmten Maschine entwickelt oder dafür angepasst. Daher ist es für einen Modulhersteller auch möglich und sinnvoll,

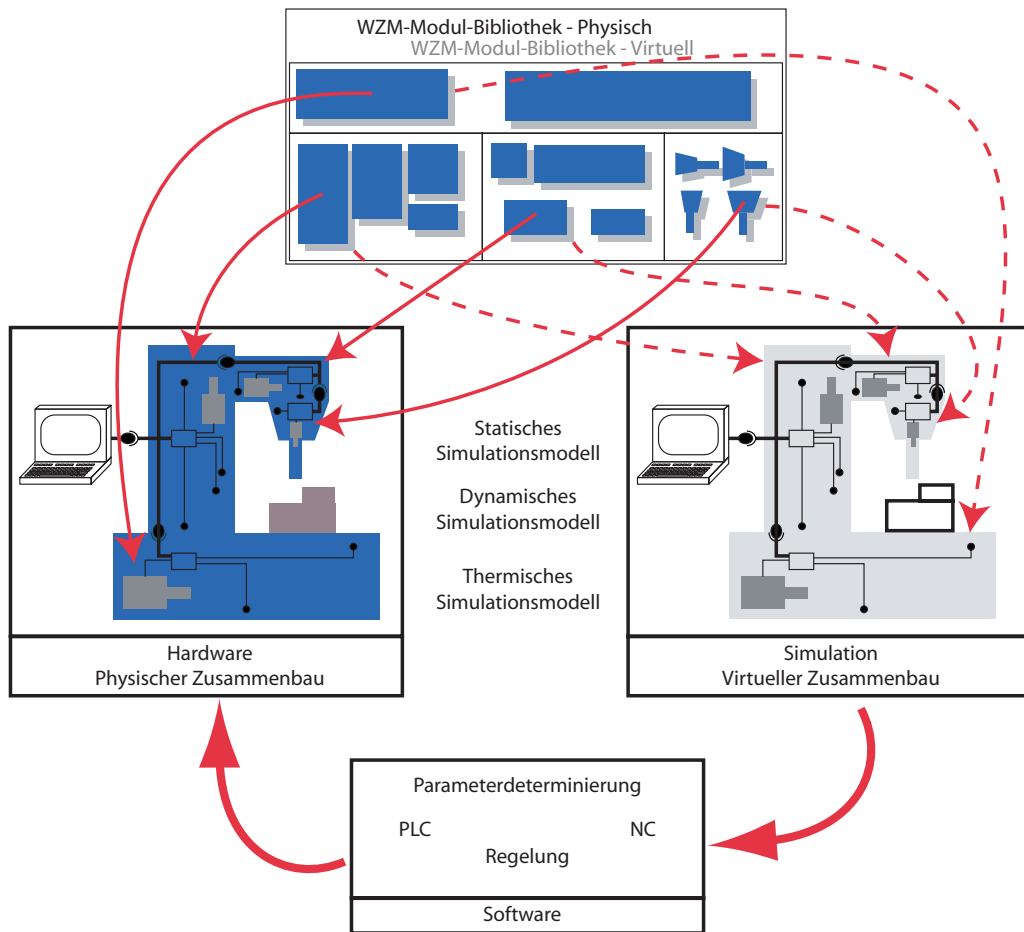


Bild 4.2: Ablauf der Konfiguration einer rekonfigurierbaren WZM: Modellierung der Maschine aus virtuellen Modulen (rechts), Generieren der notwendigen Software (unten) und Zusammenbau der physischen Maschine (links) aus den Modulen in der Bibliothek (oben).

seine Module detailliert zu modellieren und gegebenenfalls wichtige Eigenschaften über Messungen zu bestimmen.

Bei der Suche nach einer für eine Bearbeitungsaufgabe geeigneten Maschinenkonfiguration wird aus den zur Verfügung stehenden Modulmodellen ein virtuelles Modell der gesamten Maschine erstellt. Für den Zusammenbau werden die Modulmodelle in die Modellierungsumgebung geladen, wo verschiedene Maschinenkonfigurationen zusammengestellt und analysiert werden können. Zusätzlich zu den Modulen lassen sich in der Modellierungsumgebung falls nötig auch andere, maschinenspezifische Komponenten modellieren.

An den virtuellen Maschinenmodellen können somit im Vorfeld Berechnungen und Simulationen durchgeführt werden, die Aufschluss über das Verhalten der Konfigurationsvarianten geben. Gängige Analysen wie die Kinematiksimulation, statische und quasistatische

Berechnungen, dynamische Untersuchungen im Frequenz- und Zeitbereich oder auch thermische Simulationen können zur Bestimmung der am besten geeigneten Kombination von Modulen durchgeführt werden. Zudem kann an dieser Stelle ein Maschinenmodell für die Steuerung abgeleitet werden, welches das dynamische Maschinenverhalten abbildet. Dieses Modell wird während der Laufzeit von der Steuerung ausgewertet, die somit bestimmte physikalische Effekte kompensieren kann.

Nach der Entscheidung für eine Maschinenvariante werden mit Hilfe des Maschinenmodells die Parameter für die Steuerungskonfiguration determiniert und, soweit möglich, optimiert. Wichtig ist dabei, dass alle Bereiche der Maschinensteuerung einbezogen werden: SPS, NC und Regelung. Für alle drei müssen die für den Betrieb erforderlichen Parameter aus den Modulmodellen und dem Maschinenmodell extrahiert und ggf. so aufbereitet werden, dass sie anschliessend direkt auf die Steuerung übertragen werden können.

Erst nachdem alle Vorbereitungen abgeschlossen sind, werden die physischen Module aus dem Lager geholt oder aus einem Modulpool bezogen und zu einer WZM zusammengesetzt. Der Zusammenbau erfolgt aufgrund der Modularisierung in sehr kurzer Zeit, ebenso die Inbetriebnahme mit Hilfe der zuvor erstellten Konfigurationsdaten. Dabei werden die Module ausgerichtet und justiert sowie die Steuerung entsprechend konfiguriert. Mit der Feinabstimmung der Steuerungsparameter endet der Konfigurierungsprozess.

4.1.2 Methodik

Die Rekonfigurierung einer WZM ist ein wiederkehrender Prozess. Deshalb muss der Maschinenanwender durch adäquate Werkzeuge dabei unterstützt werden. Die einzelnen Prozessschritte werden zwar auch bei der Entwicklung und Inbetriebnahme herkömmlicher WZMn durchlaufen, dort in der Regel allerdings nur einmal. Die mehrmalige Wiederkehr der Aufgaben rechtfertigt einen Mehraufwand für die Entwicklung angepasster Werkzeuge.

Der in Bild 4.2 dargestellte Ablauf einer Rekonfigurierung kann in drei Phasen unterteilt werden. In jeder dieser Phasen kommen jeweils unterschiedliche Werkzeuge zum Einsatz, wie Bild 4.3 zeigt.

Festlegen der Achskonfiguration: In dieser Phase wird die Anordnung der Maschinenachsen festgelegt und auf Machbarkeit und Erfüllung der Anforderungen überprüft. Mit dem Achsbaukasten werden die einzelnen Module zu einer Maschine zusammengesetzt, wodurch sich die Kinematik der Maschine, die Lage und Anordnung der Spindeln und der Arbeitsraum ergeben. Das entstandene Modell wird quasistatisch auf die zu erwartenden Verlagerungen am TCP untersucht, womit sich das dynamische Maschinenverhalten abschätzen lässt. Die Beurteilung der gewählten Maschinenkonfiguration erfolgt gegenüber den Anforderungen durch die Bearbeitungsaufgabe. Mit dem Thermobaukasten wird das thermische Verhalten der Ma-

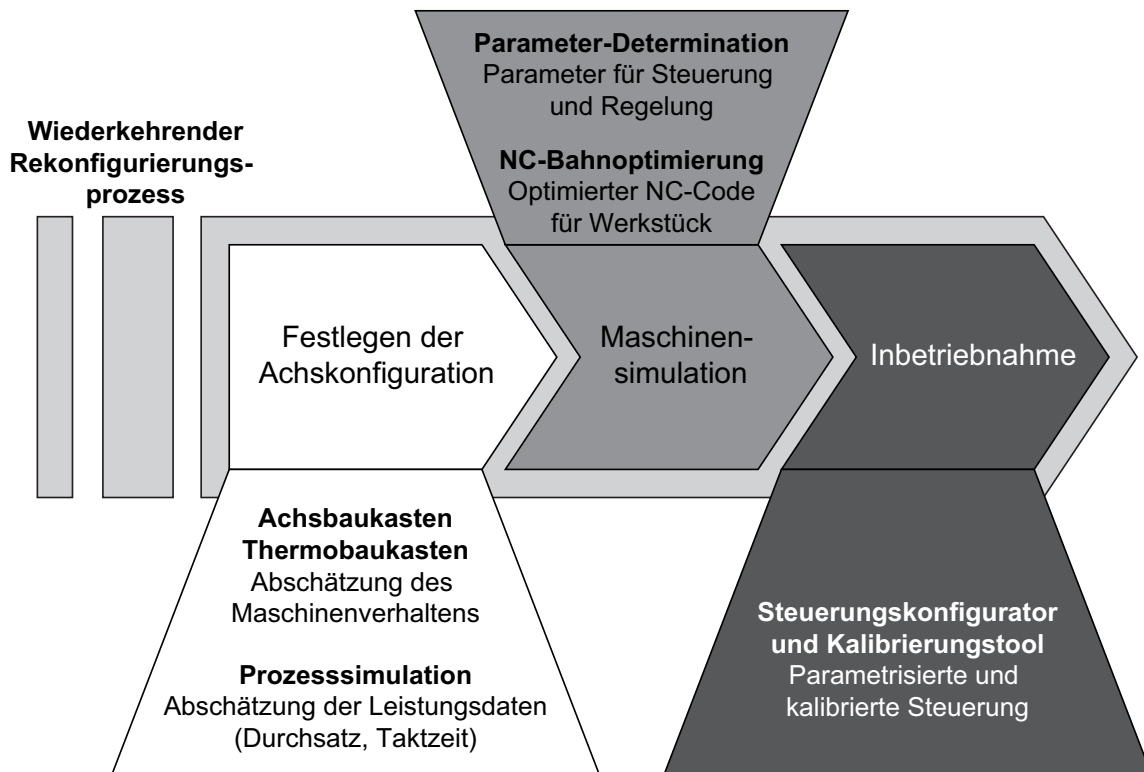


Bild 4.3: Die Rekonfigurierung einer WZM ist ein wiederkehrender Prozess, in dessen einzelnen Phasen unterschiedliche Werkzeuge zum Einsatz kommen.

schine untersucht und beurteilt. Die für eine Prozesssimulation benötigten Angaben werden direkt aus den Moduldaten gelesen. Damit können der erreichbare Durchsatz und die Taktzeit für die geplante Bearbeitungsaufgabe abgeschätzt werden.

Maschinensimulation: Nachdem die Maschinenkonfiguration festgelegt wurde, sind ausgewählte tiefere Untersuchungen an einem detaillierten Maschinenmodell möglich. Erforderlich ist die Generierung einer funktionierenden Steuerungskonfiguration und die Ermittlung geeigneter Regelungsparameter. Dazu wird ein Werkzeug benötigt, das diese Aufgaben weitgehend automatisiert ausführt. Noch vor Inbetriebnahme der Maschine lässt sich eine Optimierung des NC-Codes für die Bearbeitungsaufgabe durchführen. Dabei ist es von Vorteil, wenn ein solches Programm die ermittelte Maschinen- bzw. Achsparametrierung gleich berücksichtigen kann¹.

Inbetriebnahme: Bei der Inbetriebnahme müssen Mittel zur Verfügung stehen, mit denen der Anwender effizient die am Rechner generierte Steuerungskonfiguration auf die Steuerung übertragen kann. Zusätzlich sind Werkzeuge und Methoden zur Feinjustage der Parameter und gegebenenfalls zur Kalibrierung der Messsysteme nötig.

¹Kommerziell erhältliche Software wie ESPRIT oder VERICUT kann dies heute nicht.

Obwohl die beschriebenen Prozessschritte Aufgaben beinhalten, die bei einer herkömmlichen WZM heute der Maschinenhersteller durchführt, muss beim Einsatz von rekonfigurierbaren WZMn der Maschinenanwender in der Lage sein, diese zu erledigen. Die aufgeführten Werkzeuge müssen also auch für Personal ohne vertiefte Kenntnisse in der Maschinenentwicklung verwendbar sein und unterschiedliche Modulfabrikate unterstützen. Diese Art der Nutzung setzt voraus, dass jeder Modulhersteller detaillierte Modelle seiner Module mitliefert. Aus diesem Grund werden im Folgenden geeignete Modelliermethoden zur Erstellung solcher standardisierten Modellen besprochen.

Angepasste Starrkörpermodellierung

Eine effiziente Methode, um das dynamische Verhalten von Maschinenstrukturen vorherzusagen, ist die Modellierung mit Starrkörpern. Am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der ETH Zürich wurde deshalb der Achsbaukasten entwickelt, ein Softwaretool, das speziell auf die die Modellierung und Analyse von WZMn ausgelegt ist [144]. Dabei werden die Steifigkeiten und Dämpfungen konzentriert an den Kontaktstellen der Starrkörper berücksichtigt. Da die Software auf MATLAB basiert, kann sie dessen Schnittstellen – insbesondere zu Simulink – nutzen und auf eine Vielzahl verfügbarer Funktionalitäten zugreifen. Zudem lässt sie sich relativ einfach erweitern und anpassen. Mit dem Achsbaukasten lässt sich auf effiziente Weise das positionsabhängige Verhalten einer Maschinenstruktur über ihren Arbeitsraum analysieren.

Die Berechnungen mit den Starrkörpermodellen erfolgen gemäss der Bewegungsgleichung der klassischen Mechanik in (4.1). Bei der Modellierung müssen demnach die Werte zur Bildung der Matrizen angegeben werden.

$$\mathbf{F} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{a} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{x} \quad (4.1)$$

M	Massenmatrix	D	Dämpfungsmatrix	K	Steifigkeitsmatrix
a	Beschleunigungsvektor	v	Geschwindigkeitsvektor	x	Positionsvektor
F	Kraftvektor				

Die genannten Merkmale prädestinieren den Achsbaukasten als Grundlage für ein Werkzeug zur Erfüllung der während des Rekonfigurierungsprozesses anfallenden Aufgaben. Den Ausgangspunkt bildet dabei eine angepasste Starrkörpermodellierung, die auch die Biege- und Torsionseigenschaften grosser Strukturkörper nachbildet, was mit reinen Starrkörpern nicht möglich wäre. Die dafür benötigten Elemente, Körper und Steifigkeiten, werden nachfolgend erläutert.

Allgemeine Körper Ein Starrkörper wird durch seine Schwerpunktlage, seine Masse und seine Massenträgheitsmomente hinreichend beschrieben. Diese Angaben genügen für

die Berechnungen im ersten Prozessschritt der Rekonfigurierung sowie für die Erstellung des Zustandsraummodells, das im darauffolgenden Schritt benötigt wird.

Zur anschaulichen Definition von Starrkörpern sowie zur visuellen Überprüfung ihrer Modellierung stehen Primitivgeometrien zur Verfügung, aus denen ganze Maschinenmodelle erstellt werden können. Bild 4.4 zeigt eine 3D-Zeichnung einer 3-Achs-Konsolbettmaschine (links) sowie deren graphische Darstellung im Achsbaukasten (rechts).

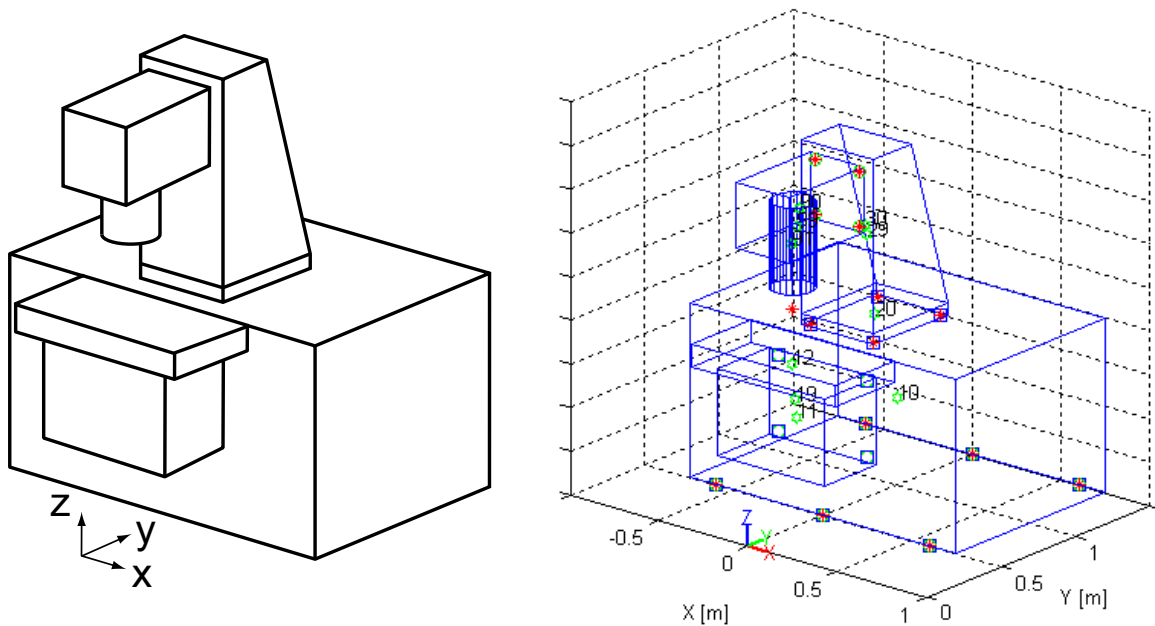


Bild 4.4: 3D-Zeichnung einer 3-Achs-Konsolbettmaschine (links) und graphische Darstellung des Starrkörpermodells im Achsbaukasten (rechts). Farbige Symbole kennzeichnen die Koppelstellen und geben die Richtung des gesperrten Freiheitsgrades an.

Als Primitivgeometrien zur Modellierung von Maschinenstrukturen haben sich Quader, Zylinder und Prismen bewährt. Mit der Möglichkeit, für jeden dieser Körper eine einheitliche Materialdichte oder aber unterschiedliche Rand- und Kerndichte zu definieren, lassen sich Maschinenstrukturen realitätsnah nachbilden. Letzteres findet Anwendung bei der Modellierung von Kästen und Rohren, die wegen ihres geringen Gewichts bei gleichzeitig hoher Steifigkeit in vielen Strukturen zum Einsatz kommen. Über die Kerndichte, die den prozentualen Materialanteil im Kern angibt, können auch Stege und Versteifungen oder auch schwere Maschinenkomponenten im Inneren berücksichtigt werden.

Die Definition eines Körpers erfolgt über die Beschreibung seiner Geometrie: Beim Quader über zwei diagonal entgegengesetzte Eckpunkte, beim Zylinder durch die Lage der Mittellinie, seinen Radius und die Länge der Mantelfläche und beim Prisma durch die

Angabe der Anzahl an Eckpunkten sowie ihre jeweilige Lage. Die Geometriebeschreibung eines Körpers dient einerseits zur graphischen Darstellung, andererseits werden von diesen Angaben ausgehend die Starrkörpereigenschaften berechnet. Dennoch ist es auch möglich und manchmal sinnvoll, die Werte für Masse, Schwerpunktlage und Trägheitsmomente manuell vorzugeben und nur für die graphische Darstellung auf die Geometriebeschreibung zurückzugreifen. Die Darstellung erfolgt z.B. als Drahtgittermodell, wobei für jeden Körper die Lage des Schwerpunkts eingezeichnet wird. Zur eindeutigen Identifizierung trägt jeder Körper neben dem Schwerpunkt einen Index. Dem Maschinengrundkörper in Bild 4.4 beispielsweise wurde der Index 10 zugewiesen.

Die Massen und Trägheitsmomente können zur Massenmatrix \mathbf{M} zusammengeführt werden, deren erste drei Diagonalelemente M_{ii} die Masse M enthalten und die folgenden drei die Hauptträgheitsmomente I_i . Die Deviationsmomente I_{ij} bilden die ausserdiagonalen Terme M_{ij} .

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Körper mit Balkeneigenschaften Nicht immer liefert die Modellierung mit reinen Starrkörpern zufriedenstellende, d.h. realitätsnahe Ergebnisse. Bei langen, schlanken Körpern, in der Mechanik üblicherweise als Balken bezeichnet, ist deshalb die Nachbildung ihrer Biege- und Torsionseigenschaften essentiell. Der finite Starrkörper-Ansatz nach [61] ist eine effiziente Methode, um mit nur wenig mehr Elementen diese Balkeneigenschaften zu erfassen. Dabei wird der Balken in mehrere Einzelkörper segmentiert, die elastisch über 6D-Steifigkeiten miteinander verbunden sind. Die Steifigkeitswerte für die elastische Kopplung lassen sich aus den Materialwerten und dem Querschnitt des Balkens berechnen.

Bild 4.5 zeigt exemplarisch zwei Balken, die nach dieser Methode modelliert wurden. Jeder Balken besteht aus einer Reihe von Einzelkörpern, in diesem Beispiel fünf. Jeweils in der Mitte der Grenzflächen zwischen zwei Segmenten ist eine Koppelsteifigkeit angebracht. Diese wirkt auf die drei Translationen und die drei Rotationen im Raum. Damit die Koppelsteifigkeit, die das Materialverhalten wiedergibt, einfach zu berechnen und zuzuordnen ist, wird die Geometrie der beiden angebotenen Körper so gewählt, dass ihre Eigenschaften gleich sind. Deshalb sind die beiden Körper am Balkenende jeweils nur halb so lang wie die Körper in der Mitte des Balkens, die von den Körpern in der Mitte eine Hälfte der einen Steifigkeit zugerechnet wird und die zweite Hälfte der anderen Steifigkeit.

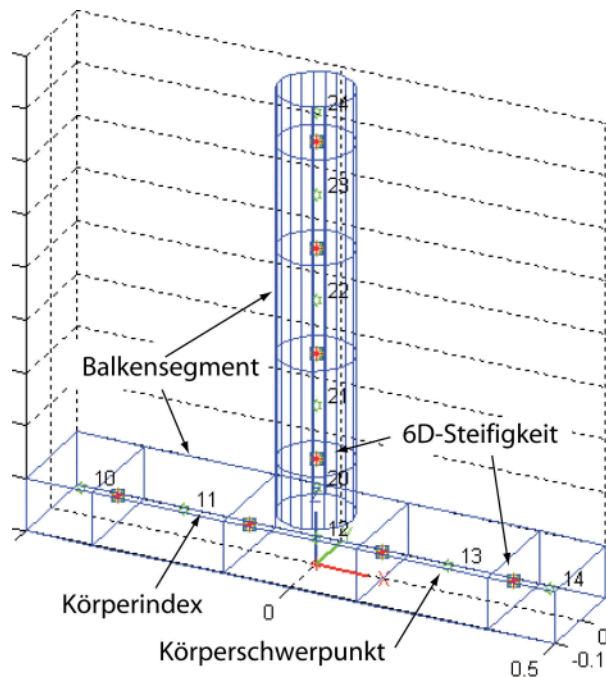


Bild 4.5: Modell je eines Balkens mit rechteckigem und kreisförmigem Querschnitt nach dem finiten Starrkörper-Ansatz gemäss [61].

Steifigkeiten an Koppelstellen An den Koppelstellen zwischen zwei Starrkörpern wirken lineare Federsteifigkeiten für Translationen und Drehfedersteifigkeiten für Rotationen. Jeder einzelne dieser sechs Freiheitsgrade kann unabhängig von den anderen vorgegeben werden. Definiert wird eine Steifigkeit durch ihren Steifigkeitswert, die Lage im Raum und die Angabe der beiden beteiligten Körper.

Der Achsbaukasten stellt für mehrere im Werkzeugmaschinenbau gebräuchliche Konstellationen eigene Koppelstellendefinitionen bereit, die Modellierzeit gegenüber handelsüblichen Modellierumgebungen drastisch verkürzen [57]. Dazu zählen Netze aus 3D-Steifigkeiten für die Aufstellung, Netze und Linien aus 2D-Steifigkeiten für Linearführungen, je nachdem ob diese in einer Ebene oder höhenversetzt liegen, oder auch radiale Lagerungen für Rundtische. Zur Definition werden nur wenige weitere Angaben zur relativen Lage der Koppelstellen zueinander benötigt sowie ihre jeweilige Anzahl.

Für die Modellierung der Antriebssteifigkeit bei quasistatischen Berechnungen werden ebenfalls translatorische Steifigkeiten genutzt, um den Freiheitsgrad in Achsrichtung zu sperren. Dabei repräsentiert eine solche Steifigkeit die über den Antriebsstrang am Schlitten wirkende resultierende Steifigkeit, wenn der Antrieb im Regelbetrieb arbeitet.

Für die Berechnungen werden die Steifigkeiten in der Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} zusammengefasst. Ihre Diagonalelemente K_{ii} bilden jeweils die Summe aller am Körper i angebrachten

Kopplungen. Die Nebenelemente K_{ij} sind die negativen Federkonstanten der Kopplung zwischen den Körpern i und j [157]. Für die ersten drei Körper 10, 11 und 12 des horizontalen Balkens in Bild 4.5 zeigt (4.3) den entsprechenden Ausschnitt aus der Steifigkeitsmatrix für eine Achsrichtung. Dabei ist K_{01} die Steifigkeit zwischen Körper 10 und 11, K_{12} diejenige zwischen Körper 11 und 12 und K_{23} jene zwischen Körper 12 und 13.

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_{01} & -K_{01} & 0 & \dots \\ -K_{01} & K_{01} + k_{12} & -K_{12} & \dots \\ 0 & -K_{12} & K_{12} + k_{23} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Zustandsraummodell

Die Simulation im Zeitbereich soll Aussagen über das dynamische Verhalten des geregelten Systems „Werkzeugmaschine“ bei Verfahrbewegungen liefern. Dazu muss ein Systemmodell erstellt werden, das neben der mechanischen Struktur auch ein detailliertes Antriebsmodell enthält, welches im nächsten Abschnitt behandelt wird. Voraussetzung dafür ist eine geeignete Modellierung, mit der sich das entstehende System effizient simulieren lässt. Die betrachteten Systeme umfassen viele Energieträger sowie mehrere Ein- und Ausgangsgrößen, zudem werden sie als linear angenommen. Zur Behandlung solcher Systeme hat sich die kontinuierliche zeitinvariante Zustandsraumdarstellung nach [157] bewährt:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t) \quad (4.4)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}(t) \quad (4.5)$$

Für ein System mit n Zustandsgrößen x , m Eingangsgrößen u und r Ausgangsgrößen y ergeben sich folgende Dimensionen der Vektoren und Matrizen des Gleichungssystems:

$$\begin{array}{llll} \dot{\mathbf{x}}(t), \mathbf{x}(t): & n \times 1 & \mathbf{u}(t): & m \times 1 & \mathbf{A}: & n \times n & \mathbf{B}: & n \times m \\ \mathbf{y}(t): & r \times 1 & & & \mathbf{C}: & r \times n & \mathbf{D}: & r \times m \end{array}$$

Der Zustandsvektor \mathbf{x} enthält alle Größen, deren Kenntnis zu einem Zeitpunkt t nötig ist, um die weitere Zeitentwicklung des Systems zu berechnen [126]. In der Regelungstechnik werden üblicherweise Größen verwendet, die den Energiegehalt des Systems beschreiben und sich nicht sprunghaft ändern können, z.B. Positionen und Geschwindigkeiten von Körpern, elektrische Ströme oder Spannungen. Für die Modellierung der WZMn in dieser Arbeit wurden als Zustände die drei translatorischen Positionen (x, y, z), die drei Rotationslagen (a, b, c) und die zugehörigen Zeitableitungen im kartesischen Raum aller

beteiligten Starrkörper gewählt. Der Zustandsvektor \mathbf{x} für ein Maschinenmodell aus k Körpern enthält demnach $n = 12 \cdot k$ Zustandsgrößen (4.6).

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{s} \\ \dot{\mathbf{s}} \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \mathbf{s} = (x_1, y_1, z_1, a_1, b_1, c_1, \dots, x_k, y_k, z_k, a_k, b_k, c_k)^T \quad (4.6)$$

Der Eingangsvektor \mathbf{u} umfasst die m Eingangsvariablen des Systems. Das sind üblicherweise die wirksamen Stell- und gegebenenfalls auch Störgrößen. Bei der Modellierung von WZMn sind hierfür die Antriebskräfte geeignet. Die Anzahl m der Eingangsgrößen entspricht in den Modellen folglich der Anzahl der Antriebe, über die die Maschine verfügt (4.7).

$$\mathbf{u} = (F_1, F_2, \dots, F_m)^T \quad (4.7)$$

Die zu untersuchenden Größen schliesslich werden im Ausgangsvektor \mathbf{y} zusammengefasst. Sie ergeben sich aus den Zustands- und den Eingangsvariablen. Welche Größen vom System ausgegeben werden sollen, ist grundsätzlich frei wählbar. In dieser Arbeit setzen sich die Ausgangsvariablen wie in (4.8) immer aus der Position LKs_i des Lesekopfs am Messsystem sowie der Position SMs_i der Spindelmutter an jedem Antrieb sowie der x-, y- und z-Position am Tool Centre Point (TCP) zusammen. Die Grösse des Ausgangsvektors ergibt sich damit zu $r = 2 \cdot m + 3$.

$$\mathbf{y} = (LKs_1, SMs_1, \dots, LKs_m, SMs_m, TCPx, TCPy, TCPz)^T \quad (4.8)$$

Aus den vorhandenen Informationen und den bereits erstellten Matrizen lassen sich nun die für die Zustandsraumdarstellung benötigten Matrizen herleiten. Die System- oder Zustandsmatrix \mathbf{A} setzt sich gemäss (4.9) aus der Massenmatrix \mathbf{M} , der Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} und der Dämpfungsmatrix \mathbf{D} zusammen. Die Herleitung der Massenmatrix und der Steifigkeitsmatrix wurde bereits im vorherigen Abschnitt erläutert. Der Aufbau der Dämpfungsmatrix ist identisch mit dem der Steifigkeitsmatrix.

$$\mathbf{A}_{(n \times n)} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Die Steuer- oder Eingangsmatrix \mathbf{B} legt fest, wie die Eingangsgrößen das System beeinflussen. Aufgrund der Wahl der Eingangsgrößen ist die obere Hälfte der Matrix komplett Null, da die Antriebskräfte wie in (4.10) dargestellt über die Untermatrix \mathbf{B}_D nur auf die Beschleunigung des Systems wirken.

$$\mathbf{B}_{(n \times m)} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{(\frac{n}{2} \times m)} \\ \mathbf{B}_D \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \mathbf{B}_D = \begin{pmatrix} \frac{\mathbf{b}_{1,1}}{M_1} & \frac{\mathbf{b}_{1,2}}{M_1} & \cdots & \frac{\mathbf{b}_{1,m}}{M_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\mathbf{b}_{\frac{n}{2},1}}{I_{zz,\frac{n}{2}}} & \frac{\mathbf{b}_{\frac{n}{2},2}}{I_{zz,\frac{n}{2}}} & \cdots & \frac{\mathbf{b}_{\frac{n}{2},m}}{I_{zz,\frac{n}{2}}} \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Mit Hilfe der Bezugsmatrix \mathbf{R} und des Antriebskinematikvektors \mathbf{k} lassen sich die Antriebswirkvektoren $\mathbf{b}_{i,j}$ gemäss (4.11) und (4.12) berechnen. Der Antriebskinematikvektor gibt an, in welcher Richtung eine Antriebskraft j auf einen Körper i wirkt. Für die meisten Körper ergibt sich ohnehin ein Nullvektor, da der Antrieb nicht direkt auf sie einwirkt. In der Modellierung wirkt jede Antriebskraft entgegengesetzt auf zwei Körper im Modell, nämlich auf den Schlitten und auf die Basis, an der sie sich abstützt. Bei WZMn mit orthogonalen Achsen steht für die Richtung demnach in der Regel an einer Stelle eine 1 bzw. -1, an allen anderen Null. Wegen der Nullen in \mathbf{k} bleiben in der Regel nur drei Vektorkomponenten ungleich Null in den $\mathbf{b}_{i,j}$ übrig, die überhaupt einen Antrieb betreffen. Die einzelnen Elemente von $\mathbf{b}_{i,j}$ werden schliesslich durch ihre jeweilige Trägheitskomponente (= $\mathbf{diag}(\mathbf{M})$ mit Masse M_i und Trägheitsmomenten $I_{xx,i}, I_{yy,i}, I_{zz,i}$) dividiert.

Über die Bezugsmatrix \mathbf{R} wird die Wirkung einer Kraft auf einen Körper berücksichtigt. Die Einheitsmatrix markiert die direkte Auswirkung der Kräfte und Momente. Bei einer Kraft führt ein Versatz ihres Angriffspunkts zum jeweiligen Körperschwerpunkt zudem zu einem Moment, was über die Untermatrix rechts oben einfließt und sich in den zusätzlichen Termen in a-, b- und c-Richtung niederschlägt.

$$\mathbf{b}_{i,j}^T = \mathbf{k}_j \cdot \mathbf{R} = \begin{pmatrix} x & y & z & a - y dz + z dy & b + x dz - z dx & c - x dy + y dx \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

$$\text{mit } \mathbf{k}_j = \begin{pmatrix} x & y & z & a & b & c \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & dz & -dy \\ 0 & 1 & 0 & -dz & 0 & dx \\ 0 & 0 & 1 & dy & -dx & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

In Analogie zur Eingangsmatrix \mathbf{B} beschreibt die Ausgangs- oder Beobachtungsmatrix \mathbf{C} die Auswirkungen auf die Ausgangsgrössen durch das System. Durch die Wahl der Positionen von Lesekopf, Spindelmutter und TCP als Ausgangsgrössen muss nur die linke Hälfte der Matrix in (4.13) aufgestellt werden, rechts sind alle Werte Null. Der obere Teil $_{Axes}C$ der verbleibenden Matrixhälfte enthält die Beziehungen für die Wirkung eines Körpers i auf eine Achse j , und zwar jeweils für Lesekopf und Spindelmutter wie in (4.14) dargestellt. Im unteren Teil $_{TCP}C$ werden in der gleichen Weise die Wirkungen der Körper auf den TCP in den drei kartesischen Achsrichtungen x, y und z abgebildet, siehe (4.15).

$$\mathbf{C}_{(r \times n)} = \begin{pmatrix} Axes \mathbf{C}_{(r-3 \times \frac{n}{2})} & \mathbf{0}_{(r \times \frac{n}{2})} \\ TCP \mathbf{C}_{(3 \times \frac{n}{2})} & \mathbf{0}_{(3 \times \frac{n}{2})} \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

$$\text{mit } Axes \mathbf{C} = \begin{pmatrix} LK \mathbf{c}_{1,1} & LK \mathbf{c}_{1,2} & \cdots & LK \mathbf{c}_{1,n} \\ SM \mathbf{c}_{1,1} & SM \mathbf{c}_{1,2} & \cdots & SM \mathbf{c}_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ LK \mathbf{c}_{a,1} & LK \mathbf{c}_{a,2} & \cdots & LK \mathbf{c}_{a,n} \\ SM \mathbf{c}_{a,1} & SM \mathbf{c}_{a,2} & \cdots & SM \mathbf{c}_{a,n} \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

$$\text{und } TCP \mathbf{C} = \begin{pmatrix} TCP \mathbf{c}_{x,1} & \cdots & TCP \mathbf{c}_{x,n} \\ TCP \mathbf{c}_{y,1} & \cdots & TCP \mathbf{c}_{y,n} \\ TCP \mathbf{c}_{z,1} & \cdots & TCP \mathbf{c}_{z,n} \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Die Beobachtungswirkvektoren $\mathbf{c}_{i,j}$ werden gleich wie die Antriebswirkvektoren aus der Bezugsmatrix \mathbf{R} und dem jeweiligen Beobachtungskinematikvektor \mathbf{k}_j gemäss (4.16) gebildet. Im Falle des Lesekopfs wird die Richtung für den Körper, an dem der Lesekopf befestigt ist positiv angegeben, für den Körper mit dem Massstab negativ. Der Körper, der die Spindelmutter aufnimmt, wirkt in positiver Richtung. In der hier angewendeten Modellierung entfällt die Abstützung des Motors im Strukturmodell, da diese in das Antriebsmodell, das im nächsten Abschnitt behandelt wird, integriert ist.

$$\mathbf{c}_{j,i} = \mathbf{k}_j \cdot \mathbf{R} = \begin{pmatrix} x & y & z & a - y dz + z dy & b + x dz - z dx & c - x dy + y dx \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

Bei den modellierten WZMn können, wie bei den meisten technischen Systemen, die Eingangsgrössen nur über das System und nicht direkt auf die Ausgangsgrössen wirken. Die Elemente der Durchgangsmatrix \mathbf{D} sind in dann alle Null, siehe (4.17). Man spricht in diesem Fall auch von einem nicht sprungfähigen System.

$$\mathbf{D}_{(r \times m)} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} = \mathbf{0} \quad (4.17)$$

Simulations- und Antriebsmodell

Für die Simulation im Zeitbereich wird ein Gesamtmodell der Maschine benötigt, das die Struktur mit dem Antriebssystem verbindet. In MATLAB/Simulink lässt sich das im vorangehenden Abschnitt angesprochene Zustandsraummodell direkt einbinden.

Bild 4.6 zeigt ein Simulationsmodell, das speziell für den Einsatz mit rekonfigurierbaren WZMn entwickelt wurde. Die universelle Verwendbarkeit mit unterschiedlichen Maschinenmodellen wird dadurch erreicht, dass das komplette Modell mit Matrizen arbeitet, die automatisch entsprechend der Anzahl an Antrieben im Maschinenmodell generiert werden. Die notwendigen Adaptionen im Modell erfolgen über Selektoren, Mux- und Demux-Elemente, welche die Signalflüsse je nach Situation umgruppieren, kombinieren oder aufteilen.

Das Modell verbindet ein parametrisiertes Antriebsmodell mit einem Zustandsraummodell der Maschinenstruktur. Eingangsgrossen sind die Sollwerte für Position und Geschwindigkeit sowie die zugehörige Zeit. Diese Grössen entsprechen den Werten, die eine Maschinensteuerung nach der Sollgrössengenerierung dem Regler übergibt.

Die Simulation liefert einerseits die Werte des Ausgangsvektors y des Zustandsraummodells mit den Positionen von Lesekopf und Spindelmutter jedes Antriebs, die TCP-Werte sowie zur Kontrolle die Antriebskräfte am Eingang des Zustandsraummodells und die translatorische Motorposition jedes Antriebs.

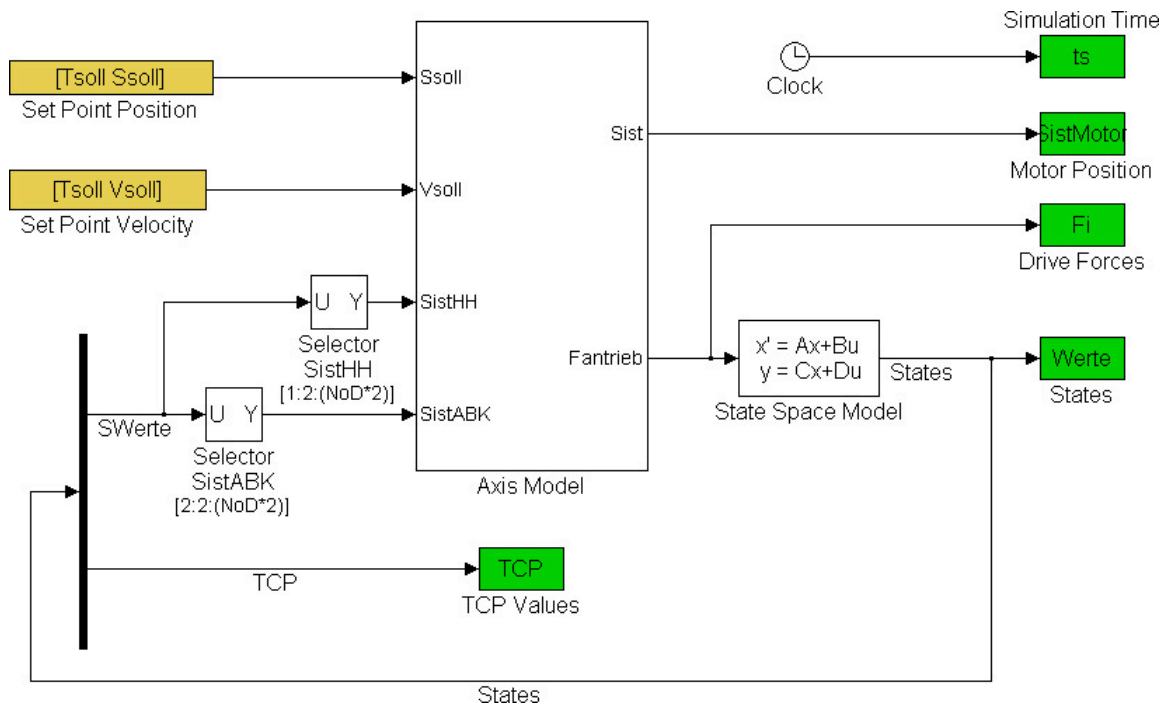


Bild 4.6: Simulationsmodell für den Einsatz mit rekonfigurierbaren WZMn. Das Modell verbindet ein Antriebsmodell mit einem Zustandsraummodell der Maschinenstruktur und passt sich selbst entsprechend der Anzahl an Antrieben im Maschinenmodell an.

Achsmodell Im Submodell für die Achse wird das Reglermodell mit dem Modell des elektromechanischen Antriebsstrangs gekoppelt. Wie aus Bild 4.7 ersichtlich ist, fließen die Sollwerte für Position und Geschwindigkeit zusammen mit dem vom Messsystem erfassten Positionswert direkt in das Reglersystem ein. Dazu kommen der vom Motorgeber gelieferte Positionswert, der Ist-Strom am Motor sowie die am Motorgeber erfasste Ist-Geschwindigkeit.

Die vom Reglermodell generierte Steuerspannung geht zusammen mit der errechneten Position der Spindelmutter in das Subsystem für den elektromechanischen Antriebsstrang ein, woraus dieses die Kraft, den Strom, die Position und die Geschwindigkeit des Motors errechnet.

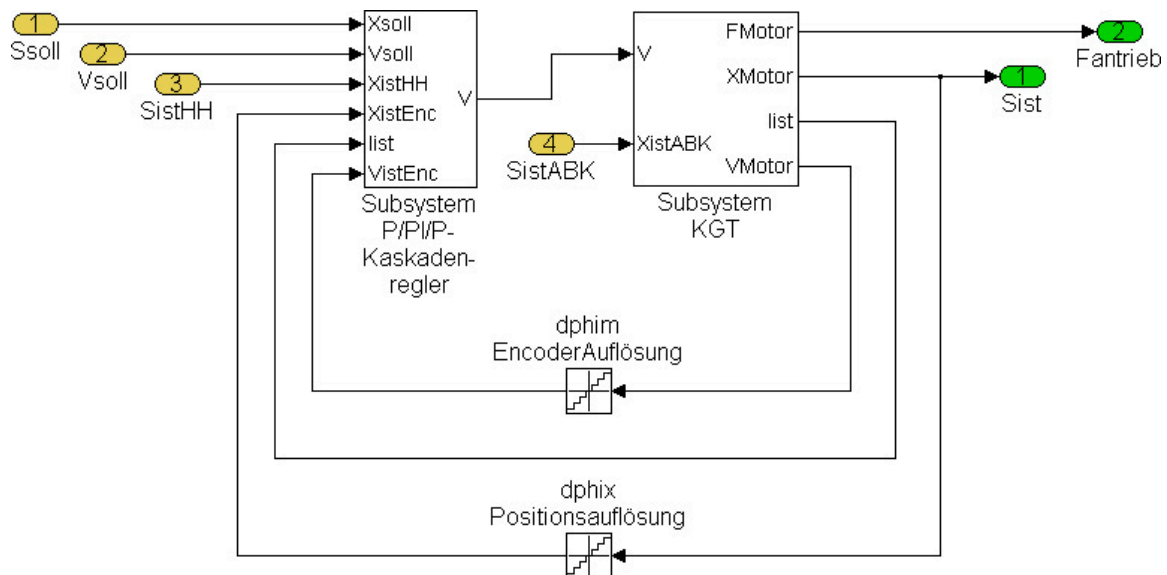


Bild 4.7: Das Subsystem Achsmodell verbindet das Reglermodell mit dem Modell des elektromechanischen Antriebsstrangs.

Reglermodell Das Reglermodell bildet die Steuerungs- und Reglerstruktur einer marktüblichen NC-Steuerung mit kaskadiertem Lage-, Geschwindigkeits- und Stromregelkreis nach (s. Bild 4.8). Da die Wahl der Steuerung für den in Kapitel 5 beschriebenen Prototyp einer rekonfigurierbaren WZM auf eine Siemens 840D sl fiel (s. Abschnitt 5.3.3), orientiert sich das Reglermodell in vielen Punkten an diesem Typ.

Aus der Differenz des Positionssollwertes mit dem vom aktiven Messsystem erfassten Positionswert wird über die Lageregelverstärkung K_{px} , in der Steuerungstechnik auch oft K_v -Faktor genannt, die Sollgeschwindigkeit berechnet. Das Modell ist für die Simulation von Maschinen sowohl mit direktem Messsystem als auch mit indirektem Messsystem vorbereitet. Bei Verwendung eines direkten Messsystems liefert dieses der Steuerung die

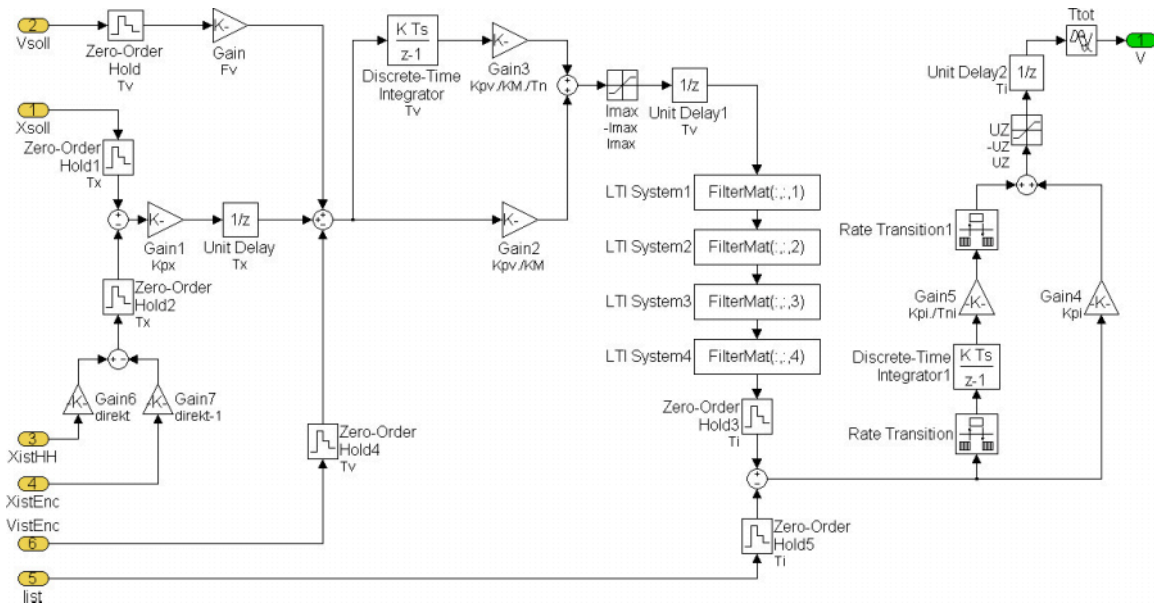


Bild 4.8: Das Reglermodell bildet die Steuerungs- und Reglerstruktur einer marktüblichen NC-Steuerung nach.

Position des Schlittens. Verfügt die Maschine nur über ein indirektes Messsystem, dann kann auch nur die Positionsinformation vom Motorgeber genutzt werden. Die Unterscheidung, welches System vorhanden ist und demnach in der Simulation verwendet werden soll, geschieht im Modell über die boolesche Variable *direkt*, die nur den Wert wahr (= 1) oder unwahr (= 0) annehmen kann.

Im Geschwindigkeitsregelkreis wird die berechnete Sollgeschwindigkeit mit der am Motorgeber erfassten Ist-Geschwindigkeit verrechnet. Ausserdem kann eine zuschaltbare Geschwindigkeitsvorsteuerung zusätzlich beaufschlagt werden, bevor die Soll-Ist-Geschwindigkeitsdifferenz den Proportional- und Integralteil des Reglers durchläuft, der schliesslich den Stromsollwert generiert.

Der Stromsollwert kann bis zu vier Filter durchlaufen, die unabhängig voneinander aktiviert und parametrisiert werden können. Da Transferfunktionsblöcke in Simulink nur Single Input Single Output (SISO) und Single Input Multiple Output (SIMO) unterstützen, muss die Filterfunktion für die in diesem Modell verwendeten Matrizen und Vektoren anders realisiert werden. Eine Möglichkeit, dennoch Transferfunktionen mit Multiple Input Multiple Output (MIMO) in Simulink zu implementieren, sind sogenannte Linear-Time-Invariant-Blöcke (LTI). Für diese Blöcke werden Matrizen erstellt, die auf ihrer Hauptdiagonale die dem jeweiligen Signal zuzuordnende Transferfunktion enthalten. Einem inaktiven Filter wird die Transferfunktion 1 zugewiesen.

Die Filterfunktion wird gemäss der Herstellerdokumentation [114] umgesetzt. Dazu wer-

den die Filtermatrizen bei der Initialisierung des Simulationsmodells mit den Angaben aus den Achsmodellen gemäss (4.18) für einen Tiefpass 2. Ordnung oder nach (4.19) für ein allgemeines Filter 2. Ordnung erstellt. Standardmässig wird ein PT2-Filter mit Nenner-Dämpfung 0.7 und Nenner-Eigenfrequenz 2000 Hz gesetzt.

$$H(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{2\pi f_N}\right)^2 + \frac{2D_N}{2\pi f_N} \cdot s + 1} \quad (4.18)$$

$$H(s) = \frac{\left(\frac{s}{2\pi f_Z}\right)^2 + \frac{2D_Z}{2\pi f_Z} \cdot s + 1}{\left(\frac{s}{2\pi f_N}\right)^2 + \frac{2D_N}{2\pi f_N} \cdot s + 1} \quad (4.19)$$

D_Z [-] Zähler-Dämpfung f_Z [Hz] Zähler-Eigenfrequenz
 D_N [-] Nenner-Dämpfung f_N [Hz] Nenner-Eigenfrequenz

Die gefilterten Stromsollwerte erreichen nun den Stromregelkreis und werden danach schliesslich in ein Spannungssignal umgewandelt.

Im Simulationsmodell sind nur Variablen als Parameter gespeichert. Die aktuellen Antriebsparameter werden bei der Initialisierung aus dem Modul- bzw. Datenmodell eingelesen. Wie an der realen Steuerung sind auch im Modell die wichtigsten Regelungsparameter einstellbar: Die Lageregelverstärkung K_v , die Geschwindigkeitsverstärkung K_p , die Geschwindigkeitsnachstellzeit T_n , die Stromregelverstärkung K_{pi} die Stromreglernachstellzeit T_{ni} sowie die Geschwindigkeitsvorsteuerung F_v und die erwähnten Stromsollwertfilter.

Modell des elektromechanischen Antriebsstrangs Im Submodell des elektromechanischen Antriebsstrangs wird die Umwandlung der elektrischen Stellgrösse aus dem Regler in eine mechanisch wirksame Kraft auf das Strukturmodell nachgebildet. Bild 4.9 zeigt ein Modell, das für eine Maschine mit Kugelgewindetrieben (KGT) entwickelt wurde, wie sie überwiegend in WZMn zum Einsatz kommen.

Die als Eingangsgrösse übergebene Spannung wird über eine Transferfunktion, welche die physikalische Stromdynamik berücksichtigt, gemäss (4.20) in einen Strom umgewandelt, der im Motor fliesst [157]. Wie bei den Filtern werden auch hier wieder die Transferfunktionen für jeden einzelnen Antrieb in der sogenannten Wicklungsmatrix zusammengefasst, um die MIMO-Signale verarbeiten zu können. Aus dem Strom lässt sich über die Motor-konstante die Kraft berechnen, die der Motor damit entwickelt.

$$G(s) = \frac{R^{-1}}{T_{el} \cdot s + 1} \quad (4.20)$$

Über die Motorträgheit ergibt sich die Beschleunigung, die der Motor erreicht. Nach zweifacher Integration erhält man die translatorisch gerechnete Verlagerung des Motors, von

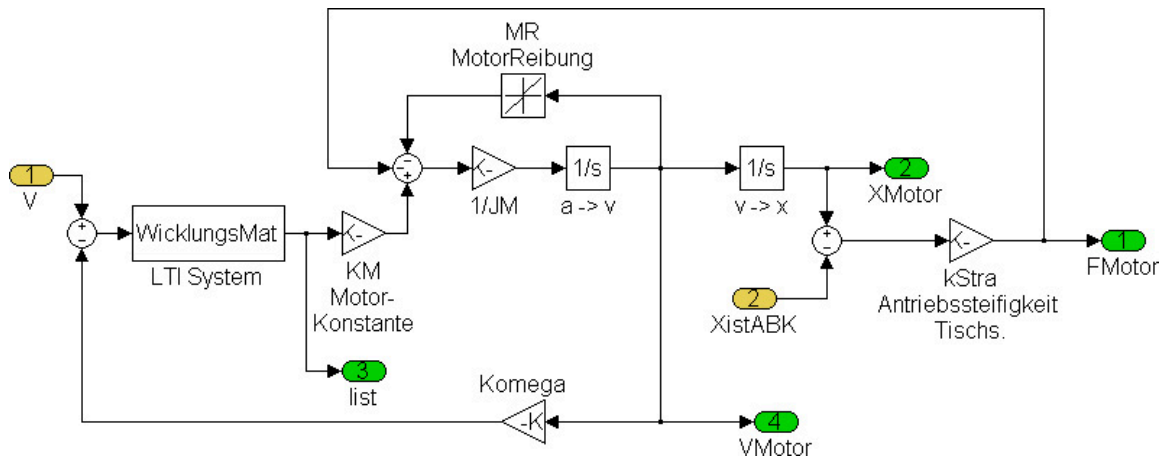


Bild 4.9: Modell des elektromechanischen Antriebsstrangs mit Kugelgewindetrieb. Bei der Initialisierung des Simulationsmodells werden die Variablen mit den im Modell hinterlegten Antriebsdaten parametrisiert.

der die über das Strukturmodell berechnete Position der Spindelmutter abgezogen wird. Die Differenz der beiden Positionen wirkt auf die Kugelgewindespindel, die damit eine Stauchung oder Dehnung erfährt und aufgrund ihrer Steifigkeit zu einer Kraft führt, die als resultierende Antriebskraft angesehen werden kann.

Die Reglereinstellungen des parametrisierten Antriebsmodells werden vor dem Start der Simulation automatisch nach den Regeln in [155] bestimmt. Die Formeln liefern konservative Werte, da sie das Dämpfungsoptimum im Geschwindigkeitsregelkreis anstreben und nicht das Performanceoptimum der lagegeregelten Achse. Für die Optimierung können die Werte alternativ auch manuell vorgegeben werden. Da das gesamte Antriebsmodell translatorisch berechnet wird, müssen alle rotatorischen Größen über die Spindelsteigung h_s umgerechnet werden. Beispielsweise erfolgt die Umrechnung einer Drehträgheit in eine translatorische Trägheit (= Masse) nach [157, S.87] über den Term $\left(\frac{2\pi}{h_s}\right)^2$.

Die Parameter des Stromregelkreises können weitgehend unabhängig von der mechanischen Struktur des Systems aus den elektrischen Kennwerten der Antriebskomponenten bestimmt werden [156]. Die Stromregler-Verstärkung K_{pi} und die Nachstellzeit T_{ni} können demnach entweder aus den im Datenmodell hinterlegten Komponentenspezifikationen berechnet werden oder sie sind dort direkt gespeichert.

Im Gegensatz zum Stromregelkreis ist die Einstellung des Geschwindigkeitsregelkreises stark von der Maschinenmechanik und -konfiguration abhängig. Massgebenden Einfluss auf die erreichbaren Reglerwerte hat die skalierte Proportionalverstärkung κ , berechnet nach (4.21). Sie stellt eine Obergrenze dar, die die dominante elastische Kopplung zum Antrieb berücksichtigt.

$$\kappa \leq \min \left(\begin{array}{l} \omega_0 \cdot \lambda^{0.8} \\ 2 \cdot \omega_{0m} \cdot D \\ (2 \cdot T)^{-1} \end{array} \right) \quad \text{mit} \quad \lambda = \frac{J_M}{J_M + J_L} \quad (4.21)$$

κ	[1/s]	skalierte Proportionalverstärkung
ω_0	[1/s]	Kritische Eigenfrequenz des mechanischen Antriebsstrangs
λ	[-]	Trägheitsverhältnis
ω_{0m}	[1/s]	Kritische Eigenfrequenz des elastisch gekoppelten Messsystems
D	[-]	Relative Dämpfung der Messsystemankopplung
T	[s]	Ersatzzeitkonstante des stromgeregelten Antriebs
J_M	[kg m ²]	Motorträgheit
J_L	[kg m ²]	Lastträgheit

Mit κ lassen sich nun gemäss (4.22) und (4.23) Startwerte für die Nachstellzeit T_n im Geschwindigkeitsregler und die Proportionalverstärkung K_p berechnen. Maschinensteuerungen verwenden üblicherweise den rotatorisch ausgedrückten Wert K_p während die Simulation mit dem translatorisch berechneten Wert K_{pv} arbeitet.

$$T_n \geq \frac{4}{\kappa} \quad (4.22)$$

$$K_p = J \cdot \kappa = K_{pv} \cdot \left(\frac{2\pi}{h_s} \right)^2 \quad \text{mit} \quad K_{pv} = \theta \cdot \kappa \quad (4.23)$$

T_n	[s]	Nachstellzeit im Geschwindigkeitsregler
K_p	[Nms/rad]	Proportionalverstärkung (rotatorisch) für Steuerung
K_{pv}	[Ns/m]	Proportionalverstärkung (translatorisch) für Simulation
J	[kg m ²]	Trägheitsmoment (rotatorische Trägheit)
θ	[kg]	Masse (translatorische Trägheit)
h_s	[m]	Spindelsteigung

Die Einstellung des Lagereglers erfolgt gemäss (4.24) und (4.25), wieder unter Berücksichtigung der skalierten Proportionalverstärkung und der kritischen Eigenfrequenz des mechanischen Antriebsstrangs. Die einstellbare Abtastzeit T_v des Lageregelkreises hängt zudem von der Art des verwendeten Messsystems ab. Über die boolesche Schaltvariable δ_μ wird der zweite Term in (4.24) gesteuert. Wird ein indirektes Messsystem verwendet, ist $\delta_\mu = 0$ und der Klammerausdruck wird 1. Für ein direktes Messsystem wird $\delta_\mu = 1$ gesetzt und der Klammerausdruck dadurch aktiviert. Die Lageregelverstärkung wird in der Simulation in SI-Einheiten angegeben. Auf NC-Steuerungen wird üblicherweise die Einheit $\frac{m/min}{mm}$ verwendet, der dafür nötige Umrechnungsfaktor $16\frac{2}{3}$ ist dann voreingestellt. Weitere detaillierte Hinweise zur Modellierung der elektrischen und mechanischen Komponenten finden sich in [157].

$$T_v = \left\{ \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\omega_0} = \frac{\kappa + \omega_0}{\kappa \cdot \omega_0} \right\} = \frac{1}{\kappa} \cdot \left(\frac{\kappa}{\omega_0} + 1 \right)^{\delta_\mu} \quad (4.24)$$

$$K_v \leq \frac{1}{4 \cdot T_v} \quad (4.25)$$

T_v	[s]	Abtastzeit des Lageregelkreises
K_v	[1/s]	Lageregelverstärkung
δ_μ	[-]	Schaltvariable für die Art des Messsystems

Datenmodell

Für jede Maschine und ihre Module ist es sinnvoll, teilweise gar erforderlich, neben den reinen strukturmechanischen Daten weitere Informationen in einem Datenmodell zu speichern. Typische Angaben sind Identifikationsnummern, Typ-Bezeichnungen, Spezifikationen, Katalogwerte oder Messergebnisse bzw. Kompensationswerte.

Die erforderliche Datenstruktur wird heute üblicherweise in objektorientierter Programmierweise (OOP) implementiert. Ein Kennzeichen der OOP ist die Kapselung der Daten, auf die nur über definierte Methoden zugegriffen werden kann. Der Vorteil dieser restriktiven Datenmanipulation liegt darin, dass Daten nicht versehentlich überschrieben oder falsch verarbeitet werden können. Die Definition abstrakter Klassen und die Vererbung von Eigenschaften auf abgeleitete Klassen sind weitere Aspekte, die bei der Modellierung modularer Produkte nützlich sind.

Auch MATLAB bietet die Möglichkeit, eigene Objekte und Methoden zu definieren, die sich in bestehende Datenstrukturen einbinden lassen. Dieses Vorgehen wurde genutzt, um ein Datenmodell des Antriebssystems zu erstellen. Es enthält Informationen über alle in den Modulen vorhandenen Antriebskomponenten: Motor, Messsystem, Kugelgewindetrieb und Leistungsteil. Bild 4.10 zeigt eine mögliche Struktur für ein Antriebssystem mit Kugelgewindetrieb. In diesem UML-Diagramm (Unified Modeling Language) sind die benötigten Klassen mit ihren Attributen dargestellt. Die implementierten Methoden sind nicht einzeln aufgeführt, es handelt sich dabei lediglich um solche zum Setzen, Lesen und Anzeigen der Attributwerte. Die Vorteile der OOP kommen vor allem bei der mehrfachen Nutzung gleicher oder ähnlicher Komponenten zum Tragen, so dass Hersteller von Modulen für rekonfigurierbare WZMn besonders davon profitieren können.

Die detaillierte Objektstruktur ist im Anhang A nachzuschlagen. In dieser Arbeit wurden die Antriebe für die beiden entwickelten Achsmodule als *DriveLLA* und *DriveKLA* modelliert, die in das jeweilige Modulmodell eingebunden werden. Auf dieselbe Weise liessen sich auch die Steuerungsdaten in einer Struktur ablegen. Maschinendaten könnten dann beim

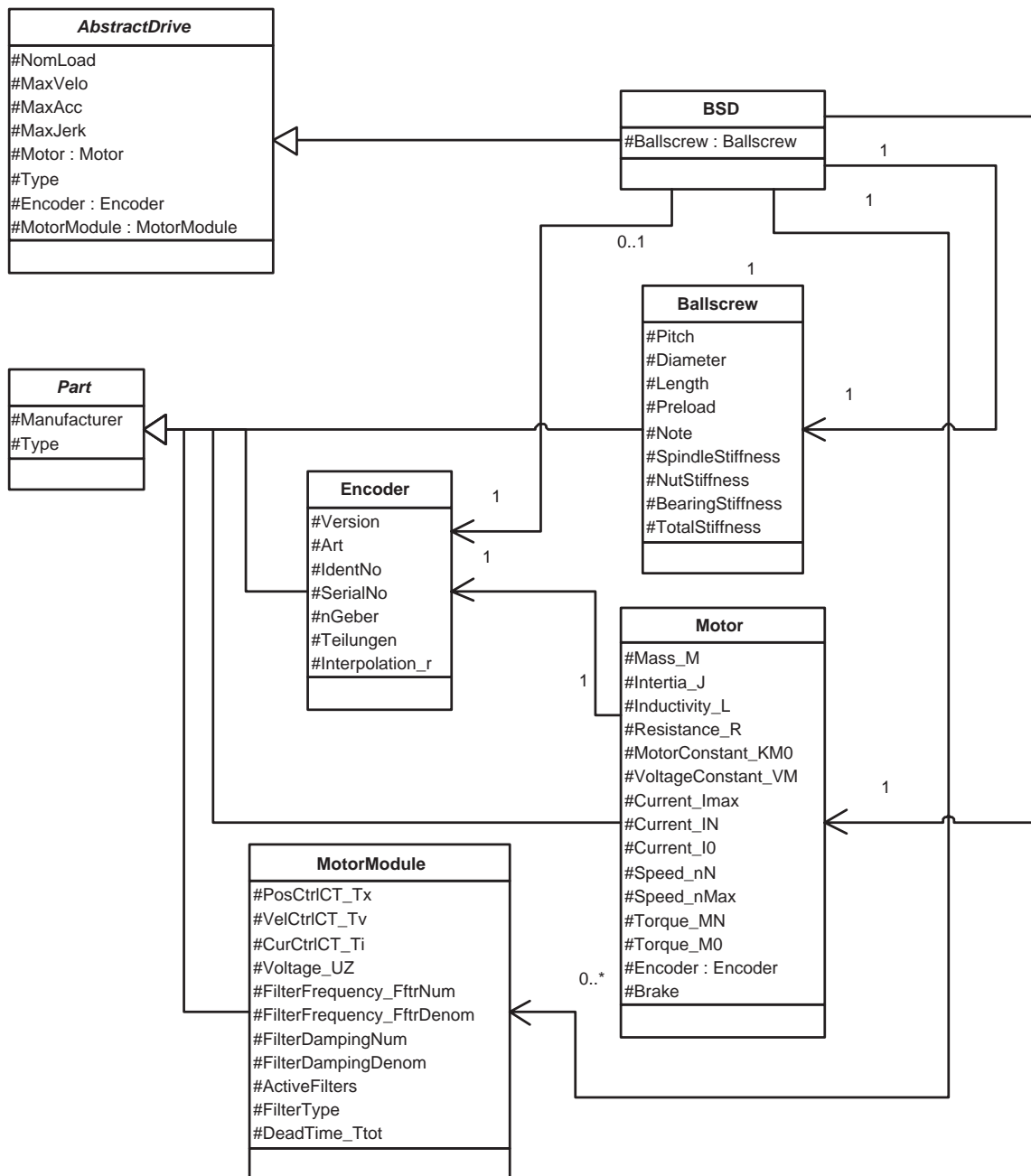


Bild 4.10: UML-Diagramm einer möglichen Struktur eines Datenmodells für ein Antriebssystem mit Kugelgewindetrieb.

Erstellen der NC-Steuerungskonfiguration direkt vom Datenmodell in das Steuerungsarchiv geschrieben werden. Ebenso könnten PLC-Funktionen als Cell-Variablen mitgeführt, extrahiert und direkt in das Steuerungsarchiv integriert werden. Bei Bedarf könnten sie auch in der PLC-Programmierungsumgebung zur Verfügung gestellt werden.

4.1.3 Aufbau des mechatronischen Maschinenmodells

Das mechatronische Maschinenmodell ist ein umfassendes Modell, das alle für die weiteren Prozessschritte nötigen Informationen enthält. Es fasst die im vorangehenden Abschnitt 4.1.2 erläuterten Modelle in einem einzigen mechatronischen Modell zusammen.

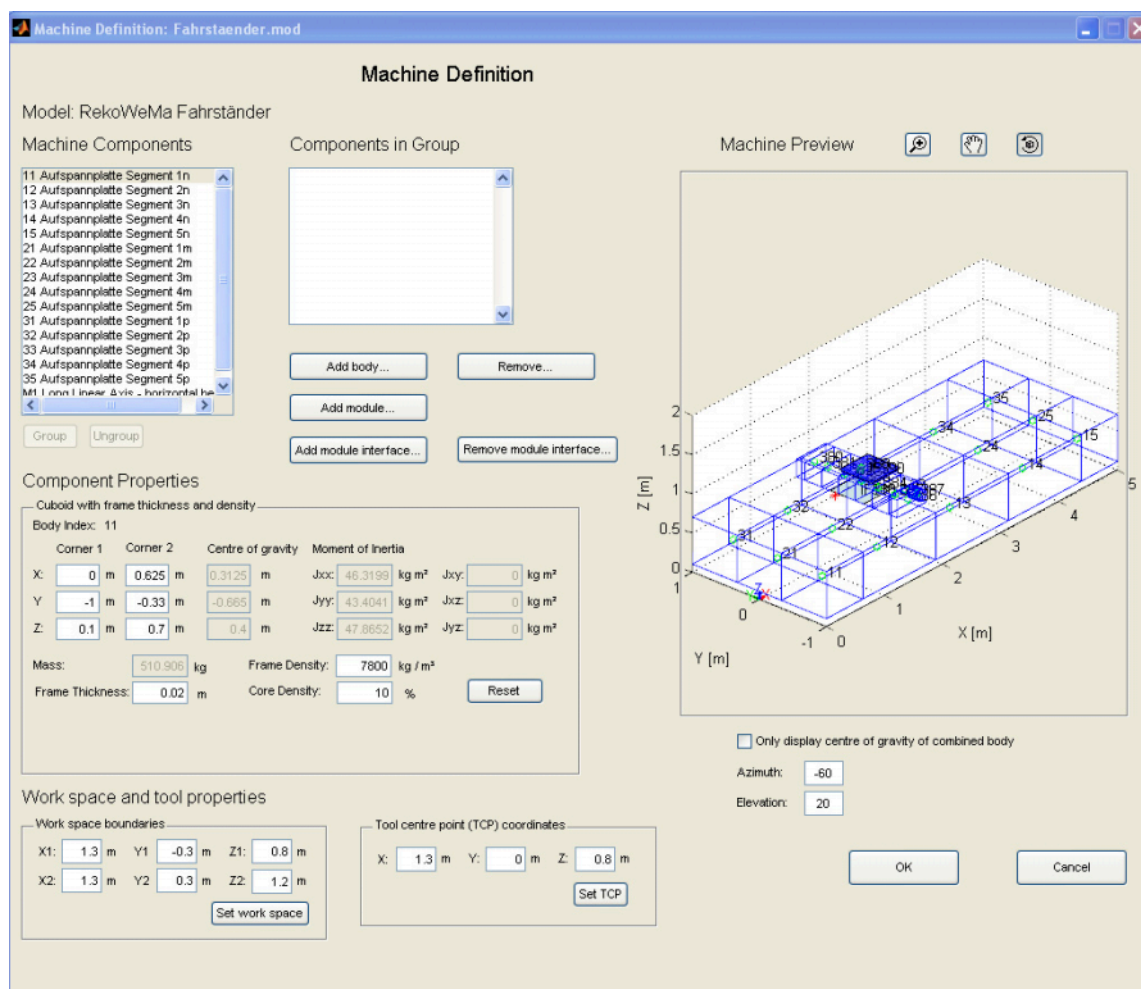


Bild 4.11: Fenster zur Definition einer Maschinenstruktur im Achsbaukasten. Im GUI können verschiedene Körper über Parameter definiert und auch ganze Modulmodell eingefügt werden.

Der Aufbau des mechatronischen Maschinenmodells erfolgt im Graphical User Interface (GUI) des Achsbaukastens (ABK). Bild 4.11 zeigt das GUI-Fenster *Machine Definition* zur Definition einer Maschinenstruktur. Darin lassen sich einzelne Starrkörper nach der zuvor beschriebenen Methodik definieren und zu einem Strukturmodell zusammenstellen. Zudem besteht die Möglichkeit, ganze Modulmodelle einzubinden und damit eine rekonfigurierbare WZM zu modellieren. Neben der Strukturdefinition werden in diesem Dialog

die Lage des TCP und die Grösse des Arbeitsraums, die für einige Auswertungen benötigt wird, bestimmt.

Die Koppelstellen zwischen den Körpern werden im Menü *Coupling Definition* festgelegt. Der Anwender wählt dazu aus einer Liste den gewünschten Typ der Koppelstelle aus und gibt dessen Lage im Raum, die Steifigkeitswerte und die Indices der beteiligten Körper an. Als Koppelstellen zur Auswahl stehen 1D-, 2D- oder 3D-Steifigkeiten in Punkt-, Linien- und Netzanordnung, eine Rundtischlagerung sowie eine universell einsetzbare 6D-Steifigkeit. Zudem wird in diesem Menü die Kinematik der Maschine definiert. Dies erfolgt durch Aufstellen einer Kinematikmatrix, deren Spalten den drei kartesischen Achsrichtungen und deren Zeilen den im Modell definierten Körpern entsprechen. Bewegliche Körper auf Werkzeugseite erhalten in der Spalte der zugehörigen Achsrichtung eine 1, werkstückseitige eine -1. Alle anderen Komponenten der Matrix sind 0. Ist einer der beteiligten Körper ein Balken, so gibt der Benutzer über ein Untermenü im Detail an, welche Koppelstelle an welches Balkensegment angebunden wird.

Über das Menü *Drive Definition* werden die Antriebsparameter, wie sie für die statischen Berechnungen benötigt werden, definiert. Dies sind wiederum die Lage im Raum, die Wirkrichtung und die angenommene Steifigkeit des geregelten Antriebsstrangs. Das im vorangehenden Abschnitt beschriebene Antriebsmodell hingegen wird nicht im Modell abgespeichert, sondern es wird nur ein Verweis auf das zu verwendende Modell gesetzt. Da das Antriebsmodell allgemein gehalten ist und erst bei der Initialisierung mit den im Maschinenmodell hinterlegten Parametern belegt wird, ist dieses Vorgehen zulässig.

Im Folgenden werden das Datenformat, der Aufbau und der Einsatz von Modulmodellen im Speziellen sowie die Eingriffsmöglichkeiten bei der Modellerstellung und Simulation besprochen.

Datenformat

Das Maschinenmodell wird als Variable vom Typ „Struct“ in MATLAB aufgebaut. Dieser Datentyp bietet sich an, um auf einfache Weise übersichtliche Strukturen zu erstellen. Die Daten lassen sich logisch anordnen, unkompliziert auslesen und beliebig erweitern. Zudem sind ggf. nur minimale Anpassungen an bestehendem Programmcode erforderlich, um diesen mit einem Struct-Modell verwenden zu können.

In Bild 4.12 ist die oberste Ebene der Datenstruktur eines Maschinenmodells dargestellt. An die Basisvariable *Machine* sind acht Zweige angehängt, die wiederum Struct-Variablen oder Cell-Arrays sind und deren Inhalte in vier verschiedene Kategorien eingeteilt werden können. Die Variable *GeneralInfo* enthält allgemeine Angaben über das komplette Maschinenmodell. Dazu zählen der Dateiname und die Modellbezeichnung sowie die Angabe, ob es sich um eine Maschine mit horizontaler oder vertikaler Werkzeugspindel handelt.

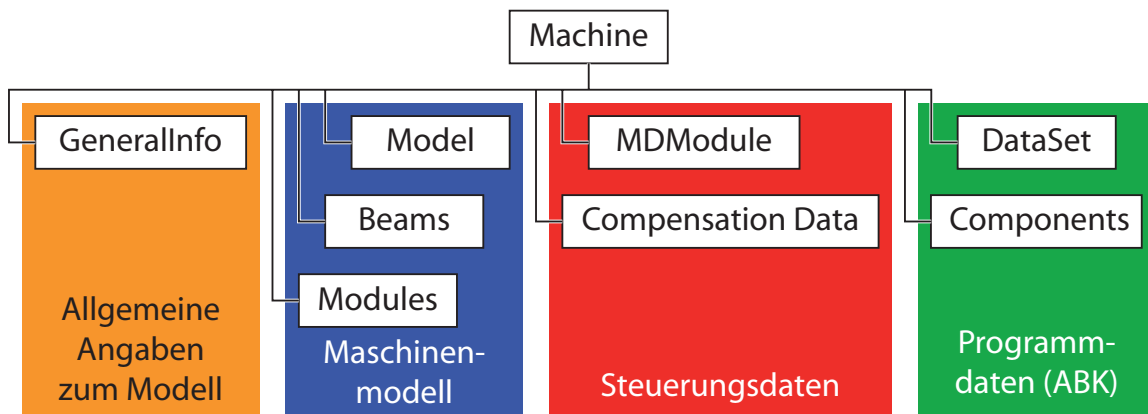


Bild 4.12: Die oberste Ebene der Datenstruktur eines Maschinenmodells enthält Angaben aus vier verschiedenen Kategorien.

In der Struct-Variablen *Model* sind die Variablen zusammengefasst, die für die Berechnungen und Simulationen benötigt werden. Diese Daten formen das Strukturmodell der Maschine, auf die der Kern des ABK zugreift. Aus datenmanipulatorischen Gründen werden die Angaben zu Balken in einer eigenen Struct namens *Beams* gespeichert. Ihr Aufbau entspricht dem einer reduzierten Maschine, die nur die Balkenkörper enthält. Ebenso werden auch Module in einer eigenen Struct verwaltet. Erst direkt vor einer Berechnung oder Simulation werden beim sogenannten Pre-Processing die erforderlichen Angaben über Balken und Module ausgelesen. Dann wird daraus, zusammen mit den Model-Daten, das Strukturmodell generiert.

Die Cell-Arrays *MDModule* und *CompensationData* tragen die Informationen, die für die Konfigurierung der Steuerung benötigt werden. In ersterer sind die Maschinendaten für alle verwendeten Maschinenachsen abgelegt. Daraus kann eine Steuerungsarchivdatei erstellt werden, über die sich die Maschinensteuerung bei der Rekonfigurierung konfigurieren lässt. In der Variable mit dem selbstsprechenden Namen *CompensationData* können berechnete oder über Messungen bestimmte Kompensationswerte hinterlegt werden, die in der Steuerung bei Bedarf verwendet werden können.

Schliesslich benötigt der ABK als Programm die Variablen *DataSet* und *Components*. Über *Components* werden die im Modell benutzten Komponenten verwaltet und ihre korrekte Darstellung in Menüs realisiert. *DataSet* dient zum Sicherstellen, dass alle erforderlichen Eingaben getätigt wurden und keine Daten fehlen, die zu Programmfehlern oder falschen Berechnungen führen könnten.

Modulmodelle

Das Kernelement des Konzepts der rekonfigurierbaren WZMn ist die Verwendung von in sich abgeschlossenen Modulen, die der Maschinenanwender je nach aktuellem Bedarf zu einer Maschine zusammensetzen kann, die seine Anforderungen erfüllt. Wie in Bild 4.2 illustriert, müssen zu allen physischen Modulen auch jeweils virtuelle Module existieren, aus denen der Anwender vor einer Rekonfigurierung virtuelle Maschinenmodelle erstellt. Diese werden untersucht, um die am besten geeignete Konfiguration zu finden und die dafür erforderlichen Steuerungsdaten zu generieren.

Dieser Ablauf setzt voraus, dass jeder Modulhersteller mit seinem Produkt auch ein zugehöriges Modell liefert. Ein solches Modell muss kompatibel zum Rekonfigurierungstool des Anwenders sein. Am Beispiel des ABK, der die Rolle eines integrierten Rekonfigurierungstools übernimmt, wird im Folgenden erläutert, wie ein solches Modell erstellt und verwendet werden kann.

Erstellen der Modulmodelle Maschinenmodule weisen einen Grossteil der Merkmale einer kompletten WZM auf, was sich in ihrer Modellierung niederschlägt. Folglich sollte das Modulmodell auch ähnlich aufgebaut sein wie ein Maschinenmodell. Ein Modulmodell muss Angaben über die Struktur, die eingebauten Komponenten - insbesondere die Antriebskomponenten - und gegebenenfalls steuerungsspezifische Daten enthalten. Daher bietet es sich an, die Struktur des mechatronischen Maschinenmodells zu übernehmen und diese, wo nötig, anzupassen.

Auf Basis der Datenstruktur in Bild 4.12 können im ABK auch entsprechende Modulmodelle erstellt werden. Die Stammvariable trägt dann die Bezeichnung *Module* anstatt *Machine*, und der Strukturast *Modules* entfällt, da innerhalb eines Moduls keine anderen Module verwendet werden. Dieses Vorgehen bei zur Modellierung ist geeignet für Module, die aus wenigen Strukturelementen mit einfacher Geometrie bestehen und keine oder wenig Steuerungsinformationen enthalten.

Für komplexere Module und detailliertere Modelle ist das Erstellen über Skriptfiles zweckmässig. Dabei wird die Grundstruktur des Maschinenmodells als Vorlage verwendet. Die einzelnen Modulkörper werden direkt über Funktionsaufrufe mit entsprechenden Argumenten generiert und in das Modul-Struct integriert. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist der, dass jede einzelne Modellvariable nach ihrer Erstellung gezielt angesprochen werden kann. So können die Eigenschaften eines Moduls im Laufe des Entwicklungsprozesses nach und nach detailliert werden. Beispielsweise lassen sich die Massen- und Trägheitsinformationen aus einem CAD-Modell extrahieren und dem entsprechenden Körper im Modulmodell zuweisen. Besonders effektiv ist diese Methode zur gezielten, selektiven Anpassung einzelner Steifigkeitswerte zum Modellabgleich nach einer experimentellen Modalanalyse. Ein weiterer Vorteil der Modellgenerierung über Skriptfiles kommt vor allem Herstellern

mit breiter Produktpalette zugute: Durch Anpassen von Parametern und Variablenwerten lassen sich auf sehr effiziente Weise Variantenmodelle generieren, ohne gleichartige Komponenten nochmals modellieren zu müssen und dabei Fehler zu riskieren. Für noch komfortablere und effizientere Nutzung wäre eine Anbindung an diverse CAD-Systeme denkbar, so dass über eine Schnittstelle die für die Modellierung benötigten Daten exportiert werden könnten.

Einsatz der Modulmodelle Für den Anwender gestaltet sich die Verwendung von Modulmodellen im ABK sehr einfach. Um ein Modul in ein Maschinenmodell einbinden zu können, muss dort mindestens eine freie sog. Modulschnittstelle vorhanden sein. Jede Modulschnittstelle ist genau einem Körper zugeordnet. Ihre Lage im Raum wird über die Mittelpunktkoordinaten und die Normalenrichtung der Flanschfläche definiert. Gemäss der realisierten und in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Schnittstelle muss ihr eine von zwei Schnittstellenausprägungen zur Fixierung zugewiesen werden. In der graphischen Darstellung des Modells sind Schnittstellen als farbige Quadrate erkennbar, wobei die Farbe die Ausprägung angibt: eine Schnittstelle mit Durchgangsbohrungen ist grün, eine mit Gewinden blau (vgl. Bild 4.13).

Module verfügen von Haus aus über mindestens eine Schnittstelle, Bewegungsmodule besitzen in der Regel zwei Schnittstellen. Enthält das Modell bereits Module, so stehen die Schnittstellen höchstwahrscheinlich zur Verfügung, wird auf eine frei modellierte Grundstruktur aufgesetzt, so kann der Nutzer an dieser selbst Modulschnittstellen definieren.

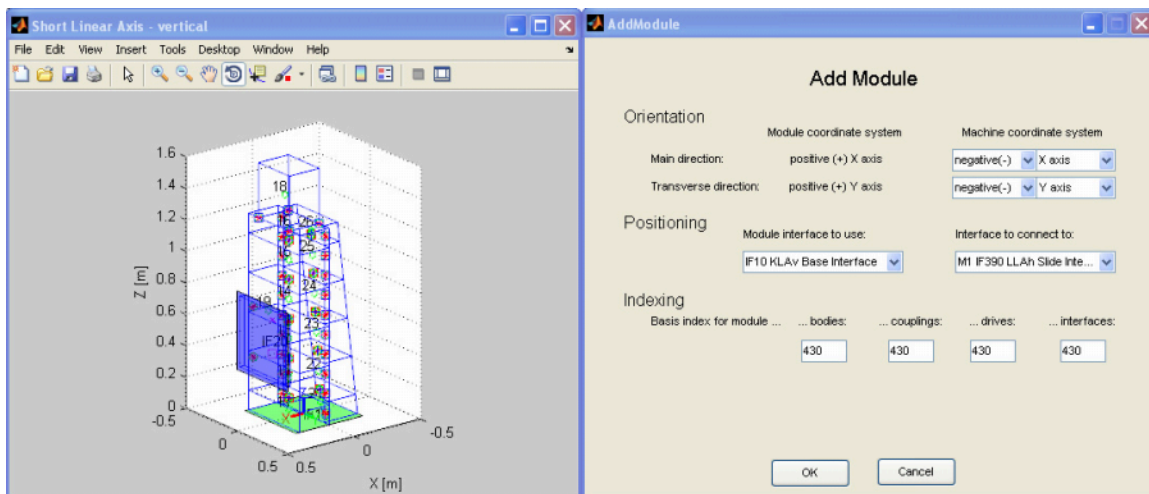


Bild 4.13: Dialogfenster im ABK-GUI zum Einbinden eines Moduls in ein Maschinenmodell. Der Benutzer wählt die Orientierung im Raum und die Schnittstellen. Ein zweites Fenster (li.) zeigt das Modul in seinem Modulkoordinatensystem.

Das Hinzufügen eines Modells wird über den Button *Add Module* im Menü *Machine De-*

fnition (Bild 4.11) gestartet. Der Benutzer wählt unter den vorhandenen Modulmodellen dasjenige aus, das er einbinden möchte. Daraufhin erscheinen ein Dialogfenster, über das die Einbindung gesteuert wird, sowie ein weiteres Fenster mit einer graphischen Darstellung des Moduls und des zugehörigen Koordinatensystems; Bild 4.13 zeigt beide Fenster. Im Dialogfenster wird erstens die Orientierung des Moduls im Maschinenkoordinatensystem festgelegt und zweitens werden die beiden zu verbindenden Schnittstellen gewählt. Im Maschinenmodell erhält jede Modulkomponente zur Identifizierung einen eindeutigen Index. Das Programm schlägt dem Benutzer automatisch eine passende Spanne von Indices vor, die er zwar abändern kann, normalerweise aber einfach akzeptiert.

Die erforderlichen Anpassungen und Transformationen der Moduldaten erfolgen automatisch im ABK. Bild 4.14 illustriert die Vorgänge beim Einbinden eines Modulmodells in ein Maschinenmodell. Beim Laden der Moduldatei wird eine Arbeitskopie der Datenstruktur angelegt, so dass das Original-Modulmodell unverändert bleibt. Auf die Arbeitskopie werden über den Add-Module-Dialog die erforderlichen Transformationen angewendet, um das Modul korrekt im Maschinenkoordinatensystem auszurichten. Auch die Anpassung der Indices erfolgt in diesem Schritt. Die transformierte und adaptierte Modul-Variable wird als Ganzes im Maschinenmodell gespeichert und behält so ihren Status als gekapselte Einheit. Veränderungen am Maschinenmodell, insbesondere das Hinzufügen oder Entfernen eines Moduls, erfordern mit diesem Modellaufbau nur geringen Aufwand und minimale Eingriffe.

Erst während des Pre-Processings, direkt vor einer Berechnung oder Simulation, wird das jeweils benötigte Modell aus den aktuell eingebundenen Modulen erstellt. Die Starrkörper aus den Modulen werden mit denen des Maschinenmodells in einer einzigen Körpermatrix zusammengeführt. Die zwei zu einem Schnittstellenpaar gehörenden Körper werden dabei zu einem Starrkörper vereinigt. Zusammen mit den restlichen Daten aus den Modulmodellen wird schliesslich ein konsistentes Modell gebildet.

Die Distribution der Modulmodelle könnte auf mehrere Arten erfolgen. Eine interessante Variante wäre, einen Speicher in die Module zu integrieren, auf dem das zugehörige Modell abgelegt ist. Die Gefahr von Verwechslungen oder des Verlusts der Modelldatei ist relativ gering. Zudem liessen sich auch Nutzungsinformationen wie die Betriebszeit, die letzte Wartung oder die letzte Verwendung darauf speichern und eventuell direkt über die Steuerung nutzen. Allerdings muss eine Verbindung zwischen den Modulen und dem Planungswerkzeug hergestellt werden können, sonst ist keine Offline-Vorbereitung der Rekonfigurierung möglich. Eine andere zweckmässige Variante ist die zentrale Speicherung in einer Modulbibliothek, die alle verfügbaren Modulmodelle enthält. Der Benutzer greift dann mit dem Planungstool direkt auf diese Bibliothek zu. Vorteile bei dieser Variante sind die Möglichkeit zur unkomplizierten automatischen Aktualisierung, falls beispielsweise die Hersteller Updates liefern, und der bessere Überblick. Am effizientesten wäre eine Kombination der beiden Variaten, bei der die Daten zwar physisch auf den Modulen

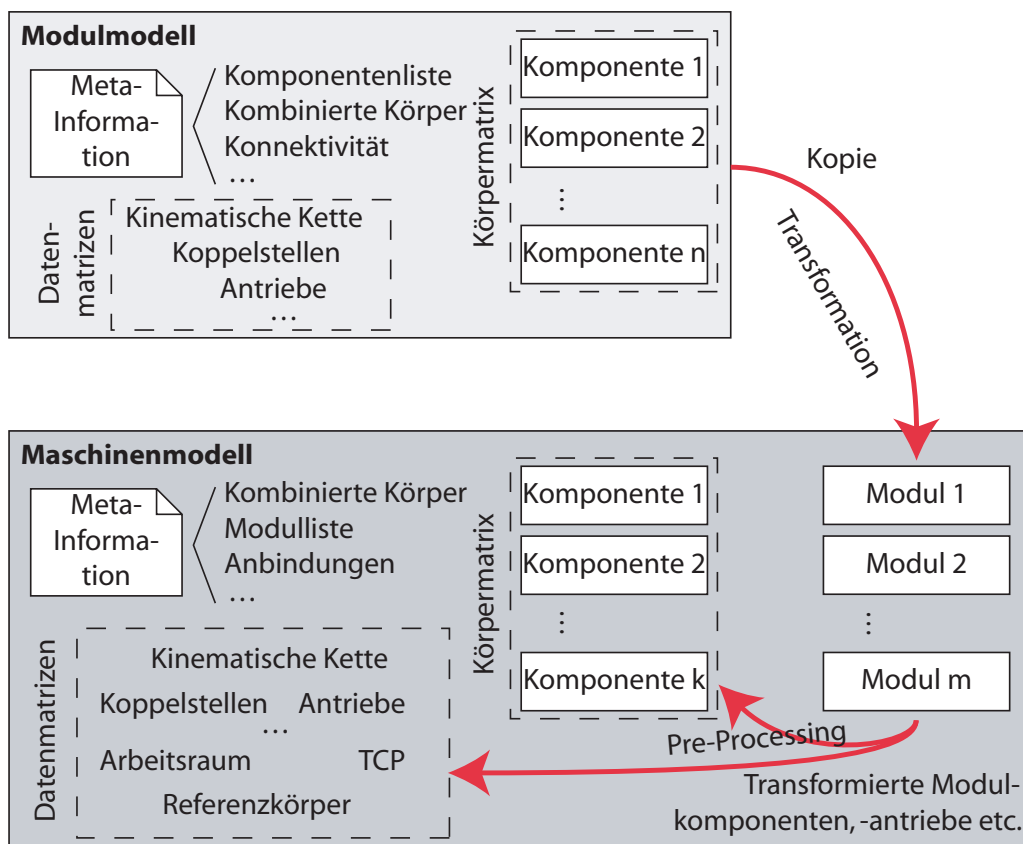


Bild 4.14: Schematischer Aufbau eines Maschinenmodells. Die Modulmodelle werden transformiert und als Kopie in das Maschinenmodell eingebunden.

gespeichert werden, diese auf ihren Lagerplätzen aber mit dem Planungstool verbunden sind und dem Anwender in einer virtuellen Bibliothek präsentiert werden.

Eingriffsmöglichkeiten bei der Modellierung

Auch wenn die automatisch generierten Modelle für viele Berechnungen und Simulationen ausreichend genau sind und aussagekräftige Ergebnisse liefern, so ist in machen Fällen ein manueller Eingriff dennoch sinnvoll und nützlich. Da der Achsbaukasten auf MATLAB basiert, stehen damit tiefgreifende Manipulationsmöglichkeiten zur Verfügung, die jedoch nur vom fortgeschrittenen Anwender mit MATLAB-Kenntnissen genutzt werden sollten. Durch das Setzen von **Haltepunkten** im Programmcode, kann der aktuelle Modellzustand an fast jeder beliebigen Stelle untersucht werden. Dieses Vorgehen wird vor allem zur Überprüfung der Modellierung verwendet, da sofort erkannt werden kann, ob das Modell dem erwarteten Soll-Zustand entspricht.

Reine Zwischenausgaben oder wiederholte, identische Manipulationen lassen sich am effi-

zientesten direkt in den **Programmcode** integrieren. Damit lässt sich beispielsweise das Modell in einem bestimmten Zustand speichern, so wie es mit dem Zustandsraummodell automatisch geschieht. Die gespeicherten Variablen können dann in den *Workspace* geladen und dort analysiert werden. Möglich ist auch der umgekehrte Weg, nämlich an einer bestimmten Stelle vorhandene Variablen einzulesen und damit das Modell anzupassen.

Eine sehr effiziente und leistungsstarke Methode ist die Verwendung von **Stand-Alone-Skripten**. Für häufige, gleichartige Untersuchungen an unterschiedlichen Maschinenmodellen bietet es sich an, Skripte zu programmieren, die ein bereits erstelltes Maschinenmodell einlesen, dieses gegebenenfalls modifizieren und dann die gewünschten Analysen durchführen. Damit lassen sich auch solche Modellparameter ganz gezielt einstellen, die über das GUI nur beschränkt oder für Komponenten als Ganzes zugänglich sind. Zudem kann direkt an die Berechnung eine Auswertung angeschlossen werden, die der Anwender an seinen Bedürfnissen ausrichten kann, um zum Beispiel standardisierte Plots mit bestimmter Skalierung und Beschriftung zu erhalten.

4.2 Analyse

Eine Kerndisziplin - deren Bedeutung kontinuierlich wächst - in allen Ingenieurwissenschaften ist die Simulation. Sie ermöglicht die Vorhersage des Verhaltens eines modellierten Systems und hilft damit, das System besser zu verstehen. Dahinter steht die Motivation, das betrachtete System zu optimieren oder zumindest seine Schwachstellen zu kennen, um adäquat darauf reagieren zu können. Um die dafür erforderliche Systemkenntnis zu erlangen und zielführende Massnahmen formulieren zu können, muss das System analysiert werden.

Bei WZMn interessiert vor allem ihr mechanisch-physikalisches Verhalten, da sich dieses am Werkstück abzeichnet. Dieser Aspekt gewinnt bei der Nutzung rekonfigurierbarer WZMn noch an Bedeutung, da der Anwender seine Maschinen entsprechend dem aktuellen Bedarf selbst zusammenstellen kann. Dafür braucht er allerdings eine Möglichkeit, um effizient und sicher die geeigneten Maschinenkonfigurationen zu identifizieren. Für einen Maschinen- oder Modulhersteller steht die Optimierung seines Produkts im Vordergrund, wobei er viele Freiheitsgrade beeinflussen und sogar grundverschiedene Konzepte ausprobieren kann. Im Gegensatz dazu verfügt der Anwender nur über einen relativ kleinen Spielraum, da er aus einer gegebenen Menge an Modulen die beste Kombination zur Erledigung einer gestellten Aufgabe sucht.

Damit ein Anwender die Maschinenkonfigurationen auch detailliert analysieren kann, müssen ihm geeignete Werkzeuge zur Verfügung stehen, die mit geringem zeitlichen und personellen Aufwand zu bedienen sind. Die Analysemöglichkeiten des ABK sind auf typische Fragestellungen im Werkzeugmaschinenbau zugeschnitten, wodurch sich dieser als

sehr effizientes Analysewerkzeug auszeichnet. Exemplarisch für ein integriertes Rekonfigurierungstool werden in diesem Abschnitt die vom ABK gebotenen Funktionalitäten zur Auswertung besprochen.

4.2.1 Analysemöglichkeiten

Die Wahl der durchzuführenden Analysen erfolgt im ABK über das Menü *Output Definition* (Bild 4.15). Eine Stärke des ABK ist die effiziente Untersuchung eines Maschinenmodells für unterschiedliche TCP-Positionen. In einem ersten Schritt werden daher die TCP-Lagen (Messfälle) im Raum festgelegt, an denen die Maschine analysiert werden soll. Der Standard-Messfall ist die im Modell definierte Grundstellung. Der TCP kann aber selbstverständlich innerhalb des Arbeitsraums beliebig versetzt werden. Weiterhin stehen als Messfälle achsparallele Linien und Diagonalen im Arbeitsraum, achsnormale Flächen sowie räumlich verteilte Punkte, z.B. die Eckpunkte des Arbeitsraums, zur Auswahl. Die vordefinierten Messfälle werden über ein Popup-Menü selektiert.

Begründet durch Einschränkungen der Darstellbarkeit, können je nach ausgewähltem Messfall unterschiedliche Analysen durchgeführt werden: Für alle Messfälle können die statischen Verlagerungen durch Schwerkraft, Prozesskräfte oder -momente sowie durch Trägheitskräfte untersucht werden. Ebenfalls für alle Messfälle lassen sich die Eigenfrequenzen und die Hysteresewerte berechnen und ausgeben. Für einen einzelnen Punkt kann zudem die – unter Einwirkung derselben Lasten wie bei den statischen Verlagerungen – verformte Maschinenstruktur graphisch dargestellt werden. Weitere Ausgaben für einen Messpunkt sind animierte Mode Shapes zu den Eigenfrequenzen sowie die dynamischen Übertragungsfunktionen bei Prozesskräften, Trägheitskräften oder bei Punktanregung an einem beliebigen Körper.

Das Verhalten im Zeitbereich wird anhand der TCP-Trajektorie beim Abfahren einer durch Sollgrößen spezifizierten Bahn untersucht. Die Abweichungen von der Sollbahn geben Aufschluss über die Qualität der mechanischen Struktur im Zusammenspiel mit den verwendeten Reglereinstellungen.

Statisches und quasistatisches Verhalten

Die Beurteilung des statischen und quasistatischen Verhaltens erfolgt anhand der statischen Verlagerungswerte, der Hysteresewerte und der Verformungsplots. Die Verlagerungen können für unterschiedliche Lastfälle berechnet werden. Die Verformung unter Eigengewicht kann als eigener Lastfall betrachtet werden. Dazu wird die Gewichtskraft für alle Körper im Modell als Last in Z-Richtung aufgetragen. Als Prozesslast wird pro kartesischer Achsrichtung jeweils eine achsparallele Kraft von 1 kN bzw. ein Moment von 1 Nm am TCP aufgebracht. Die Kraft wirkt dabei gegengleich auf den Werkzeugbezugskörper,

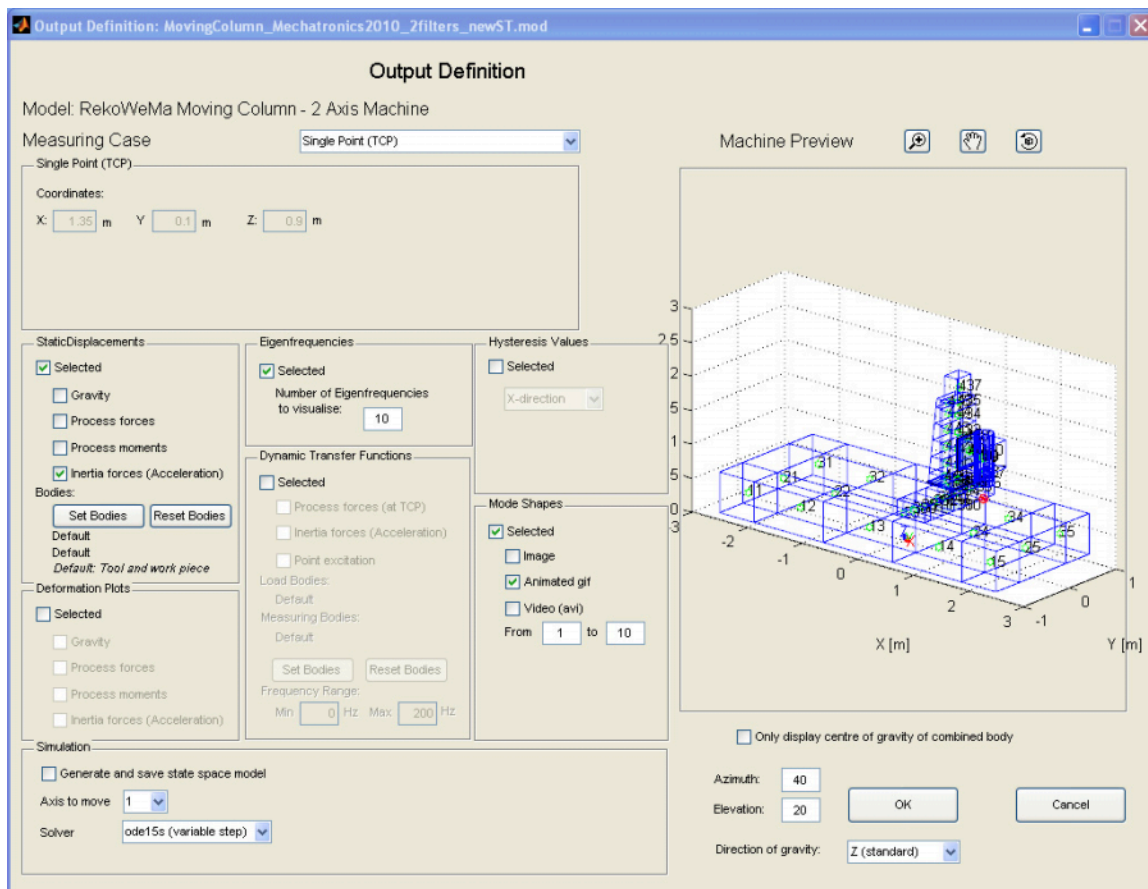


Bild 4.15: Im Output Definition Fenster des ABK-GUI kann der Anwender die gewünschten Analysen für verschiedene Messfälle auswählen.

im Allgemeinen die Spindel, und auf den Werkstückbezugskörper, an dem das Werkstück befestigt ist. Mit dem Lastfall „Trägheitskräfte“ lassen sich die Verlagerungen während eines eingeschwungenen Beschleunigungsvorgangs in den drei kartesischen Achsrichtungen abschätzen. Dazu greift am Schwerpunkt eines jeden beweglichen Körpers, gemäss Maschinenkinematik, die Trägheitskraft an, die einer Beschleunigung mit 10 m/s^2 entspricht. Die Verlagerungen \mathbf{V} der Körper berechnen sich gemäss (4.26) als Produkt der Nachgiebigkeitsmatrix \mathbf{N} (Inverse der Steifigkeitsmatrix \mathbf{K}) und dem für den jeweiligen Lastfall zutreffenden Lastvektor \mathbf{F} . Die interessierenden resultierenden Relativverlagerungen am TCP werden anhand der Konfiguration und der Verlagerungen \mathbf{V} berechnet.

$$\mathbf{V} = \mathbf{N} \cdot \mathbf{F} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{F} \quad (4.26)$$

Als Hysterese bezeichnet man allgemein ein Verhalten, das neben der eigentlichen Eingangsgrösse auch von der Vorgeschichte des Systems abhängt. Bei WZMn äussert sich

dies z.B. im Umkehrspiel eines Kugelgewindetriebes, das bei einer Änderung der Bewegungsrichtung auftritt. In den statischen Untersuchungen wird unter diesem Punkt der Einfluss der Reibung auf die Positioniergenauigkeit je nach Verfahrrichtung betrachtet. Bei einem Richtungswechsel ändert sich auch die Richtung der am Schlitten angreifenden Reibungskraft, die zu einer Schrägstellung führt. Wie stark sich dieser Effekt auswirkt, hängt davon ab, ob ein direktes Messsystem vorhanden ist oder nicht und wo dieses gegebenenfalls montiert ist. Die zur Berechnung benötigten Daten werden direkt aus dem Maschinenmodell herausgelesen [145].

Die berechneten statischen Verlagerungen lassen sich für einen einzelnen Messpunkt auch graphisch als Deformationsplot ausgegeben. Die Maschinenstruktur wird in der verformten Lage und zum Vergleich halbtransparent in der Ausgangslage gezeichnet. Darstellbar sind die selben zehn Lastfälle wie bei der reinen Berechnung, wobei die Auslenkungen so normiert werden, dass die grösste Auslenkung einen von der Grösse des Gesamtsystems abhängigen, separat zu skalierenden Wert annimmt. Bild 4.16 zeigt die Verformung aufgrund von Trägheitskräften bei positiver Beschleunigung der Z-Achse mit 10 m/s^2 .

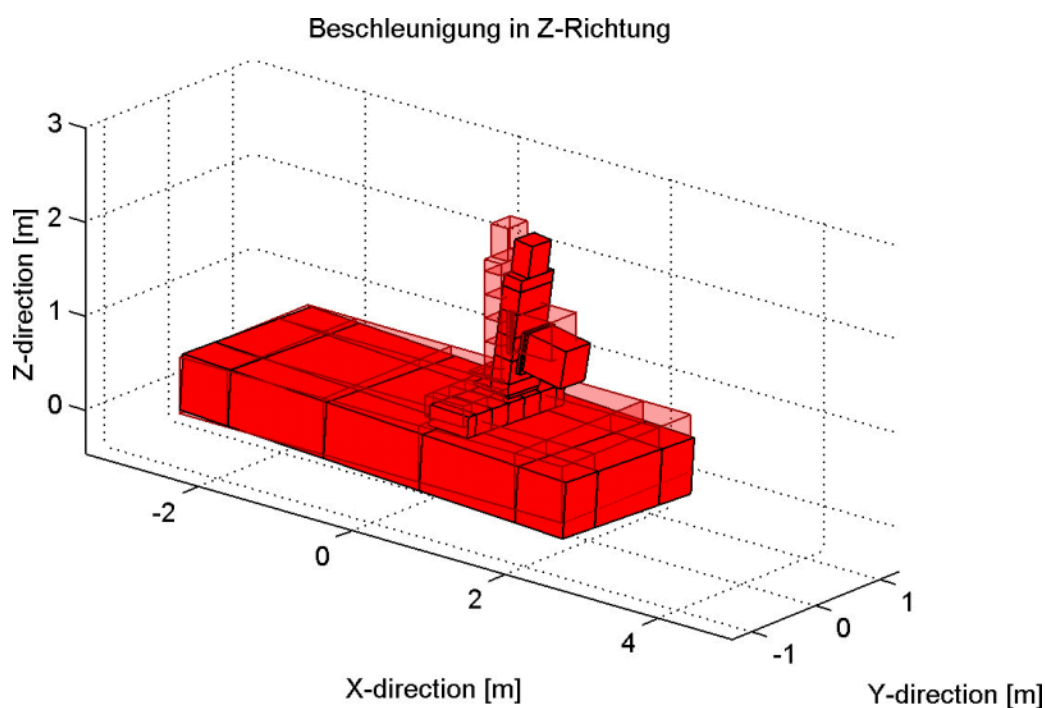


Bild 4.16: Graphische Darstellung der Verformung durch Trägheitskräfte bei Beschleunigung der Z-Achse nach oben. Die Abstützkraft des Motors drückt die Maschinenstruktur nach unten, dadurch verkippt die weich aufgestellte Grundplatte.

Verhalten im Frequenzbereich

Die Eigenfrequenzen mit den zugehörigen Mode Shapes sowie die dynamischen Transferfunktionen charakterisieren das Verhalten eines schwingungsfähigen mechanischen Systems im Frequenzbereich. Die Eigenfrequenzen werden aus der Massenmatrix \mathbf{M} und der Steifigkeitsmatrix \mathbf{K} bestimmt. Indem die Schwerpunktslagen der Körper und die Lagen der Koppelstellen entsprechend der TCP-Position angepasst werden, können die Eigenfrequenzen im ganzen Arbeitsraum auf ihre Ortsabhängigkeit hin untersucht werden. Bild 4.17 links zeigt die Werte der 9. Eigenfrequenz, dargestellt in der Y-Z-Arbeitsebene. Je tiefer der TCP liegt, desto höher ist die Eigenfrequenz. Die Plausibilität wird mit dem zugehörigen Mode Shape überprüft, der rechts daneben abgebildet ist. Aus ihm ist ersichtlich, dass es sich bei dieser Eigenfrequenz um eine Torsionsschwingung der Grundplatte handelt, zu der sich der vertikale Ständer in Gegenphase bewegt. Die Mode Shapes ergeben sich aus den Eigenvektoren und können, wie im gezeigten Bild, statisch als Extremlage der Auslenkung zusammen mit der Ausgangslage dargestellt werden oder auch als Animation den ganzen Schwingungsverlauf wiedergeben.

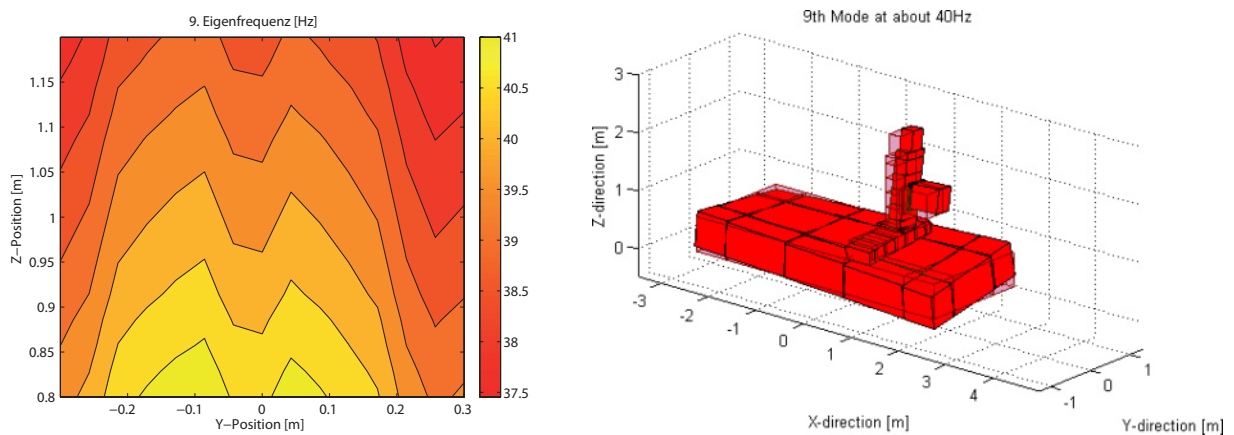


Bild 4.17: Graphische Darstellung der Werte der 9. Eigenfrequenz über die Y-Z-Arbeitsebene (links). Der Mode Shape (rechts) illustriert die zugehörige Eigenschwingung der Fahrständerkonfiguration.

Die bisher besprochenen Auswertungen ermitteln rechnerisch alle Eigenfrequenzen des schwingungsfähigen Systems. Eine aussagekräftige Beurteilung des Frequenzverhaltens erfordert jedoch die Kenntnis der kritischen Eigenfrequenzen, also der niedrigsten Eigenfrequenzen, bei denen eine merkliche Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück auftritt. Die dynamischen Transferfunktionen liefern genau diese Information. Sie können für Prozesskräfte, Trägheitskräfte bei Beschleunigung sowie eine frei positionierbare Punkterregung erstellt werden. Als Prozesskraft wird nacheinander in jeder Achsrichtung eine Kraft von 1 N am TCP aufgebracht, und zwar positiv am Werkzeugbezugskörper und

negativ am Werkstückbezugskörper. Die Trägheitskräfte greifen wie schon bei den statischen Verlagerungen an den jeweiligen Schwerpunkten der beweglichen Körper an, ihre Richtung ergibt sich aus der Kinematik. Die Punkterregung, ebenfalls mit 1 N, kann an jedem Körper des Modells berechnet werden, wobei hier gewählt werden kann, ob eine Gegenkraft auf einen zweiten Körper wirkt oder nicht. Wird als zweiter Körper das Inertialsystem gewählt, entspricht die Untersuchung einer experimentellen Modalanalyse. Die Prozesskraftanalyse ist ein Spezialfall der allgemeinen Punkterregung mit Werkzeug- und Werkstückbezugskörper als Lastkörpern und dem TCP als Lastangriffspunkt.

Verhalten im Zeitbereich

Für die Analyse des Verhaltens im Zeitbereich kommt das in Abschnitt 4.1.2 beschriebene Simulationsmodell zum Einsatz. Eingangsgrößen sind die Positions- und Geschwindigkeitssollwerte am Antrieb, aus denen unter Berücksichtigung der modellierten Maschinenstruktur die TCP-Trajektorie errechnet wird. Als minimale Benutzereingaben sind für die Definition eines einachsigen Positioniervorgangs die Bahnparameter Weglänge s , Geschwindigkeit v , Beschleunigung a sowie die zu bewegende Achse erforderlich.

Eine typische Ausgabe der simulierten TCP-Bahn zeigt Bild 4.18. In diesem Beispiel wurde eine Positionierbewegung der Y-Achse über 100 mm mit den Sollwerten $v = 0.2$ m/s und $a = 4$ m/s² vorgegeben. Zur Darstellung des Crosstalks wird die Abweichung quer zur Positionierrichtung, hier also in Z-Richtung, über der Position aufgetragen. Beim Beschleunigen und Abbremsen sind die Auslenkungen des TCP deutlich sichtbar. Diese entstehen, wenn die Antriebskraft nicht kollinear zur Trägheitskraft im Schwerpunkt des zu bewegenden Körpers liegt. Besonders klar ist dieser Effekt beim Verzögern zu beobachten, wo der Knick im überlagerten Geschwindigkeitsprofil mit dem Beginn der Crosstalk-Schwingung korreliert.

4.2.2 Auswertung

Der letzte Schritt der Analyse ist die Auswertung der Berechnungen und Simulationen. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse erlauben die fundierte Bewertung von Maschinenkonfigurationen und unterstützen mit sachlichen Aussagen die Entscheidungsfindung bei der Variantenwahl. Besonders bedeutend ist dieser Aspekt bei der Nutzung rekonfigurierbarer WZMn, da bei jeder Rekonfigurierung alle dafür ermittelten Konfigurationsvarianten auf ihre Eignung zur Erledigung der Bearbeitungsaufgabe hin untersucht werden müssen.

Die Analysedaten werden graphisch aufbereitet, wodurch auch Personen, die nicht über vertieftes Fachwissen in der Werkzeugmaschinenentwicklung verfügen, in die Lage versetzt werden, selbständig Auswertungen durchzuführen. Für das Verständnis des Verhaltens von räumlichen Strukturen ist eine adäquate Darstellung unerlässlich. Passend zum jeweiligen

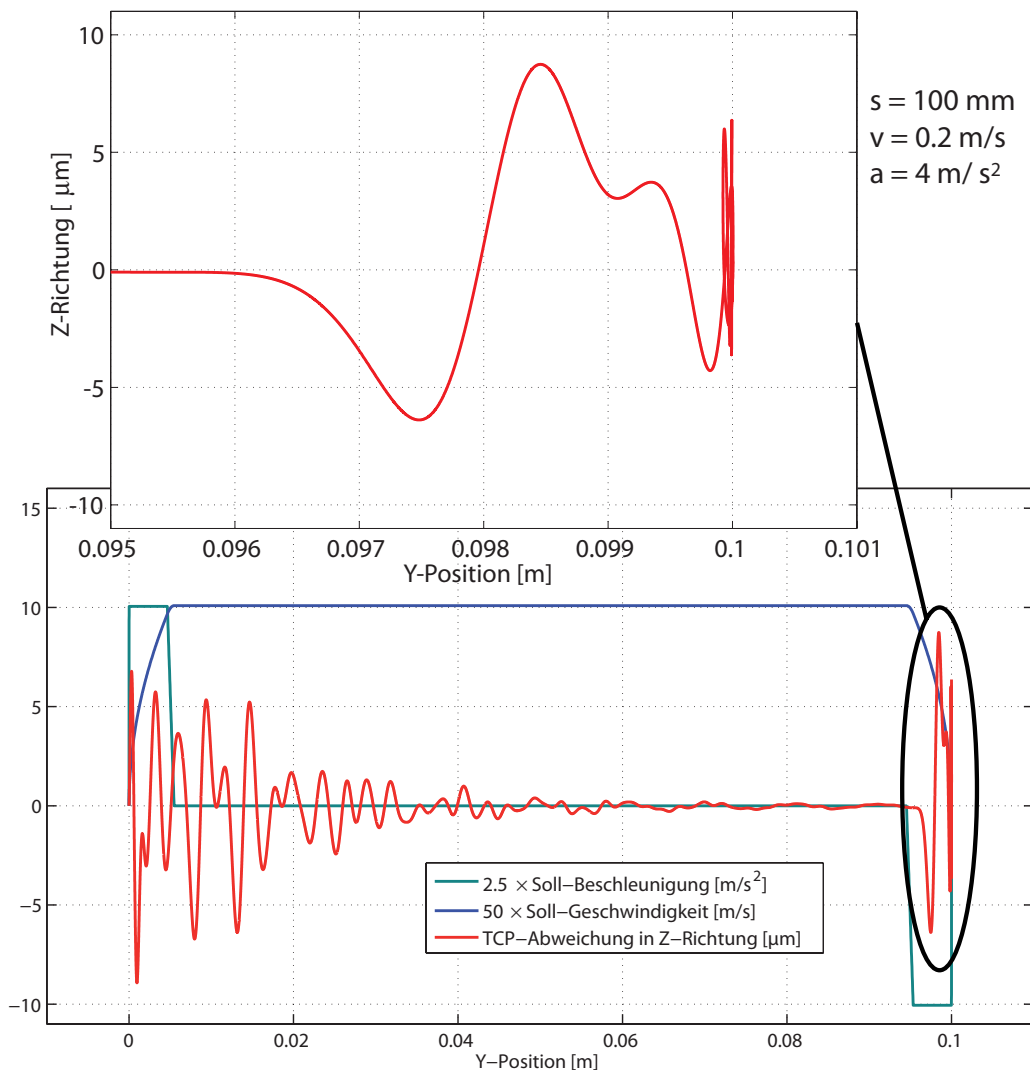


Bild 4.18: Querbewegungen beim Beschleunigen und Abbremsen während einer Positionierbewegung über 100 mm. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt deutlich den Crosstalk, der durch die Trägheit der zu bewegende Massen verursacht wird.

Analysefall stellt der ABK die Ergebnisse in anschaulichen 2D- oder 3D-Graphiken dar. Anhand einer exemplarischen Analyse eines Maschinenmodells aus Modulen werden ausgewählte Analyseoptionen besprochen [67, 68, 69, 70]: Die 2-Achs-Maschinenkonfiguration besteht werkstückseitig aus einer langen, horizontal auf der Grundplatte montierten Linearachse, auf deren Schlitten ein Werkstück mit einer Masse von 140 kg befestigt ist. Werkzeugseitig steht eine kurze Linearachse vertikal auf der Grundplatte. An ihrem Schlitten ist ein Werkzeugspindelmodul in Horizontallage montiert.

Statisches und quasistatisches Verhalten

Als Analysefall für das statische Verhalten wird die Verlagerung in X-Richtung unter Eigengewicht aufgrund der Schwerkraft betrachtet. Im ABK kann die dadurch verursachte Verlagerung des TCP für eine komplette Ebene im Arbeitsraum untersucht werden. Bild 4.19 zeigt links die zuvor beschriebene Maschinenkonfiguration. Die Arbeitsebene, für die die Analyse durchgeführt wird, ist in rot eingezeichnet. Die Auswertung des Verlagerungsplots auf der rechten Seite zeigt zum Einen eine deutliche Z-Positionsabhängigkeit. Je höher die Spindel auf der Vertikalachse steht, desto grösser ist die X-Verlagerung. Dies lässt sich mit der Schrägstellung der Vertikalachse durch das Gewicht der Spindel erklären. Mit zunehmender Z-Position wird die Achsabweichung grösser. Zum Anderen liegt auch eine horizontale Positionsabhängigkeit vor: Ausgehend von der Mittenlage bei $x = 0.1$ m vergrössert sich die TCP-Abweichung in X-Richtung. Dieser Effekt entsteht dadurch, dass im Modell nur der Körper mit der Modulschnittstelle starr mit der Grundplatte verbunden ist und die restlichen Balkenkörper elastisch miteinander gekoppelt sind. Fährt der Schlitten mit dem Werkstück entlang der Achse, führt dies zu einer Durchbiegung des Balkens und somit zu einer horizontalen Verkippung in Bewegungsrichtung. Für einen Punkt am positiven Rand in der Arbeitsraumdarstellung muss der Schlitten am negativen Ende stehen und kippt deshalb in negativer B-Richtung (nach links im Bild). Zwischen Werkstück und Werkzeug resultiert somit eine positive Verlagerung an diesem Punkt im Arbeitsraum. Ferner sind drei Zonen erkennbar, die durch die Segmentierung des Balkens entstehen. Der Schlitten ist über die Steifigkeiten der Führungswagen mit dem Balken gekoppelt. Beim Überfahren einer Segmentgrenze ändert sich die Zuordnung der Schlittensteifigkeit zum darunterliegenden Balkenkörper. Mit jeder überfahrenen Segmentgrenze entsteht eine neue Zone. Diese Zonenbildung hängt vom Abstand der Führungswagen sowie der Länge der Segmente ab und ist somit der Modellierung zuzuschreiben. Jedoch wird ein reales Modul mit lokalen Versteifungen und Stegen ein vergleichbares Verhalten aufweisen [69].

Verhalten im Frequenzbereich

Zur Beurteilung des Frequenzverhaltens sind die dynamischen Übertragungsfunktionen ein effizientes Mittel. Mittels Berechnung aller Eigenfrequenzen des Maschinenmodells soll herausgefunden werden, wo die kritische Eigenfrequenz liegt. Die kritische Eigenfrequenz ist die erste Eigenfrequenz, bei der eine Anregung zu einer deutlich überhöhten Amplitude am Ausgang führt. Bild 4.20 zeigt die Übertragungsfunktionen in den drei kartesischen Achsrichtungen für Anregung von 0 bis 250 Hz durch Prozesskräfte (s. Abschnitt 4.2.1). Obwohl die 1. Eigenfrequenz bei 64 Hz liegt, ist erst die 6. Eigenfrequenz bei 113 Hz als kritisch zu bezeichnen. Hierbei handelt es sich um eine Vertikalbewegung der Spindel, die durch eine Kraft in Z-Richtung angeregt wird (G_{zz}). Die ersten kritischen Frequenzen in

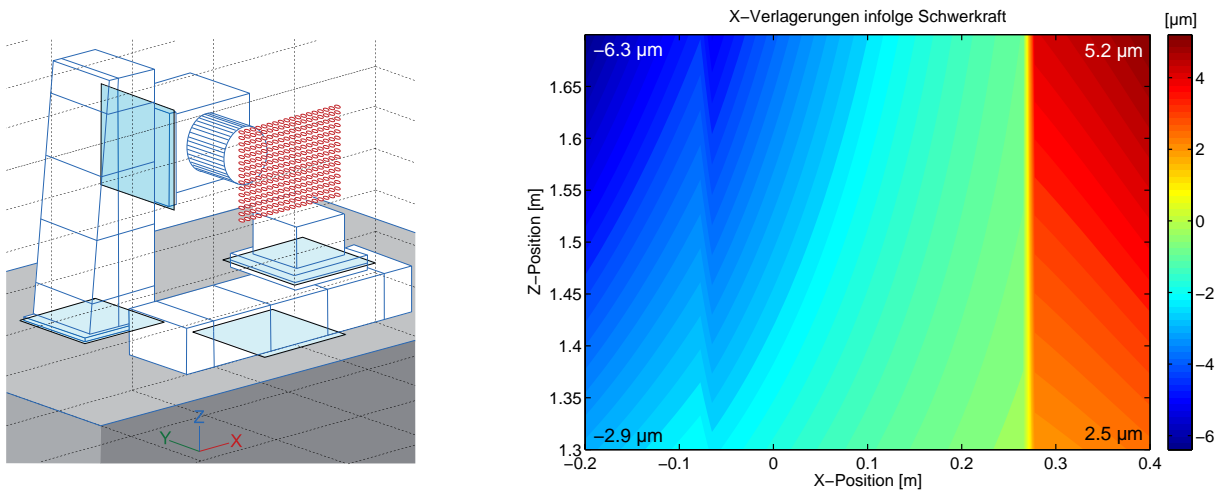


Bild 4.19: 2-Achs-Maschinenkonfiguration mit rot eingezeichneter Arbeitsebene für die Analyse (links). Je nach Position im Arbeitsraum verlagert sich der TCP durch die Schwerkraft unterschiedlich stark in X-Richtung (rechts).

X- und Y- Richtung liegen bei 133 Hz respektive bei 203 Hz. Aus den Mode Shapes geht hervor, dass diese beiden Schwingungen grösstenteils aus werkstückseitigen Verlagerungen bestehen. Diese Frequenzen variieren demnach mit der Werkstückmasse [69].

Verhalten im Zeitbereich

Das Verhalten im Zeitbereich wird anhand der simulierten Bahn des TCP beurteilt. An einer idealen Maschine bewegte sich der TCP einzig in der durch die Sollwerte vorgegebenen Richtung, Abweichungen quer dazu träten nicht auf. An einer realen Maschine sind solche Abweichungen unvermeidbar, da niemals alle resultierenden Kräfte axial in den Körperschwerpunkten angreifen und diese deshalb Verkippungen hervorrufen. Die durch Verkippung der Starrkörper entstehenden Abweichungen quer zur Bewegungsrichtung werden als Crosstalk bezeichnet. Dieser ist zu minimieren, da die Werkstückoberfläche dadurch sichtbar beschädigt wird, was je nach Qualitätsanforderung zu Ausschuss führen kann.

Da das Simulationsmodell neben der mechanischen Struktur auch ein Modell des Antriebsstrangs enthält, lässt sich an der simulierten TCP-Trajektorie auch der Einfluss der Reglereinstellungen beobachten. Die Simulation einer Positionierbewegung über 150 mm an einer Fahrständerkonfiguration liefert für zwei unterschiedliche Reglereinstellungen die in Bild 4.21 gezeigten TCP-Bahnen. Die Soll-Verfahrgeschwindigkeit und die Soll-Beschleunigung sind bei beiden Simulationsläufen identisch, ebenso die Stromreglereinstellungen. Variiert wurden die Einstellungen des Geschwindigkeitsreglers (K_p , T_n) und des Lagereglers (K_v). Das in der Realität erwartete und messbare Verhalten, dass der

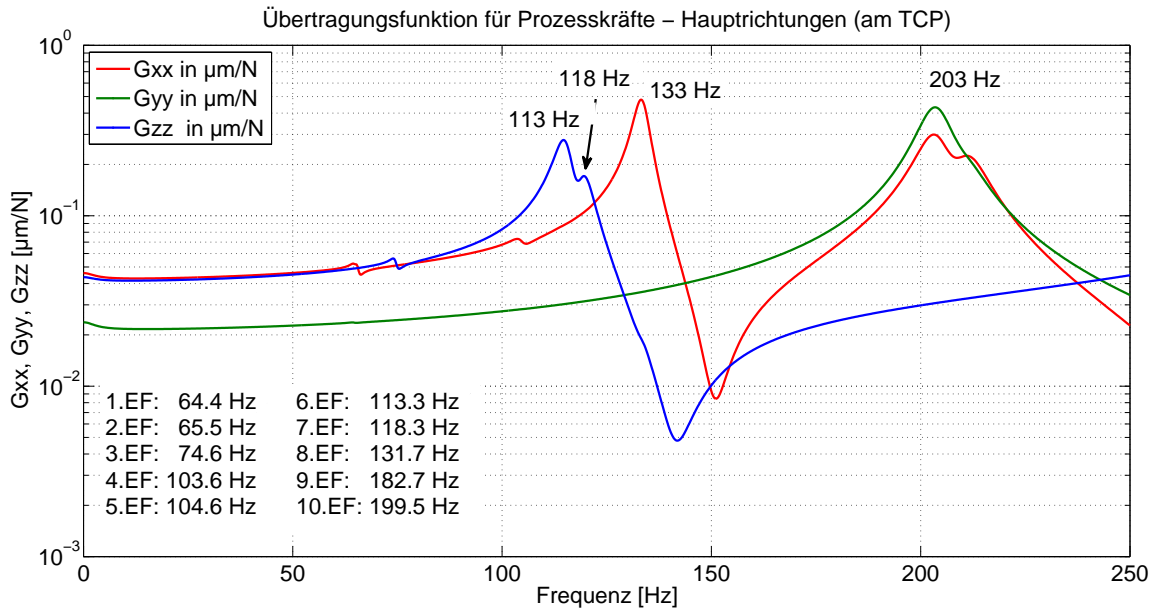


Bild 4.20: Übertragungsfunktionen in den drei Hauptrichtungen für Anregung durch Prozesskräfte am TCP. Die erste kritische Eigenfrequenz tritt bei 113 Hz auf und äussert sich in einer Z-Bewegung bei Anregung in derselben Richtung.

Crosstalk mit grösserem K_v -Faktor ebenfalls ansteigt, zeigt sich auch in der Simulation. Eine um etwa 20% kleinere Lageregelverstärkung für die X-Achse reduziert den Crosstalk in Z-Richtung in der selben Grössenordnung [70].

In Form von Zeit, Lage und Geschwindigkeitssollwerten kann grundsätzlich jede allgemeine Bahn für die Simulation mit dem ABK vorgegeben werden. Für das Verständnis des Strukturverhaltens und die möglichst eindeutige Zuordnung von Effekten haben sich jedoch einfache Bahnen (Gerade, Diagonale etc.) bewährt. Bei der Simulation ist zu beachten, dass die Systemmatrizen für eine bestimmte TCP-Lage aufgestellt werden. Sollen grosse Fahrwege simuliert werden, ist deshalb ggf. eine Anpassung der Systemmatrizen erforderlich. So wie bestimmte Auswertungen automatisiert an verschiedenen Punkten im Arbeitsraum durchgeführt werden können, müssten dann die Systemmatrizen während der Simulation angepasst werden. Wenn sich die Zuordnung der Koppelstellen nicht ändert, ist für die Steifigkeits- und Dämpfungsmatrizen eine Interpolation mit quadratischem Ansatz möglich. Wechselt die Zuordnung der Koppelstellen während der Fahrbewegung, wie es beispielsweise bei Achsen mit Balkenelementen der Fall sein könnte, müssen die entsprechenden Matrizen neu aufgestellt werden.

In diesem Kapitel wurde gezeigt, welche Methoden und Werkzeuge zur Modellierung und Analyse von rekonfigurierbaren WZMn genutzt werden können. Als integriertes Software-tool, das eine Vielzahl an Funktionalitäten bereitstellt, wurde der Achsbaukasten vorge-

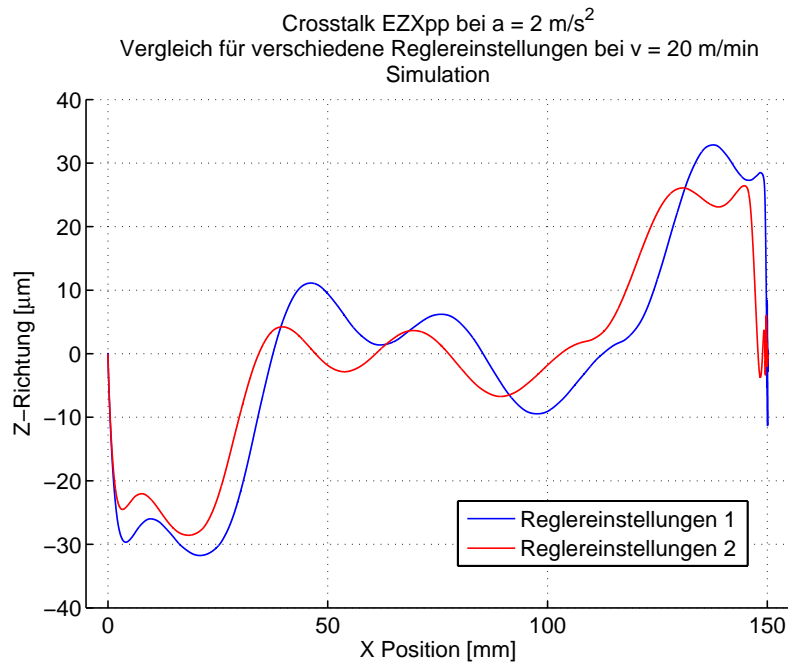


Bild 4.21: Vergleich des Crosstalks an einer 2-Achs-Fahrständerkonfiguration für unterschiedliche Reglereinstellungen (RE). Bei der Beschleunigung in X-Richtung auftretende Trägheitskräfte führen zu Abweichungen in Z-Richtung. Simulation mit Sollgeschwindigkeit $v = 20 \text{ m/min}$, Sollbeschleunigung $a = 2 \text{ m/s}^2$ und Ruckbegrenzung $r = 1000 \text{ m/s}^3$.

RE 1: $K_p = 1.790 \text{ Nms/rad}$, $T_n = 21.96 \text{ ms}$, $K_v = 2.0231 \text{ (m/min)/mm}$

RE 2: $K_p = 1.5 \text{ Nms/rad}$, $T_n = 15 \text{ ms}$, $K_v = 0.9 \text{ (m/min)/mm}$

stellt. Damit lassen sich die bei der Rekonfigurierung erforderlichen Untersuchungen und Vorbereitungen an WZMn effizient durchführen. Besonders aufschlussreich sind Auswertungen über den gesamten Arbeitsraum einer Maschine sowie Simulationen von einfachen Verfahrbewegungen. Die Analysen unterstützen den Anwender bei der Variantenwahl mit fundierten Informationen zum physikalischen Verhalten der untersuchten Maschinenmodelle. Nach getroffener Entscheidung (Auswahl) lässt sich die zugehörige Steuerungskonfiguration direkt aus dem ABK ableiten.

5 Entwicklung einer rekonfigurierbaren Werkzeugmaschine

Eine fundierte Beschäftigung mit dem Thema „rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen als Produktionsmittel“ erfordert praktische Versuche zur Überprüfung der theoretischen Überlegungen aus Kapitel 4. Deshalb wurde eine Prototypmaschine entwickelt und gefertigt, an der die besprochenen Methoden verifiziert werden können. Für die Entwicklung der Maschine wurde grosser Aufwand betrieben, da mit ihr insbesondere der Nachweis erbracht werden soll, dass das Konzept der Rekonfigurierbarkeit auf WZMn anwendbar ist.

Ausgehend von den Anforderungen an eine rekonfigurierbare WZM, welche eingangs geklärt und in einem Lastenheft festgehalten werden, wird ein Maschinenkonzept abgeleitet. Im Hauptteil dieses Kapitels werden die realisierten Maschinenmodule detailliert beschrieben, wobei auch auf die Auswahl der grundlegenden Systemkomponenten eingegangen wird. Anschliessend wird der Abgleich der Eigenschaften der Modulmodelle mit denen der realen Module anhand von Messungen und Vergleichen mit den Simulationen erläutert. Zum Schluss werden die Erfahrungen in Konstruktionsrichtlinien übertragen.

5.1 Anforderungen

Zu Beginn jeder Entwicklung sind die Anforderungen an das Ergebnis zu formulieren. Für WZMn ergeben sich diese üblicherweise aus der Bearbeitungsaufgabe bzw. dem Spektrum an möglichen Bearbeitungen, das der Hersteller mit der Maschine abdecken möchte. Rekonfigurierbare WZMn müssen zusätzliche Anforderungen erfüllen, die aus dem Umbau durch den Anwender resultieren.

Vor der Entwicklung der Prototypmaschine wurde eine Umfrage bei Maschinenanwendern durchgeführt, um deren Probleme und Erwartungen zu erheben. Die Aussagen der Anwender liefern Informationen über die Stärken und Schwächen der heute verwendeten Fertigungsmittel und zeigen, wo das Konzept der Rekonfigurierbarkeit vorteilhaft eingesetzt werden könnte. Aus den Ergebnissen der Anwenderumfrage lassen sich Betriebsanforderungen ableiten, die eine rekonfigurierbare WZM demnach erfüllen muss.

5.1.1 Anwenderumfrage

Kürzere Produktlebenszyklen, zunehmende Diversifikation der Produkte, grosse Nachfrageschwankungen und immer schneller voranschreitende technologische Entwicklungen werden in der Literatur als Rahmenbedingungen der Produktion genannt, aus denen die Forderung nach Rekonfigurierbarkeit der Fertigungsmittel abgeleitet wird [60, 147, 58]. Studien, die diese Aussagen mit Zahlen belegen, sind allerdings rar. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Umfrage bei Maschinenanwendern durchgeführt, um diese allgemeinen Aussagen zu überprüfen und aus den Ergebnissen die Anforderungen der Anwender an rekonfigurierbare WZMn zu bestimmen [65, 66].

Ablauf der Befragung

Die Fragebögen wurden im Dezember 2006 an 55 kleine und mittlere Unternehmen (KMU) in der Schweiz versendet. Mit den Antworten von drei Unternehmen, bei denen der Fragebogen vorab getestet wurde, lagen am Ende 24 ausgefüllte Fragebögen aus der Schweiz vor. Im April 2007 wurde der Fragebogen über ein Partnerinstitut in Deutschland an 400 dort ansässige Firmen versendet. Ab Juni 2007 wurden die insgesamt 73 beantworteten Fragebögen ausgewertet (Tabelle 5.1). Der Fragebogen ist in Anhang B aufgeführt.

Tabelle 5.1: In Deutschland und der Schweiz versandte und beantwortete Fragebögen.

	Ausgefüllt	Versandt	Antwortquote
Schweiz	24	58	41 %
Deutschland	49	400	12 %
Total	73	458	16 %

Die hohe Antwortquote in der Schweiz ist vor allem darauf zurückzuführen, dass der Fragebogen nur an Unternehmen versendet wurde, die auf eine vorgängige Anfrage per E-Mail die Beantwortung der Fragen nicht ausdrücklich abgelehnt hatten.

Auswertung der Umfrage

Daten zu den Betrieben Die Mehrheit (62%) der befragten Unternehmen sind kleine Unternehmen mit weniger als 50 Mitarbeitern und unter 10 Millionen Euro Umsatz pro Jahr. 60% der befragten Betriebe erwirtschaften einen jährlichen Umsatz von bis zu 5 Millionen Euro, 76% bis zu 10 Millionen Euro. Der Grossteil (78%) hat einen Produktionsstandort und arbeitet an 5 Tagen pro Woche (82%) sowie bei Bedarf auch an Samstagen und Sonntagen. Über 80% der Unternehmen behalten ihre Produktionsmaschinen mindestens 8 Jahre, über ein Drittel sogar 12 Jahre und mehr. Ein bedeutender

Teil der Kundschaft stammt aus den Branchen Anlagenbau, Automobilindustrie, Werkzeugmaschinenindustrie, Medizintechnik sowie Luft- und Raumfahrtindustrie.

Auftragsorganisation Einzel- und Kleinserienfertigung (<100 Stück) betreiben 7 von 10 Unternehmen, Grossserien und Massenfertigung (> 1'000 Stück) dagegen nur 2 von 10. Bei letzteren stellt die Automobilindustrie einen überdurchschnittlich grossen Anteil der Kundschaft. Bild 5.1 zeigt, dass die Zeit, die den Unternehmen durchschnittlich bis zur ersten Lieferung bleibt, positiv mit der Unternehmensgrösse korreliert. Kleinunternehmen müssen meist innerhalb von 4 Wochen liefern während grössere Unternehmen mehrheitlich mindestens 3 Monate Zeit haben. Produktionsbereit müssen die Unternehmen schneller sein: 81% aller Unternehmen sind das auch innerhalb von 4 Wochen, die Hälfte der Kleinunternehmen benötigt sogar nur 2 Wochen. Die Gründe für diese Differenz sind vor allem in der Organisation und den angefragten Produkten sowie Stückzahlen zu suchen.

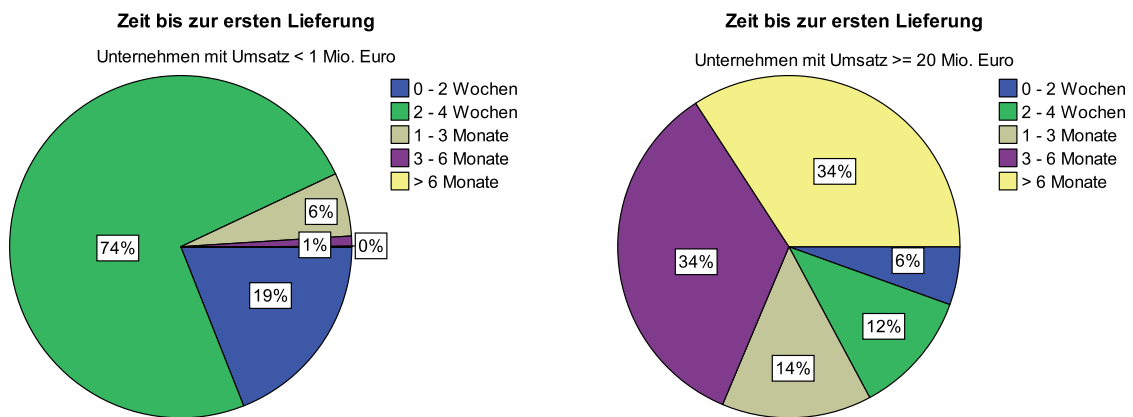


Bild 5.1: Unternehmen mit weniger als 1 Million Euro Umsatz bleibt selten mehr als 1 Monat bis zur ersten Lieferung während Unternehmen mit mehr als 20 Millionen Euro meistens erst nach mehr als 3 Monaten liefern müssen.

Die meiste Zeit vor Produktionsbeginn wird für die Materialbeschaffung benötigt. Dies ist vor allem bei Kleinunternehmen mit Abstand der grösste Zeitfresser. Grosse Unternehmen brauchen die Zeit primär zum Beschaffen von Werkzeugen, Maschinen und Vorrichtungen. Während also kleine Unternehmen mit ihren Universalmaschinen die eingehenden Aufträge bearbeiten können, müssen mittlere und grössere Unternehmen oft erst spezielle Betriebsmittel für die Auftragsbearbeitung bereitstellen bzw. anschaffen.

Die Stückzahlentwicklung in den letzten Jahren stellt sich in den befragten Betrieben einheitlich dar. Fast die Hälfte der befragten Unternehmen hat über die letzten 5 Jahre abnehmende Stückzahlen beobachtet, ein knappes Drittel hingegen zunehmende. Ein klares Bild ergibt jedoch die Entwicklung der Laufzeiten über die vergangenen 5 Jahre. Über zwei Drittel der befragten Unternehmen geben an, die Laufzeiten seien in den vergangenen

Jahren kürzer geworden. Nur weniger als 15% erkennen längere Laufzeiten (Bild 5.2). Am stärksten manifestiert sich die Tendenz zu kürzeren Laufzeiten in Betrieben mit Einzel- und Kleinserienfertigung. Abnehmende Stückzahlen und Laufzeiten rühren teilweise daher, dass heutzutage oft Aufträge über kleine Mengen und kurze Laufzeit erteilt werden, die dann bei Bedarf mehrmals erneuert werden.

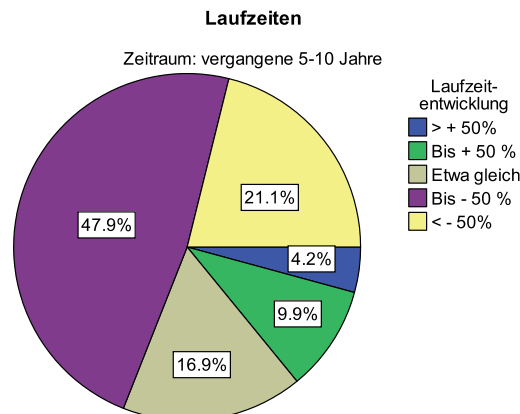


Bild 5.2: Eine deutliche Mehrheit der Befragten beobachtet kürzere Laufzeiten.

Ein weiterer Schwerpunkt der Befragung liegt bei Problemen, die durch Abweichungen von den Auftrags-Plandaten entstehen. Interessant ist dabei die Bewertung unterschiedlicher Aspekte der Flexibilität bei WZMn aus Anwendersicht. Wird bei einem erteilten Auftrag nachträglich die geforderte Menge an Teilen erhöht, dann stellt die Maschinenleistung bzw. der Durchsatz noch vor dem Personal klar das Hauptproblem dar. Folglich ist für die Hälfte der befragten Unternehmen Flexibilität hinsichtlich der Produktionskapazität bei der Beurteilung einer Maschine ein sehr wichtiges Kriterium. An zweiter Stelle wird die Abdeckung eines breiten Werkstück-Spektrums und an dritter Stelle Flexibilität bezüglich der Bearbeitungstechnologie genannt. Modulare, rekonfigurierbare Maschinen müssen demnach auf diese drei Aspekte zielen, um besser an den Bedarf der Unternehmen anpassbar zu sein. Die explizite Nachfrage zeigt, dass solche Maschinen die Anpassung der Produktionskapazität, des Werkstück-Spektrums und der Bearbeitungstechnologie durch Umbau ermöglichen müssen.

Technologie Dringenden Weiterentwicklungsbedarf bei WZMn sehen die befragten Unternehmen beim gleichzeitigen Ausführen verschiedener Prozesse auf einer Maschine und bei den Kosten (Investitionskosten und laufende Kosten). Wie aus Bild 5.3 ersichtlich ist, rangieren erst dahinter technische Leistungsmerkmale wie die Schnelligkeit und Genauigkeit der Maschinen, gefolgt von dem Wunsch nach grösserer Wartungsfreundlichkeit.

Einige Aspekte betreffen ausdrücklich Unternehmen mit Serienfertigung, weshalb sie se-

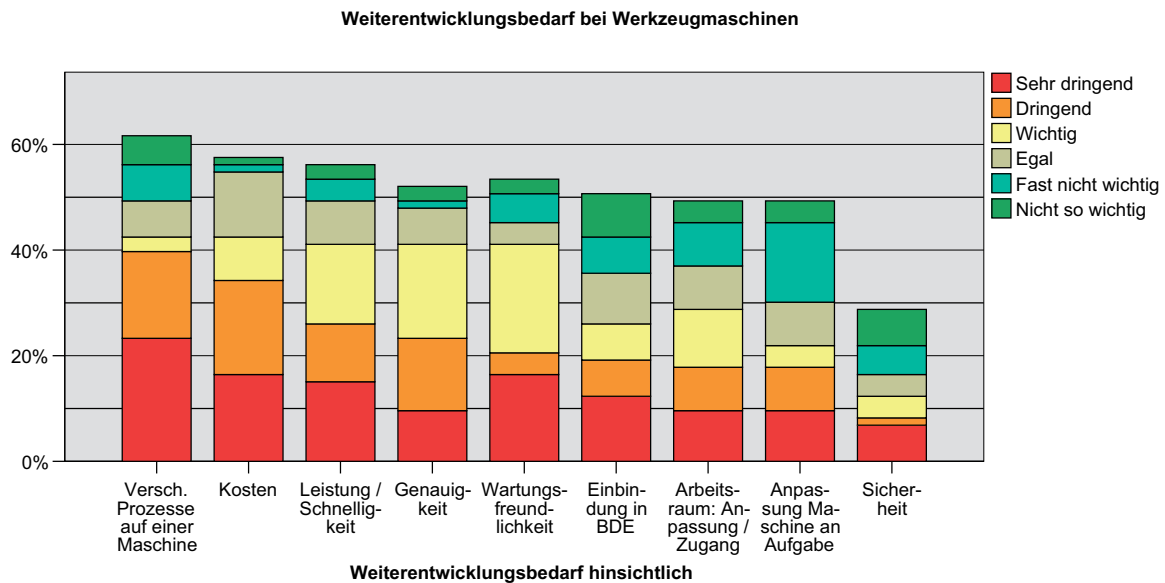


Bild 5.3: Verschiedene Prozesse auf einer Maschine durchführen zu können ist ein Thema, bei dem viele Unternehmen dringenden Weiterentwicklungsbedarf sehen. (Sortierung nach der Summe der als „dringend“ und „sehr dringend“ bezeichneten Aspekte.)

parat behandelt werden. Diese Unternehmen machen etwa 60% der Befragten aus. Stückzahlenschwankungen sind ein Trend, der mehrheitlich bestätigt wird. Deutlich ausgeprägt sind diese bei Unternehmen mit Kundschaft aus der Automobilindustrie sowie aus der Personentransport- und Logistikbranche. Dort werden Schwankungsbreiten von bis zu 70% der Nennstückzahl beobachtet. Die tendenziell hohen Auftragsstückzahlen in diesen Branchen erlauben eher kurzfristige Verschiebungen über die Lieferperiode, wodurch die beobachteten Schwankungen entstehen. Die Hälfte der Unternehmen berichtet auch von ungeplanten Verlängerungen der Produktionszeit, was bei den meisten allerdings auf weniger als ein Drittel der Aufträge zutrifft. Ungeplante Verkürzungen sind deutlich seltener.

Fazit Die Auswertung der Befragung zeigt deutlich, dass KMU und grosse Unternehmen in vielen Bereichen nicht mit denselben Problemen kämpfen. Insbesondere der kurze Zeithorizont der Aufträge verlangt den Betrieben hohe Flexibilität ab. Die KMU setzen deshalb vorwiegend Maschinen ein, die deutlich mehr Funktionalitäten vorhalten, als für die meisten Bearbeitungsaufgaben tatsächlich benötigt werden. Dieser Überschuss an Funktionalität muss mit hohen Investitions- und Betriebskosten erkaufte werden. Dennoch sind Änderungen am Prozess oder der Einsatz anderer Verfahren auf diesen Maschinen nur mit hohem Aufwand oder gar nicht realisierbar.

Die Auswertung der Umfrage zeigt, dass ein grosser Bedarf an technologisch hochwertigen

und wirtschaftlich konkurrenzfähigen Maschinenkonzepten besteht, die es teilweise erst zu entwickeln gilt. Es werden geeignete Maschinen benötigt, um auch *kleine und mittlere Seriengrößen* wirtschaftlich fertigen können. Um flexibel auf Teile- oder Auftragsänderungen reagieren zu können, sollten diese Maschinen zudem *verschiedene Prozesse* anbieten. Gleichzeitig dürfen aber die *Investitions-* wie auch die *Betriebskosten* nicht ansteigen, sie sollten im Gegenteil sogar sinken. Weiterhin wird gefordert, dass die Maschinen *wartungsfreundlich* konzipiert werden und ihre *Bedienung einfacher* wird.

Rekonfigurierbare WZMn, wie sie in Abschnitt 2.1.2 definiert werden, sind in der Lage, diese von den Anwendern formulierten Anforderungen besser zu erfüllen als herkömmliche Universalmaschinen das heute tun. Ihr Konzept ist darauf ausgelegt, mehr Flexibilität hinsichtlich Kapazität, Technologie und Teilespektrum zu bieten.

5.1.2 Betriebsanforderungen

Auf Basis der Ergebnisse der Anwenderumfrage und eines fiktiven Anwendungsfalls lassen sich für die Entwicklung der Prototypmaschine nun die Betriebsanforderungen definieren. Diese setzen sich zusammen aus Anforderungen, die sich aus dem Konzept ergeben, sowie aus Technologieanforderungen, die sich aus der Bearbeitungsausgabe ergeben.

Der fiktive Anwendungsfall orientiert sich an den Überlegungen in Kapitel 3, wonach die Stärken rekonfigurierbarer WZMn bei der Bearbeitung grossvolumiger Teile zum Vorschein kommen. Die Prototypmaschine wird deshalb für die Bearbeitung von Kurbelgehäusen für PKW-Motoren (ohne automatischen Werkzeugwechsel) ausgelegt. Die dahinterstehende Teilefamilie wird über zwei Referenzwerkstücke umschrieben, deren Eigenschaften in Tabelle 5.2 aufgelistet sind.

Tabelle 5.2: Eigenschaften der Referenzwerkstücke zur Abgrenzung der Teilefamilie, für die die Prototypmaschine entwickelt wird.

	Werkstück A	Werkstück B
Material:	Grauguss (GGL)	Aluminiumguss
Abmessungen (L × B × H):	600 mm × 400 mm × 600 mm	
Masse:	100 kg	35 kg

Um als WZM zu gelten, muss auch der Prototyp die charakteristischen Funktionsgruppen besitzen und die in den ISO-230-Normen zur Prüfung der geometrischen Genauigkeit von WZMn aufgeführten Anforderungen erfüllen. Das Leistungsniveau (Verfahrgeschwindigkeit, Beschleunigung) soll zwischen dem von Transferstrassen und dem aktueller WZMn angesiedelt sein. Es soll jedoch näher an letzterem liegen und somit die Vorzüge der Produktivität durch Sonderfunktionalität mit der durch hohe Dynamik verbinden.

Konzeptanforderungen

Gewisse Anforderungen ergeben sich allein dadurch, dass die Maschine rekonfigurierbar konzipiert wird. Dies ist der Fall für alle Anforderungen, die auf der *Modularität* und auf der *universellen Nutzung* beruhen.

Eine modular aufgebaute WZM impliziert, dass eine minimale Anzahl an Maschinenmodulen verfügbar ist, aus denen eine Maschine zusammengesetzt werden kann. Für den Prototyp wurden daher zwei unterschiedliche Linearachsmodule sowie ein Spindelmodul entwickelt. Eine essentielle Anforderung aus der Modularität ist eine geeignete *Schnittstelle*, um die Module möglichst variabel und doch präzise miteinander kombinieren zu können. Das Schnittstellenkonzept sollte für alle Modultypen identisch sein. Ziel ist ein herstellernerneutraler Standard.

Da die *Module* nach [150] weitestgehend *in sich abgeschlossen* sein sollen, müssen modulübergreifende Systeme möglichst vermieden werden oder so ausgeführt werden, dass das System über geeignete Schnittstellen an den Modulgrenzen verfügt. Für die Bewegungsmodule bedeutet das beispielsweise, dass auf eine Zentralschmierung verzichtet wird und stattdessen fettgeschmierte Lager an den Führungswagen und der Kugelgewindemutter eingesetzt werden.

Der zweite übergeordnete Aspekt, die universelle Nutzung, bedingt eine *adäquate Dimensionierung* der Antriebskomponenten. Da die Verwendung eines Moduls bei der Entwicklung nicht bekannt ist, muss es für eine angemessene Nutzungsbandbreite ausgelegt werden. Um ausreichend Masse bewegen und Prozesskräfte aufnehmen zu können, sollte die Dimensionierung eher grosszügig ausfallen. Damit wird beispielsweise die Möglichkeit gewahrt, ein Achsmodul in unterschiedlicher Achsreihenfolge zu verwenden. Für die Prototypmaschine wird deshalb gefordert, dass jedes Achsmodul als unterste Achse eingesetzt werden kann. Ein Anhaltspunkt bei der Dimensionierung des Antriebs kann die erforderliche Leistungselektronik sein. Diese elektronischen Komponenten sind meist in deutlich weniger Abstufungen erhältlich als die Motoren, können dafür aber mit einer Vielzahl an Motoren verwendet werden.

Um ein Modul universell nutzen zu können, sollten *verschiedene Einbaulagen* möglich sein. Die Auswirkungen variieren je nach Modul, je nachdem ob respektive welche Elemente bewegt werden und wie die Lagerung und Abdichtung in diesem Fall auszuführen sind. Bei Bewegungsachsen muss unterschieden werden zwischen stehender und hängender Einbaulage, was sich in der Belastung der Führungskomponenten niederschlägt, sowie zwischen horizontalem und vertikalem Einbau, was sich auf die Gestaltung des Antriebs auswirkt. In vertikaler Einbaulage wirkt die Schwerkraft auf den Antrieb, weshalb dort entweder stärkere Motoren oder ein Gewichtsausgleichssystem verwendet werden müssen. Aus Sicherheitsgründen ist bei vertikal nutzbaren Achsen zudem ein Bremssystem, ggf. gekoppelt mit einer ausfallsicheren Feststelleinheit vorzusehen. Von den Prototypmodulen

soll eines horizontal und vertikal einsetzbar sein, die andere nur horizontal. Ein Gewichtsausgleich sowie ein Bremssystem für den Vertikaleinbau sind ebenfalls vorzusehen.

Der Umbau bei der Rekonfigurierung erfordert, dass bereits bei der Modulentwicklung die *Transportier- und Handhabbarkeit* bedacht wird. Die Rekonfigurierung muss mit Hilfsmitteln erfolgen können, die in einer typisch ausgestatteten Werkhalle zur Verfügung stehen. Im Fall der Prototypmaschine ist als Handhabungsgerät ein Hallenkran spezifiziert, an den Modulen müssen demnach passende Transportösen angebracht werden können.

Schliesslich bringt es das Konzept der Rekonfigurierbarkeit mit sich, dass je nach aktueller Konfiguration unterschiedliche *Maschinenperipherie* benötigt wird. Die Nutzung von Druckluft oder Kühlschmiermittel muss möglich sein, sei es über die Halleninfrastruktur oder eigene Aggregate, die an die Maschine angeschlossen werden können. Klemmvorrichtungen an Achsen und Spindel arbeiten oft hydraulisch, so dass auch die Anbindung eines Hydraulikaggregats vorgesehen werden muss. Weitere Peripheriekomponenten wie Späneförderer, Werkzeugwechsler o.ä. müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Bei allen Komponenten, die über die Maschinensteuerung angesprochen werden sollen, ist zudem die physische Verbindung zum Schaltschrank und weiter zur Steuerung vorzusehen.

Technologieanforderungen

Die Technologieanforderungen ergeben sich, wie bereits angedeutet, in erster Linie aus dem anvisierten Teilespektrum, für das ein Modul entwickelt wird. Massgeblich sind dabei die Teilegeometrie, der Werkstoff sowie die Prozessdaten.

Die Teilegeometrie bestimmt die nötigen *Verfahrwege* und somit die Grösse des Arbeitsraums, aber auch das *Störvolumen*. Als Störvolumen wird der Raum bezeichnet, den ein Werkstück einnehmen kann, ohne Maschinenteile zu berühren. Der Arbeitsraum ergibt sich aus den Verfahrbewegungen zur Fertigung aller Geometrieelemente, das Störvolumen aus den Abmessungen des Rohteils. Die zwei Module der Prototypmaschine sollen Verfahrwege von ca. 600 mm respektive ca. 400 mm ermöglichen.

Der Prozess legt die Leistungsanforderungen fest. Bei der Rekonfigurierung werden die Maschinenmodule nach ihren *Leistungsdaten* ausgewählt. Bei der Entwicklung der Module ist die eingangs erwähnte Forderung zu berücksichtigen, das Leistungsniveau an dem aktueller WZMn zu orientieren, damit rekonfigurierbare WZMn in den geplanten Einsatzfeldern auch konkurrenzfähig sind. Die Prototypmodule werden auf eine Maximalgeschwindigkeit v_{max} zwischen 30 und 40 m/min bei einer Maximalbeschleunigung a_{max} von 0.5g (= 5 m/s²) ausgelegt. Als Anforderung an die Genauigkeit wird die Einhaltung der Toleranzwerte in den einschlägigen Normen (ISO 230-2, ISO 230-3, ISO 10791-1) festgesetzt. Die Leistung und Drehzahl der Werkzeugspindel muss nach den zu bearbeitenden Werkstoffen gewählt werden. In der Praxis müssten daher verschiedene Spindelmodule

mit unterschiedlichen Charakteristiken zur Auswahl stehen. Die Wahl der Spindel wirkt sich wiederum auf die erforderlichen Hilfsaggregate und die Peripherie aus. Für die Prototypmaschine wird eine bereits vorhandene Werkzeugspindel wiederverwendet und in ein Spindelmodul integriert.

Das komplette Lastenheft, das der Entwicklung der Prototypmaschine zugrunde liegt, ist in Anhang C enthalten.

5.2 Maschinenkonzept

Dieser Abschnitt beschreibt das Konzept, nach dem eine rekonfigurierbare WZM aufzubauen ist. Ihr charakteristisches Differenzierungsmerkmal gegenüber anderen Maschinenarten ist die konsequente Auslegung ihrer Bestandteile auf eine bedarfsgerechte Adaption durch den Anwender. Die rekonfigurierbare WZM nimmt damit die Funktion einer Sondermaschine wahr, die der Anwender jederzeit nach seinen Anforderungen anpassen kann. Als eine Art „universelle Sondermaschine“ vereint dieses Konzept somit zwei sich bislang ausschliessende Gegensätze.

Im Folgenden werden die zwei Kernaspekte behandelt, die dieses Maschinenkonzept von anderen unterscheidet: Der modulare Aufbau und die dazu benötigten Schnittstellen. Ersterer orientiert sich an bestehenden Ansätzen für komplette Fertigungssysteme, die wiederum an das Konzept der objektorientierten Programmierung angelehnt sind. Die Schnittstellen sind von den Anforderungen an eine WZM geprägt. Sie sollen möglichst unabhängig von der weiteren Detailkonstruktion der Module sein.

5.2.1 Modularer Aufbau

Die Forderung nach Rekonfigurierbarkeit durch den Anwender lässt sich am sichersten und effizientesten mit einem konsequent modularen Aufbau umsetzen. Dieser muss weit über das heute im Werkzeugmaschinenbau vorherrschende Verständnis von Modularität hinausgehen, welches lediglich als Plattformstrategie unter Nutzung vorhandener Varianten bezeichnet werden kann [64, 72, 125].

Die Module rekonfigurierbarer WZMn hingegen müssen als abgeschlossene Einheiten mit minimaler Anzahl an Schnittstellen konstruiert werden. Dies erfordert eine grösstmögliche Übereinstimmung der Systemgrenzen des physischen Moduls mit den funktionalen Systemgrenzen des Moduls [150]. Insbesondere die Leistungselektronik und Steuerungslogik wird heute im Schaltschrank zentralisiert und führt so zu stark verwischten Systemgrenzen. Ein rekonfigurierungsgerechter Aufbau erforderte die Verlegung von Teilen der Elektronik in die Module, so dass beispielsweise die modulspezifische Steuerungslogik komplett modulintern abgehandelt werden könnte. Entscheidend für die Entwicklung sol-

cher Module ist also die Orientierung an der Modulfunktion, nicht an der Funktion der Komponenten. Erst wenn eine klare Trennung der Funktionen möglich wird, lassen sich auch die in [90, 150] beschriebenen autonomen Module verwirklichen.

Die Aufteilung verschiedener Funktionen auf eigenständige Module ermöglicht die Bildung von Kategorien aus Modulen mit gleicher Funktionalität. In Anlehnung an die Kategorienbildung in [90], die allgemein für Module eines rekonfigurierbaren Fertigungssystems aufgestellt wurde, lässt sich für die Werkzeugmaschinenmodule eine Dreiteilung in Bewegungs-, Arbeits- und Unterstützungsmodule vornehmen.

Bewegungsmodule Jede WZM muss Werkzeug und Werkstück über Zustellbewegungen zueinander positionieren. Dazu werden Achsmodule benötigt, die eine lineare oder rotative Bewegung zwischen zwei am Modul befindlichen Schnittstellen ausführen können.

Diese Kategorie fasst sämtliche Module zur Bewegungserzeugung zusammen, unabhängig vom Funktionsprinzip. Alle heute im Werkzeugmaschinenbau üblichen Antriebsausführungen (v.a. Kugelgewindetrieb, Direktantrieb, Riementrieb und Zahnstange-Ritzel-Antrieb) können unter den Modulen vertreten sein. Mit einem vielfältigen Angebot an Varianten mit unterschiedlich langen Verfahrenswegen, ausgelegt für verschiedene Belastungen, bilden diese Module das Grundgerüst der rekonfigurierbaren WZM.

Arbeitsmodule Unter diese Kategorie fallen Module, die direkt oder über ein Werkzeug auf ein Werkstück wirken und dessen Form verändern. Sie wandeln eine verfügbare Energie so um, dass damit wertschöpfende Fertigungsoperationen vorgenommen werden können. Bei WZMn erfolgt dies oft über eine spezielle Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück, die mit einer Spindel erzeugt wird. Sämtliche Arten von Werkzeug- und Werkstückspindeln sind in dieser Kategorie zu finden, doch auch Module für andere Fertigungsverfahren wie Erodieren oder Laserbearbeitung sind hier anzusiedeln. Module, die Füge- und Montagvorgänge ermöglichen, sind ihrer Funktion entsprechend ebenfalls hier einzuordnen.

Unterstützungsmodule Einige Module benötigen zum Betrieb besondere Energieformen oder Medien, genannt sei hier Druckluft als Sperrluft z.B. bei Spindeln und Messsystemen oder hydraulische Ölversorgung zur Klemmung von Werkzeugen oder ganzen Achsen. Diese Funktionen sind bei herkömmlichen WZMn in das Gesamtsystem integriert. Bei rekonfigurierbaren WZMn werden diese Funktionen nun je nach Konfiguration benötigt oder nicht, doch auch die Spezifikation kann variieren. Module, die solche Funktionen bereitstellen, werden als Unterstützungsmodule bezeichnet, da sie die Verwendung eines oder mehrerer anderer Module erst ermöglichen, selbst aber nicht formgebend am

Fertigungsprozess beteiligt sind. Weitere typische Beispiele für Funktionen, die von Modulen dieser Kategorie erbracht werden, sind die Schmierung und Kühlung (jeweils für Prozess und Komponenten) oder das Werkstück- und Werkzeughandling.

Strukturmodule Auch eine rekonfigurierbare WZM benötigt mindestens eine Basis, an der weitere Module angebracht werden. Ein Maschinenbett mit integrierten Modulschnittstellen sowie verschiedene Distanz- und Winkelelemente erlauben den Bau individueller Gestellstrukturen, je nach kinematischen Geometrieanforderungen. Derlei Strukturmodule sind rein passive Module, die keinerlei Energie oder Medium benötigen.

5.2.2 Schnittstellen

Bei jedem technischen Modulsystem stellt sich die Frage nach der Anzahl und Art der Schnittstellen, die für die Einbindung der Module in das Gesamtsystem benötigt werden. Je nach System und Modulfunktion variieren diese stark.

Für rekonfigurierbare WZMn können vier Arten von Schnittstellen unterschieden werden: Mechanische Schnittstellen, Datenschnittstellen, Energieschnittstellen und Schnittstellen zur Übertragung von Materie. Das Vorhandensein und die Ausgestaltung der letzten beiden ist weitestgehend durch die Modulfunktion bestimmt. Datenschnittstellen hingegen sind heute meist standardisiert (oder könnten es sein), zudem sind die Komponenten relativ kostengünstig und klein, so dass Module auch mehrere solche Schnittstellen vorhalten können. Die mechanischen Schnittstellen müssen sogar standardisiert sein, um austauschbar zu sein. Abstufungen müssen unterschiedliche Baugrößen erlauben und sollten die im Maschinenbau üblichen Geometrieverhältnisse aufnehmen.

Nachfolgend werden die einzelnen Schnittstellenarten erläutert. Auf die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Modulschnittstelle wird vertieft eingegangen und auch die Schnittstellenformate, die im Prototyp zum Einsatz kommen, werden an dieser Stelle aufgeführt. Auch wenn für einige Schnittstellen eine standardisierte „Kompaktschnittstelle“ – wie sie beispielsweise im Rahmen des Desina-Projektes [140] entwickelt wurde – möglich und auch sinnvoll wäre, wurde für diesen Konzepttest darauf verzichtet und einfach auf die herstellereigentlichen Anbindungen zurückgegriffen.

Mechanische Modulschnittstelle

Der augenfälligste Unterschied zwischen einer rekonfigurierbaren und einer herkömmlichen WZM ist das Vorhandensein von mechanischen Schnittstellen, über die sich ganze Maschinenmodule miteinander verbinden lassen und somit eine Maschinenstruktur aufgebaut werden kann. Da WZMn höchste Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit und

folglich Steifigkeit erfüllen müssen, ist die Einführung von Schnittstellen, die in jedem Fall eine Schwächung der Struktur darstellen, sehr heikel.

Der Einfluss der mechanischen Modulschnittstelle auf die Steifigkeit der Struktur muss so gering wie möglich gehalten werden. Die Steifigkeit der Anbindung sollte sich in einem ähnlichen Rahmen wie die Modulsteifigkeit bewegen und Grössenordnungen über derjenigen der Koppelstellen (Führungswagen) liegen. Das Dämpfungsverhalten der mechanischen Modulschnittstelle sollte bekannt und tendenziell hoch sein. Da die Module immer wieder in anderen Maschinenkonfigurationen eingesetzt werden sollen, spielt einerseits die Montagefreundlichkeit eine grosse Rolle, und andererseits die mit den zu verwendenden Montagehilfsmitteln erreichbaren Lageabweichungen der Achsen. Zudem soll weder die Positioniergenauigkeit noch die Geradheit von Linearachsen negativ beeinflusst werden, weshalb speziell die Kippwinkel zu berücksichtigen sind. Die Schnittstelle muss kompakt sein, um den Bauraum im Modul nicht unnötig zu besetzen. Damit die Schwingungseigenschaften der Gesamtmaschine nicht negativ beeinträchtigt werden, sollte die Schnittstelle zudem vergleichsweise leicht sein. Sie muss die Module sicher und dauerhaft zusammenhalten und muss dabei kostengünstig sein, in der Anschaffung wie im Unterhalt.

Die Bewertung verschiedener Wirkprinzipie zur Realisierung der gewünschten Verbindungsfunktion führt zum Ergebnis, dass eine geschraubte Flanschverbindung mit Anschlagflächen zur Ausrichtung die genannten Anforderungen am besten erfüllt. Die Schraubverbindung mit Normteilen ist günstig und robust, die Herstellung ist einfach und ebenfalls günstig. Die Auswirkungen auf die Module sowie die Maschine sind auch sehr gering.

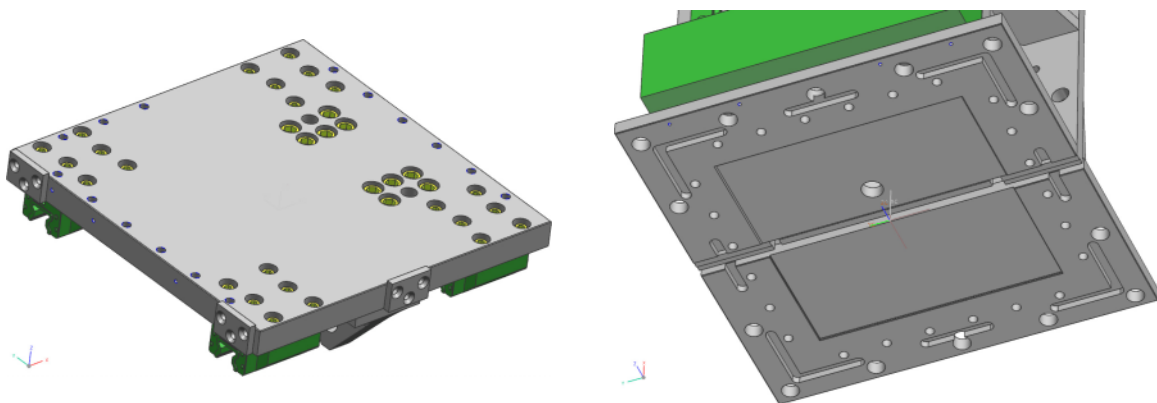


Bild 5.4: Mechanische Modulschnittstelle am Schlitten (links) und das Gegenstück mit Bohrungslochern und Anschlagnuten (rechts). Die quadratische Form erlaubt die Anbindung in vier Positionen, die Dreipunktanschlüge sorgen für eine Wiederholgenauigkeit im Mikrometerbereich bei der Positionierung der Module.

Bild 5.4 zeigt die für die Prototypmaschine realisierte Modulschnittstelle. Sie ist quadratisch mit einer Kantenlänge von 450 mm; die Auflageflächen sind geschliffen mit einer

Ebenheitstoleranz von 10 μm . Entlang jeder Kante sind 6 Bohrungen angebracht, auf einer Platte jeweils mit M12-Gewindebohrungen, auf dem Gegenstück mit einer passenden Durchgangsbohrung. Durch die quadratische Form der Flanschplatte können die Module in 90 °-Schritten zueinander versetzt montiert werden. Die Ausrichtung erfolgt über drei Anschläge, welche die nach dem Aufsetzen verbleibenden drei Freiheitsgrade (eine Rotation, zwei Translationen) sperren. Die zuvor gereinigten Anschlagflächen eines Moduls werden dazu beim Aufsetzen gegen die drei Plättchen am anderen Modul gedrückt.

Die realisierte und in Bild 5.4 rechts gezeigte strukturseitige Schnittstelle besitzt bei einer Kantenlänge von 530 mm eine zusätzliche, äussere Bohrungsreihe mit Lochabstand 125 mm. Damit kann das Modul an den T-Nuten der als Maschinengrundkörper verwendeten Aufspannplatte befestigt werden. Bei den erkennbaren Nuten zwischen den beiden Bohrungsreihen handelt es sich um die erwähnten Anschlagflächen der Modulschnittstelle. Idealerweise sollten die Bohrungsreihe aufeinander abgestimmt sein und zusammenfallen.

Datenschnittstellen

Datenschnittstellen dienen dem Austausch von Informationen auf elektrischem Weg. Eine WZM und folglich auch die Module besitzt eine Vielzahl an Aktoren und Sensoren, die direkt oder über eine Steuerung miteinander kommunizieren. In diesem Bereich ist die Standardisierung am weitesten fortgeschritten, viele Komponenten können heute über genormte Steckverbindungen an Bussysteme angeschlossen werden. Aufgrund des geringen Platzverbrauchs und der niedrigen Materialkosten ist es denkbar, Datenleitungen und Anschlüsse in die Module zu integrieren. So müsste nur noch ein Kabel an das Modul angeschlossen werden und auch das Durchschleifen von Signalen über eine Kette von Modulen wäre realisierbar. Für Komponenten mit sehr kurzen Antwortzeiten sind gegebenenfalls dedizierte Leitungen für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen vorzusehen.

Welcher Standard in einer konkreten Maschinenkonfiguration zum Einsatz kommt, hängt von der Maschinensteuerung und den vorhandenen Komponenten in den Modulen ab, da diese aufeinander abgestimmt sein müssen. Vor allem die eingesetzten Protokolle sind häufig proprietär, so dass eine Anbindung an Komponenten anderer Hersteller gar nicht oder nur mit eingeschränkten Funktionen über ein offenes Protokoll möglich ist. Die Prototyp-Maschine nutzt ProfiBus als Bussystem, die Antriebe werden über das proprietäre System Drive-CliQ angesteuert. Die Messsysteme sind über EnDat02-Schnittstellen verbunden.

Energieschnittstellen

Unter dieser Bezeichnung werden Schnittstellen zur Übertragung elektrischer Energie verstanden, mit der die verschiedenen Verbraucher in einer WZM versorgt werden. Hinderlich bei der Standardisierung von Energieschnittstellen ist, dass die Leitungsquerschnitte

nach dem Maximalstrom und der Absicherung des Verbrauchers ausgelegt sein müssen. Die modulinternen Leistungskabel nach diesen Anforderungen auszulegen und einzubauen ist problemlos möglich. Die weitere Verbindung zur Energiequelle müsste dann über standardisierte Stecker und Kabel erfolgen, die gemäss der jeweiligen Spezifikation zu den Modulverbrauchern passen. Schwierig gestaltet sich die Standardisierung bei geregelten Motoren (Achsantrieb, Spindelantrieb), da hier oft proprietäre Anschlusskabel verwendet werden müssen. Die Schaffung einer standardisierten Energieschnittstelle ist wünschenswert und für den praktischen Einsatz rekonfigurierbarer WZMn sicherlich notwendig. Besitzt die Maschine nur wenige elektrische Verbraucher, kann darauf verzichtet und die Energiezufuhr konventionell realisiert werden. Bei der Prototypmaschine mit zwei Achsantrieben und einer Werkzeugspindel wurden deshalb die heute üblichen Energieleitungen mit Schnittstelle am Schaltschrank verwendet.

Medienschnittstellen

Die Schnittstellenart, die die grösste Vielfalt aufweist, ist jene zur Übertragung von Materie, bei WZMn wird auch oft von Medien gesprochen. Gemeint sind damit Kühlschmiermittel für den Prozess, Kühlmittel für Spindeln, Druckluft, Hydraulik und ähnliches. Je nach Funktion eines Moduls werden ganz unterschiedliche Medien benötigt, die dem Modul zugeführt werden. Anschlüsse mit Leitungen zum Durchschleifen in das nächste Modul können – ausser für Druckluft – nicht ohne weiteres in jedes Modul integriert werden. Die einfachste Lösung ist daher die direkte Verbindung vom Modul zum entsprechenden Aggregat oder dem Infrastrukturanschluss. Auf diese Weise kann stets der richtige Durchmesser, das richtige Material und der passende Anschluss verwendet werden. Die anderen Module müssen in diesem Fall eine Möglichkeit zur Befestigung der Leitungen bieten.

Die Werkzeugspindel der Prototypmaschine benötigt Hydraulikdruck zum Lösen und Spannen des Werkzeugs sowie Druckluft als Sperrluft am Spindelkopf. Die Leitungen werden über eine Robotrax-Leitungsführung, die an anderen Modulen befestigt werden kann, direkt zur Spindel geführt.

5.3 Bestandteile der Maschine

Im Folgenden werden die Bestandteile der entwickelten Prototypmaschine beschrieben. Dabei wird auf die Überlegungen während der Konstruktion eingegangen und die getroffene Auswahl von Komponenten erläutert. Die Maschinenmodule sind auf die Bearbeitung von Werkstücken ausgelegt, wie sie in Tabelle 5.2 aufgeführt sind.

Die Prototypmaschine besteht aus einem Maschinengrundkörper, auf dem die Module angebracht werden. Eine handelsübliche NC-Steuerung mit Schaltschrank sowie die für

den Betrieb der Spindel nötige Peripherie komplettieren die Maschine.

5.3.1 Maschinengrundkörper

Aufgebaut wird die rekonfigurierbare WZM auf einem Grundkörper, der als Maschinenbett fungiert. An ihn werden dieselben Anforderungen gestellt, wie an ein herkömmliches Maschinenbett, also hohe Steifigkeit, gute Dämpfung, neutrales thermisches Verhalten und weitgehende Entkopplung von der Halle, in der die Maschine steht.

Als Grundkörper für die Prototypmaschine wird aus Kosten- und Zeitgründen eine bereits vorhandene Aufspannplatte aus Grauguss verwendet. Die Grundfläche der Aufspannplatte beträgt $2\text{ m} \times 5\text{ m}$, und in Längsrichtung sind im Abstand von 250 mm acht T-Nuten für Nutensteine nach DIN 650 – 28 eingearbeitet. Die Aufspannplatte weist in Längsrichtung zwei Stege und in Querrichtung sieben Stege auf, so dass insgesamt 24 in etwa kubische, unten offene Kammern entstehen. Aufgestellt ist der Grundkörper auf 15 Füßen aus Kunststoff-Dämpfungselementen. In Bild 5.5 ist links ein CAD-Modell der Aufspannplatte abgebildet.

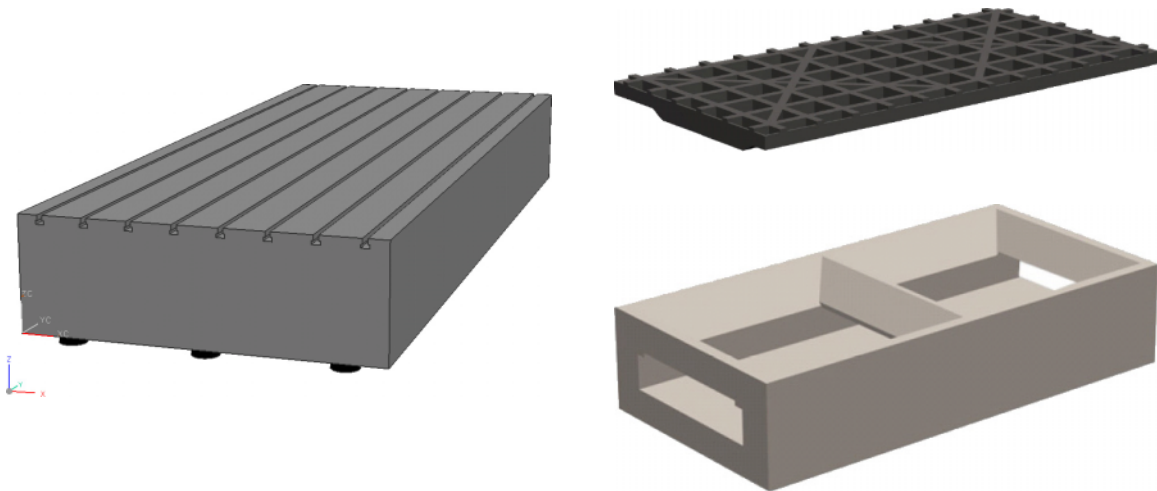


Bild 5.5: Links: CAD-Modell der Aufspannplatte im Maschinenlabor, die als Grundkörper für den Aufbau der Prototypmaschine genutzt wird. Rechts: Konzeptstudie für ein Universal-Maschinenbett, bestehend aus einer Basis aus Mineralguss sowie einer aufgesetzten Gitterplatte aus Stahl zur Befestigung der Module.

Die Aufspannplatte ist zwar für den Bau der Prototypmaschine ausreichend, ein praxistaugliches Maschinenbett muss allerdings auf Spänefluss ausgelegt sein. Aus diesem Grund wurde in einer Studie ein Konzept für ein Universal-Maschinenbett für rekonfigurierbare WZMn erarbeitet. Dieses sollte für den Einsatz der entwickelten Maschinenmodule geeignet sein und den Spänefall und -abtransport berücksichtigen: In einem ersten

Schritt wurde ein modulares Konzept untersucht, bei dem ein Maschinenbett aus mehreren gleichartigen Würfeln zusammengesetzt wird. Betrachtet wurden verschiedene Varianten aus Gusseisen und Mineralguss, die alle sechsseitige Bearbeitung innerhalb enger Toleranzen hinsichtlich Ebenheit, Parallelität und Rechtwinkligkeit erfordern. Bei allen Varianten werden jedoch die Fertigungskosten, die unzureichende Steifigkeit sowie das Gewicht als kritisch angesehen, weshalb diese Lösung nicht zielführend ist.

In der Folge wurde ein Ansatz mit integraler Bauweise für das Universal-Maschinenbett entwickelt und geprüft. Der gesamte Unterbau wird aus Mineralguss hergestellt und enthält Aussparungen für einen Späneförderer. Auf diesen Unterbau wird eine bearbeitete Gitterplatte aus Gusseisen montiert, an welcher wiederum die Module befestigt werden. Bild 5.5 zeigt rechts eine von vier näher untersuchten Varianten, bestehend aus Unterbau und Gitterplatte. Detailliertere Informationen zu diesen vier Varianten sind in Anhang D abgedruckt.

5.3.2 Maschinenmodule

Die Maschinenmodule sind die zentralen Elemente einer rekonfigurierbaren WZM, da erst durch sie das Konzept umsetzbar wird. Auch die Prototypmaschine soll aus solchen Modulen aufgebaut sein, für ihre Entwicklung wurde deshalb grosser Aufwand betrieben.

Ein Dilemma hierbei besteht darin, dass mit Modularität und Steifigkeit zwei gegensätzliche Zielgrössen zu erreichen sind. Steifigkeit wird in WZMn über grosse, dickwandige und somit schwere Strukturen erreicht. Modularität und mehr noch eine einfache Handhabung hingegen erfordern eine kompakte Bauweise, die auf kleine Abmessungen und geringes Gewicht zielt.

Aufgrund der Forschungsthematik lag der Fokus bei der Entwicklung auf Modularität und Kompaktheit. In der folgenden Beschreibung der Module wird deshalb besonders darauf sowie auf die zu erfüllende Funktion eingegangen. Aus Kosten- und Zeitgründen wurden alle Module als Schweisskonstruktionen ausgeführt. Um sicherzustellen, dass keine nachteiligen Kompromisse hinsichtlich der Steifigkeit eingegangen wurden, wurden die Module noch während der Entwicklung einer FE-Analyse in verschiedenen Maschinenkonfigurationen unterzogen, deren Ergebnisse abschliessend kurz besprochen werden.

Lange Linearachse

Die in Bild 5.6 abgebildete lange Linearachse (LLA) ist ausschliesslich für horizontalen Einsatz ausgelegt und bietet einen maximalen Verfahrweg von 600 mm zwischen den Anschlagpuffern. Sie besteht aus einem auf Schlittenseite offenen Kasten, auf dessen Seitenwänden breitere Leisten zur Aufnahme der Führungsschienen angebracht sind. Zur

Verbesserung der Steifigkeit des Moduls ist über die komplette Länge des Kastens ein X-Profil eingeschweisst, das in der Schnittansicht in Bild 5.6 rechts erkennbar ist. Für den Transport sind an jeder Seitenwand zwei Gewindebohrungen zum Einschrauben von Transportösen vorhanden.

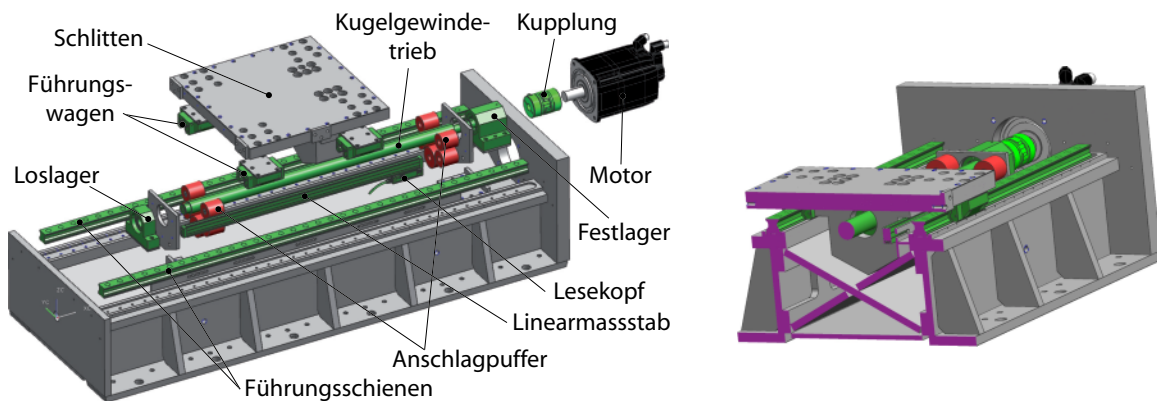


Bild 5.6: Explosionsansicht der langen Linearachse (links). Grösstmögliche Steifigkeit wird über eine X-Verstrebung erreicht, die über die volle Länge des Kastens eingeschweisst ist (rechts).

Der Antrieb erfolgt über einen Synchronmotor mit Nenndrehzahl 3000 min^{-1} und integriertem Absolutwertgeber. Der Motor ist selbstgekühlt, das heisst, die Wärme wird über den Flansch abgeführt, weshalb dieser deutlich massiver ist als die anderen Modulpartien. Über eine Klauenkupplung mit Elastomerdämpfungskranz ist der Motor direkt an den Kugelgewindetrieb angebunden. Die 1000 mm lange gerollte Kugelgewindespindel mit Durchmesser 40 mm und Steigung 16 mm ist motorseitig fest und am anderen Ende lose gelagert. Die Kugelgewindemutter ist fettgeschmiert und läuft mit 5 % Vorspannung spielfrei. Die Aufnahme für das Muttergehäuse ist aus einem Block brenngeschnitten und mit dem Schlitten verstiftet und verschraubt. Ein fluchtender und verzugsfreier Einbau wird über Anpassplatten unter den Spindellagern und unter den Führungswagen erreicht, die bei der Montage auf die erforderliche Dicke geschliffen werden können. Als Linearführungen kommen Rollenschienenführungen der Grösse 35 aus Stahl mit der Genauigkeitsklasse SP zum Einsatz. Alle Führungswagen sind wie die Kugelumlaufmutter fettgeschmiert und mit 13 % der Tragzahl C vorgespannt. Am Ende des Verfahrensweges sind jeweils fünf Elastomer-Federn aus Polyurethan angebracht, die bei einem Aufprall die kinetische Energie von 1000 kg bewegter Masse bei Maximalgeschwindigkeit abbauen können. Die LLA ist mit einem direkten, absoluten Messsystem ausgestattet. Die Messlänge des optischen Glasmassstabs beträgt 670 mm, die Genauigkeitsklasse $\pm 5 \mu\text{m}$ und die Teilungsperiode $20 \mu\text{m}$. Der Massstab ist am Kasten verschraubt und der Lesekopf am Schlitten. Zum Schutz der gesamten Achse ist eine Blech-Teleskopabdeckung vorgesehen,

die auf den Führungsschienen gleitet.

Kurze Linearachse

Im Unterschied zur LLA ist der Verfahrweg der kurzen Linearachse (KLA) um 200 mm reduziert, dafür jedoch für horizontalen und vertikalen Einsatz konzipiert. Die Kugelgewindespindel und die Führungsschienen sind daher jeweils 200 mm kürzer, ansonsten allerdings identisch, ebenso wie alle anderen Lineartechnikkomponenten. Der Motor ist von den Leistungsdaten her ebenfalls identisch, jedoch wurde aus Sicherheitsgründen bei der Vertikalnutzung eine Ausführung mit integrierter Bremse gewählt, die auch ein deutlich grösseres Motorträgheitsmoment besitzt.

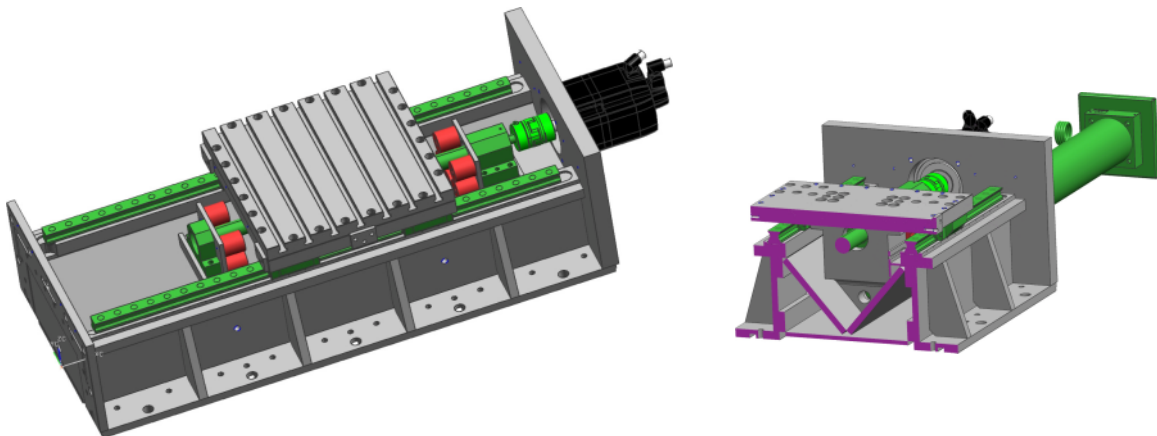


Bild 5.7: Die kurze Linearachse ist ähnlich aufgebaut wie die lange. Wegen der Kolbenstange für den Gewichtsausgleich kann zur Versteifung des Kastens nur ein V-Profil eingeschweisst werden.

Die markantesten Unterschiede der Modulkonstruktion sind bedingt durch die Möglichkeit zur Aufnahme einer Gewichtsausgleichseinheit. Aus dem Querschnitt in Bild 5.7 rechts ist ersichtlich, dass statt des X-Profils nur ein V-Profil eingeschweisst ist. Diese Anpassung ist notwendig, da die Aufnahme für das Muttergehäuse am Schlitten erweitert werden muss, um die Kolbenstange des Gewichtsausgleichszylinders daran befestigen zu können. Dies erfolgt über eine Verlängerung der Aufnahme in der Mittelebene des Moduls, unterhalb der Kugelgewindespindel. Die KLA verfügt nur über den motorintegrierten Rotationsgeber als Messsystem, auf einen Glasmassstab wurde verzichtet. Vor Spänen und anderen Partikeln geschützt wird die KLA durch Faltenbälge mit Metalllamellen.

Spindelmodul

Das Spindelmodul wurde um eine bereits vorhandene Werkzeugspindel herum konstruiert. Es besteht aus einem Spindelkasten, mit dem eine Spindelhülse samt Spindel wie in Bild 5.8 dargestellt verschraubt wird. Die Aufnahmeöffnung für die Spindelhülse steht senkrecht zur Flanschfläche der Modulschnittstelle. Die Spindel darf sowohl vertikal als auch horizontal eingesetzt werden, was mit dieser Anordnung der Modulschnittstelle möglich ist. Die Spindelhülse ist fest mit der Spindel verbunden, da die Kühlung der Spindel über in die Hülse eingearbeitete Windungen erfolgt, durch die Kühlflüssigkeit fließt.

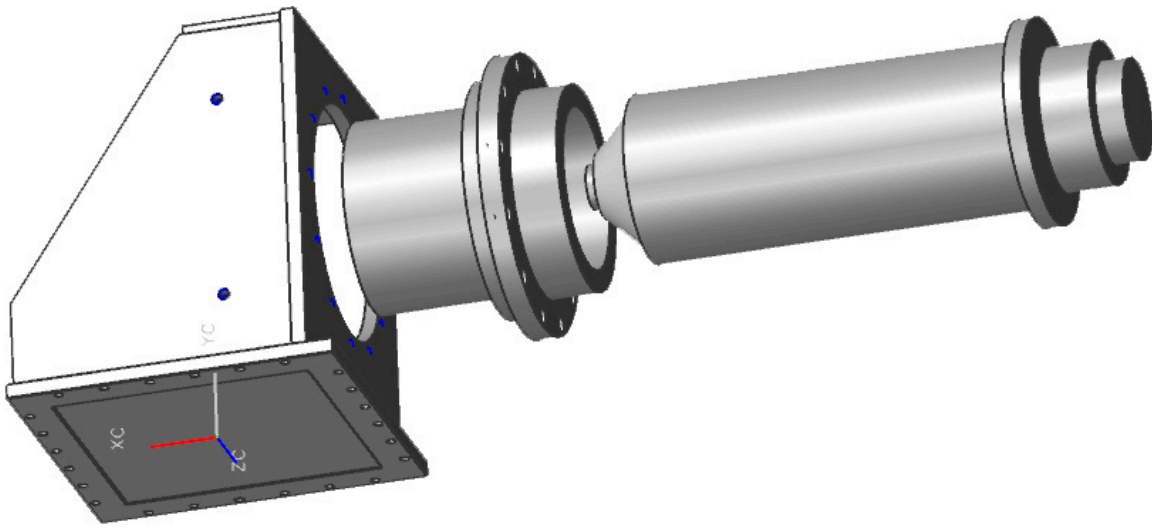


Bild 5.8: Explosionsansicht der Spindeleinheit. Die Werkzeugspindel wird von einer zylindrischen Spindelhülse gehalten, die wiederum mit dem Spindelkasten verschraubt wird.

Die Spindel mit Aussendurchmesser 230 mm erbringt eine Maximalleistung von 20 kW. Die zulässige Maximaldrehzahl liegt bei 12000 min^{-1} , diese wird jedoch nur in Dreieckschaltung erreicht. In der Prototypmaschine wird die Spindel stets in Sternschaltung angeschlossen und erreicht somit eine Maximaldrehzahl von 3600 min^{-1} . Die Nenndrehzahl beträgt 1200 min^{-1} . Die Spindel ist fettgeschmiert, Schmieranschlüsse sind nicht vorgesehen.

Das Spindelmodul benötigt Druckluft und Hydraulikdruck für den Betrieb. Am Spindelkopf wird zum Schutz der Lagerung permanent Sperrluft zugeführt und bei einem Werkzeugwechsel wird zusätzlich der Konus ausgeblasen, um eventuell eingebrachte Späne zu entfernen. Die dafür erforderlichen Filter und Druckregler sind auf einem Pneumatikpanel zusammengefasst, das der Spindel zugeordnet ist. Die Werkzeugschnittstelle ist ein ISO B40 Steilkegel. Gespannt wird das Werkzeug über Tellerfederpakete mit Hydraulikunterstützung. Das Lösen erfolgt ebenfalls über Hydraulik. Die Umschaltung zwischen den

beiden Zuständen geschieht über ein elektrisch betätigtes 4/2-Wege-Magnetventil.

Einheiten zur Erweiterung der Modulfunktionalität

In manchen Maschinenkonfigurationen sind zusätzliche Komponenten nötig, um eine gewünschte Modulfunktionalität zu erbringen. Diese Einheiten sind eine Ergänzung zu einem Modul, stellen aber kein eigenständiges Modul dar. Sie werden über spezifische Schnittstellen mit den Modulen verbunden und verfügen nicht zwangsläufig über eine Modulschnittstelle. Für den geplanten Einsatz der Maschinenmodule wurden drei verschiedene Versteifungseinheiten und eine Gewichtsausgleichseinheit entworfen.

Versteifungseinheiten Zweck der Versteifungseinheiten ist, wie der Name schon sagt, eine Erhöhung der Steifigkeit der Achsmodule in bestimmten Konfigurationen. Für beide Linearachsen wurde jeweils eine horizontale Versteifungseinheit (hVE) und für die KLA zusätzlich eine vertikale (vVE) konstruiert; jeweils ein Vertreter ist in Bild 5.9 zu sehen.

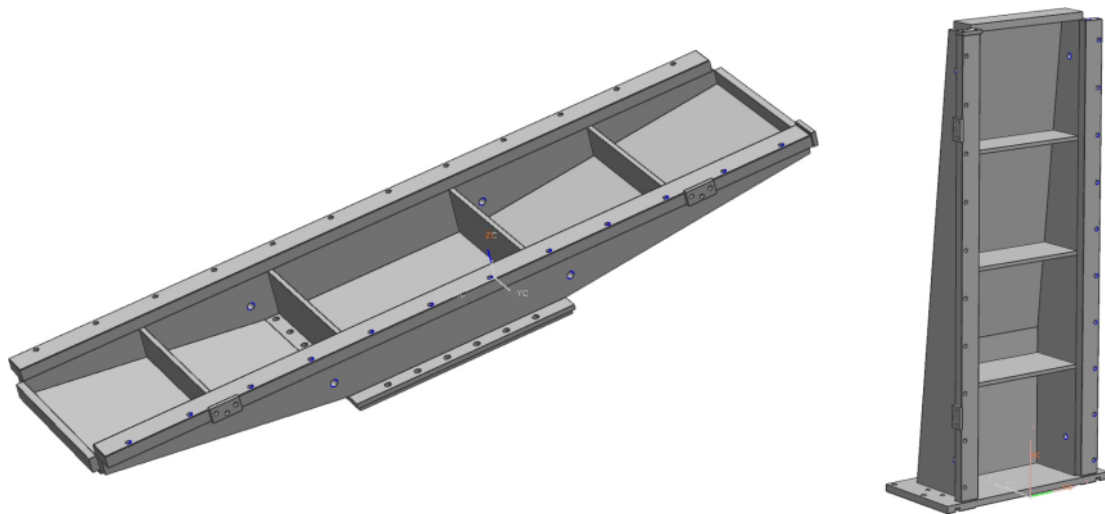


Bild 5.9: Horizontale Versteifungseinheit für die lange Linearachse (links) und vertikale Versteifungseinheit für die kurze Linearachse. Die Versteifungseinheiten werden jeweils an der Auflagefläche der Module verschraubt.

Die hVE ist für den Einsatz als obere Achse auf einem Kreuztisch gedacht oder wenn eine Achse höher positioniert werden soll. Die Linearachse wird über die volle Länge mit den Längsträgern verschraubt, wodurch erst ein geschlossener Kasten entsteht, der die Steifigkeit nennenswert erhöht. Die VEen allein sind als offene Profile konstruiert, damit eventuelle Geometriefehler nicht den Modulen aufgezwungen werden und diese verziehen. Auf der Gegenseite befindet sich parallel zur Modulaufgabe eine Modulschnittstelle

(vgl. Abschnitt 5.2.2), über die die entstandene Achseinheit mit einem anderen Modul verbunden werden kann.

Die vVE ist ähnlich aufgebaut wie die hVE, ihre dreieckig zulaufende Form ergibt sich aus dem Biegemomentenverlauf des einseitig eingespannten Balkens bei lokaler Querbelastung am Balkenende. Die Modulschnittstelle ist hier senkrecht zur Modulaufgabe angeordnet, wobei die vVE nur die Hälfte des Flansches bildet. Erst zusammen mit der bearbeiteten Endplatte der KLA entsteht eine vollwertige Modulschnittstelle.

Gewichtsausgleichseinheit Für den vertikalen Einsatz der KLA wurde eine Gewichtsausgleichseinheit (GAE) entworfen, welche die am Schlitten wirkende Gewichtskraft kompensiert und somit den Motor entlastet. Die GAE besteht aus einem Pneumatikzylinder, dessen Kolbenstange an der Aufnahme des Muttergehäuses unterhalb des Schlittens befestigt wird. Die beidseitig eingesetzte Kegelpfanne-Kugelscheibe-Kombination verhindert das Verbiegen der Kolbenstange. Querkräfte werden durch ausreichend radiales Spiel vermieden, so dass einzig axiale Kräfte auf den Kolben wirken. Der Zylinder ist auf einen Maximaldruck von 16 bar ausgelegt und wird im Betrieb entsprechend der anliegenden Masse mit konstantem Druck beaufschlagt. Bei einem Kolbendurchmesser von 40 mm können pro 1 bar Druck etwa 500 N Gewichtskraft kompensiert werden.

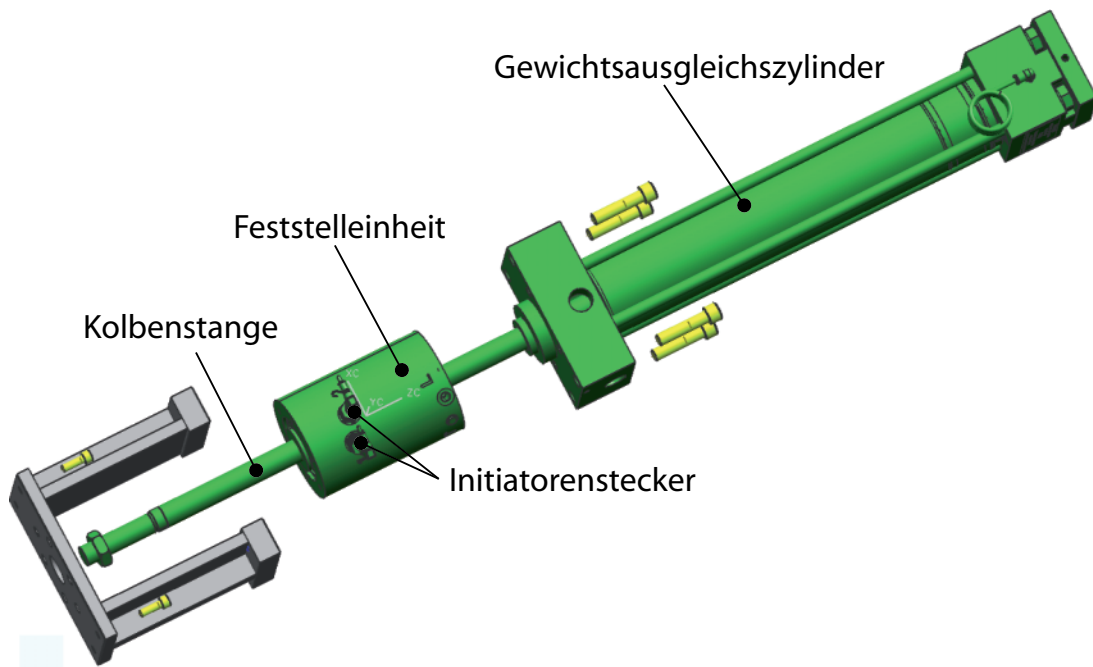


Bild 5.10: Explosionsansicht der Gewichtsausgleichseinheit. Auf die Kolbenstange des Ausgleichszylinders wirkt zudem eine pneumatische Feststelleinheit, die die Achse bei Druckverlust oder Stromausfall arretiert.

Aus Sicherheitsgründen wurde zudem eine Feststelleinheit integriert, welche ebenfalls auf der Explosionsansicht in Bild 5.10 dargestellt ist. Die Feststelleinheit wirkt direkt auf die Kolbenstange und bringt eine maximale Klemmkraft von 12 kN auf. Die Feststelleinheit ist ein Sicherheitselement und bietet Schutz gegen unbeabsichtigtes Absinken der Achse im Notaus-Zustand oder bei nicht freigegebenen Antrieben. Die Bremse ist nach dem Federspeicherprinzip aufgebaut, das heisst die Haltekraft wird mechanisch über Federn aufgebracht und pneumatisch gelöst. Bei Wegfall des Luftdrucks wird sofort geklemmt. Zwei Initiatoren überwachen den Klemmzustand der Bremse. Die Signale der induktiven Näherungsschalter werden in der PLC verarbeitet, so dass die Achsfreigabe erst erteilt wird, wenn die Bremse gelöst ist.

Konstruktionsbegleitende FE-Analyse

Konstruktionsbegleitend wurden FE-Analysen an den Maschinenmodulen durchgeführt. Dabei wurden die beiden Linearachssmodule miteinander verglichen, der Einfluss der hVE betrachtet und drei Maschinenkonfigurationen auf ihre Steifigkeit unter Prozesslast hin untersucht.

Für den Vergleich der beiden Linearachsen wurde jeweils eine Flächenlast auf die Flanschplatte aufgebracht und dann die Verschiebung in Krafrichtung untersucht. Die Achsrichtung wurde dabei jeweils als x-Richtung festgelegt, die Richtung normal zur Modulschnittstelle als z-Richtung und die verbleibende Querrichtung als y-Richtung. Bei der Initialkonstruktion zeigt sich dabei am Festlager der KLA eine Verschiebung von 14 μm , verglichen mit 5 μm bei der LLA, bedingt durch die Torsion des Steges, auf dem das Lager befestigt ist und der bei der KLA aufgrund des V-Profiles länger ausfällt als bei der LLA mit X-Profil. Indem der Steg durch Vollmaterial ersetzt wurde, das direkt mit dem jeweiligen Profil verschweisst wird, konnte diese dominant hervortretende Schwachstelle beseitigt werden. Die höhere Steifigkeit der LLA durch Verwendung des X-Profiles zeigt sich auch in den Berechnungen.

Zur Beurteilung des Einflusses der hVE wurde eine KLA jeweils mit und ohne hVE untersucht. Die Verschiebungen in x-Richtung waren quasi identisch und unterschieden sich nur um 0.6 %. Der absolute Wert von 75 μm wird durch die Steifigkeiten des Festlagers und der Spindelmutter bestimmt. Ähnlich verhält es sich bei Belastung in z-Richtung, wo der Unterschied 2.5 % beträgt. Hier ist die Drucksteifigkeit der Wälzführungseinheiten massgeblich. Ein grösserer prozentualer Unterschied tritt bei Belastung in y-Richtung auf. Ohne hVE verlagert sich der Schlitten um 2.8 μm , mit hVE um 4.3 μm . Die Basisauslenkung ist wiederum durch die Steifigkeit der Wälzführungseinheiten bestimmt. Danach kommt der längere Hebelarm in z-Richtung zur Fixierung zum Tragen, der sich bei Verwendung der hVE ergibt und sich in diesem Fall negativ auswirkt.

Die Kreuztisch-Konfiguration besteht aus der LLA als Basis und der aufgesetzten KLA

mit hVE. Sie wurde mit einer Prozesskraft von 3 kN belastet, die 50 mm über der Modulschnittstelle angreift. In Bild 5.11 sind links die Verlagerungen in Achsrichtung der LLA (y-Richtung im Bild) aufgrund einer Kraft in derselben Richtung dargestellt. Die maximale Verlagerung des Schlittens von circa 91 μm entsteht teilweise durch das Einfedern der Lager in dieser Achsrichtung und teilweise durch die Verkippung der oben sitzenden KLA um dessen Längsachse. Die Verlagerungen in Achsrichtung der KLA (x-Richtung im Bild) bewegen sich um 73 μm , wiederum hervorgerufen durch die Lagernachgiebigkeiten. In vertikaler Richtung sind sie vernachlässigbar klein.

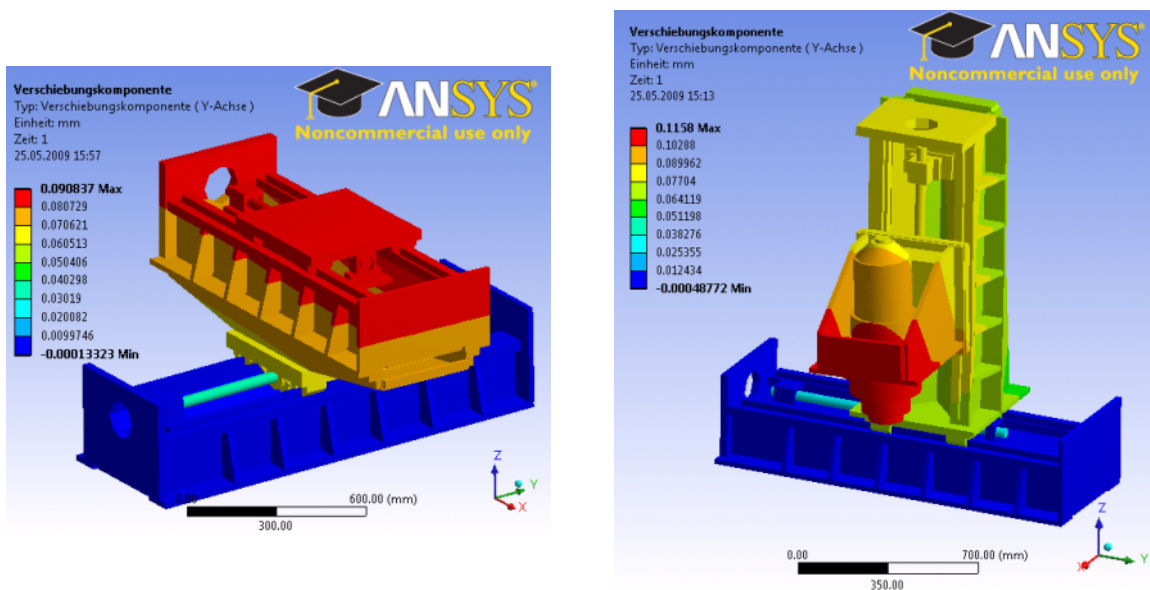


Bild 5.11: Verlagerungen der Kreuztischkonfiguration (links) und der Fahrständerkonfiguration (rechts) aufgrund von Prozesslast. Es ist deutlich erkennbar, dass die Verlagerungen hauptsächlich durch die Nachgiebigkeit der Koppelstellen und durch Verkippungen der aufgesetzten Module hervorgerufen werden.

Die Fahrständerkonfiguration setzt sich aus einer horizontalen LLA und einer darauf montierten KLA mit vVE zusammen. Bild 5.11 rechts zeigt die Verlagerungen in Achsrichtung der LLA (y-Richtung im Bild) bei Kraft in derselben Richtung. Die Prozesskraft von 3 kN greift diesmal 150 mm unterhalb der Spindel an. Gemessen wird die Verschiebung an der Werkzeugaufnahme der Spindel. Wie bei den anderen Berechnungen auch ist die resultierende maximale Verlagerung von 115 μm zu einem Grossteil durch die Lagernachgiebigkeiten in Achsrichtung bedingt. Die Verkippung der vertikalen KLA und die Rotation des Spindelmoduls liefern den restlichen Beitrag. Etwas kleiner sind die Verlagerungen bei Kraftaufbringung in Achsrichtung der KLA (z-Richtung im Bild), da der Hebelarm von der Kraft zur Drehachse zwischen den Führungen in diesem Fall kleiner ist. Deutlich kleinere Verlagerungen entstehen bei Kraftaufbringung senkrecht zu den beiden

Achsrichtungen (x-Richtung im Bild). Die maximale Verlagerung von 18 μm ergibt sich fast ausschliesslich durch die Verkipfung der Spindel hin zur Achse.

Für die dritte Maschinenkonfiguration wurde die vertikale KLA um 90° gedreht, so dass die Fläche der Modulschnittstelle in Achsrichtung der LLA zeigt, und neben die LLA gesetzt. Die Spindel wurde horizontal am Schlitten der KLA befestigt. Der Schlitten der LLA trägt eine Rotationsachse. Die Ergebnisse sind ähnlich wie bei den anderen Konfigurationen. Sie zeigen, dass die Module in sich ausreichend steif sind, die Verlagerungen werden hauptsächlich durch die Nachgiebigkeit der Lager in axialer Richtung hervorgerufen.

5.3.3 Steuerung

Der Wahl der Maschinensteuerung für eine rekonfigurierbare WZM kommt eine herausragende Bedeutung zu. Bei der Rekonfigurierung wird die Steuerung nicht ausgetauscht, sondern nur neu konfiguriert. Sie muss demnach ausreichende Funktionalität vorhalten, um mit verschiedenen Konfigurationen einsetzbar zu sein. Dies betrifft insbesondere die Anzahl der verfügbaren Achsen und deren Bündelung in Kanälen. Unter Kanälen werden Gruppen von zueinander simultan interpolierenden Achsen verstanden. Die Konfiguration der Steuerung sollte über Schnittstellen zugänglich und manipulierbar sein, damit die aus dem ABK gewonnenen Steuerungsparameter direkt dafür genutzt werden können. Der Konfigurierungsvorgang muss von einem Maschinenanwender durchzuführen sein.

Im Rahmen der Entwicklung der Prototypmaschine wurden die für WZMn vorgesehenen Hochleistungs-NC-Steuerungen von drei führenden Herstellern miteinander verglichen. Im Folgenden wird auf die ausschlaggebenden Unterschiede eingegangen. In Tabelle 5.3 sind die Leistungsdaten prinzipiell geeigneter NC-Steuerungen von Bosch Rexroth, Heidenhain und Siemens gegeben. Da a priori unbekannt ist, mit wievielen und welcher Art von Achsen eine rekonfigurierbare WZM betrieben wird, sollte die Steuerung in diesem Punkt möglichst flexibel sein. Die in Kapitel 3 entwickelten Einsatzszenarien legen zudem Parallelbearbeitung nahe, wozu mehrere unabhängige Kanäle in der Steuerung konfigurierbar sein müssen. Aufgrund dieser kritischen Anforderungen scheidet die Heidenhain-Steuerung bereits aus, da sie nur einen Kanal bietet. Sowohl die Steuerung von Bosch Rexroth als auch die von Siemens können ausreichend viele Achsen und Spindeln steuern. Bei allen betrachteten Steuerungen ist die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS, PLC) integriert und bildet zusammen mit der NC eine Einheit. Die PLC ist jeweils der Master-Rechner und somit die oberste Instanz der Maschinensteuerung. Die Anzahl Ein- und Ausgänge ist bei allen Steuerungen über den Anschluss von E/A-Einheiten in einem Masse erweiterbar, dass diese keinen Engpass darstellen. Mit der Wahl der Steuerung wird auch die Schnittstelle zu den Antrieben festgelegt, da die Steuerungshersteller unterschiedliche Systeme verwenden. Für eine rekonfigurierbare WZM sollte darauf geachtet werden, dass die Schnittstelle problemlos Änderungen bzw. Erweiterungen zulässt. Die Antriebsmodule

müssen entsprechend der Steuerungswahl mit passenden Motoren ausgerüstet sein.

Bei der Rekonfigurierung müssen NC und PLC konfiguriert werden. Von grosser Bedeutung sind daher die verschiedenen Möglichkeiten zur Konfigurierung von NC und PLC. Programmiert wird die Ablauflogik jeweils in herstellereigenen Umgebungen, wobei ausser bei Heidenhain alle Eingabesprachen nach IEC-61131-3¹ verwendet werden können. Abgespeichert werden die PLC-Bausteine jedoch in einem proprietären Datenformat, so dass die Konfigurierung der PLC zwingend über ein herstellerspezifisches Konfigurierungstool erfolgt. Die Parametersätze der NC-Maschinendaten sind bei allen drei Steuerungen binär gespeichert, so dass auch dafür ein Softwaretool des Herstellers verwendet werden muss oder die Werte manuell eingegeben werden müssen. Da die Bosch-Rexoroth-Steuerung bislang nicht automatisiert konfiguriert werden kann, ist sie derzeit ungeeignet für den Einsatz an rekonfigurierbaren WZMn. Die zur Konfigurierung der Siemens-Steuerung verfügbare Software „SinuCom Update Agent“ kann Ascii-Dateien mit Parameterwerten einlesen und daraus die gewünschte Maschinenkonfiguration erstellen, so dass sie im Rekonfigurierungsablauf als Bindeglied zwischen ABK und Maschinensteuerung fungieren kann. Ein weiterer Pluspunkt dieser Steuerung ist die hier gegebene Möglichkeit zum Test der Maschinenkonfiguration als HiL-Simulation im Machine Simulator [127]. Die vollständige Vergleichstabelle der Steuerungen ist in Anhang E abgedruckt.

Schliesslich bietet die Siemens-Steuerung über sogenannte Compile-Zyklen als einzige einen bereits erprobten und prinzipiell offenen Weg zum Eingriff in den Steuerungskern. Compile-Zyklen sind eigenständige Programme, die beim Start der Steuerung geladen und in den NC-Kern eingebunden werden. Ihre Funktionalität steht dann genauso zur Verfügung wie die vom Steuerungshersteller programmierten Zyklen. Diese Eingriffsmöglichkeit könnte bei rekonfigurierbaren WZMn zur Implementierung gegebenenfalls notwendiger Zusatzfunktionalitäten, insbesondere Kompensationen, genutzt werden. Für Bewegungs- oder Arbeitsmodule könnten spezielle Funktionsbausteine vom Modulhersteller mitgeliefert und eingebunden werden.

Bei der am Prototyp eingesetzten Maschinensteuerung handelt es sich um eine Siemens 840D solution line (sl) mit NCU 720.1 und HMI-Einheit PCU 50. Die NCU wird unter Software-Version 2.5 betrieben. Die Steuerung kann über ProfiBus zudem an den Sinumerik Machine Simulator angeschlossen werden. Der Schaltschrank ist auf den Betrieb einer Werkzeugspindel und zweier Achsmodule ausgelegt, kann jedoch problemlos für den Betrieb zusätzlicher Achsen ausgebaut werden.

¹Die PLC-Eingabesprachen nach IEC-61131-3 umfassen: AWL (Anweisungsliste), ST (Strukturierter Text), KOP (Kontaktplan), FBS/FUP (Funktionsbausteinsprache/Funktionsplan), AS (Ablaufsprache)

Tabelle 5.3: Vergleich kritischer Eigenschaften verschiedener Steuerungen.

Kriterium	Steuerung		
Hersteller	Siemens	Heidenhain	BoschRexroth
Reihe	840	iTNC	IndraMotion MTX
Typ	D sl / Di sl	530	performance
<i>NC</i>			
Hauptrechner (CPU)	NCU 710,720,730 / PCU50	MC 422 C (13 A.) MC 420 (5 A.)	IndraControl P60
Max. Anzahl Achsen unabhängige Kanäle	$\leq 31^1 / \leq 20$ $\leq 10^2 / \leq 10$	5 (S) / 13 (O) 1	8 – 64 3 (S) – 12 (O)
interpolierende Achsen pro Kanal	≤ 12	5	4 (S) – 8 (O)
Hauptspindeln	= Anzahl Achsen; ≤ 5 pro Kanal	≤ 2	$\leq 32^3$
Drehachsen	= Anzahl Achsen	≤ 3	= Anzahl Achsen
Gantry-Achsen	≤ 8 Achsen (= 24 Antriebe)	≤ 2 (= 4 Antriebe)	≤ 8 pro Kanal
<i>PLC</i>			
integrierte PLC	CPU 317-2DP	ja ⁴	ja
Programmiersprachen	IEC 61131-3, HiGraph	AWL	IEC 61131-3
Programmierung	STEP7	PLCdesignNT	IndraWorks
Dateiformat	Proprietär	Ascii (Text)	Proprietär
Anzahl analoge Ein-/Ausgänge	Modular erweiterbare Peripherie (über Profibus)	3/6	8/8 (High-Speed ⁵) 8192/8192 (Felddbus)
Anzahl Felddbus-Slaves	≤ 128	k.A.	k.A.
<i>Konfigurierung</i>			
Art der Konfigurierung	Manuell und automatisiert	Manuell und automatisiert	Manuell
Dateityp Parametersatz	Binär	Binär	Binär
Dateityp Programme	Binär	Ascii	Binär
Generieren der Daten	SinuCom Update Agent	TNCopt	IndraWorks
Testmöglichkeiten im Voraus	Machine Simulator	k.A.	k.A.

¹ ≤ 6 mit NCU 710² ≤ 4 mit NCU 710³ mit SERCOS/IndraDrive⁴ erweiterbar mit externen PLC-Systemen PL 510, PL 511, PL 512 oder PL 550⁵ Zykluszeit ≤ 1 ms, für zeitkritische Anwendungen

5.3.4 Peripherie

Jede WZM benötigt Peripherieaggregate für Nebenfunktionen, um ihre Hauptfunktion, die Teilefertigung, zu erfüllen. Üblicherweise umfasst dies Funktionen zum Werkstück- und Werkzeughandling sowie zur Durchführung des Fertigungsprozesses selbst.

Die Prototypmaschine verfügt über grundlegende Peripherieaggregate für die WZ-Spindel und die Gewichtsausgleichseinheit. Auf Werkzeugwechsel- und Werkstückhandlungssysteme wurde im Rahmen des Konzepttests verzichtet. Die Peripherie beschränkt sich somit auf die Pneumatik und die Hydraulik.

Pneumatik

Druckluft wird normalerweise über die Halleninfrastruktur bereitgestellt und von dort bezogen. An der Maschine sind dann benötigte Pneumatiketelemente wie Druckregler oder Filter angebracht, durch die die Luft auf ihrem Weg zum Verbraucher strömt.

Die Prototypmaschine benötigt Druckluft für den Betrieb der WZ-Spindel und für die GAE. Die WZ-Spindel wird während des Betriebs permanent mit Sperrluft beaufschlagt, welche das Eindringen von Spänen in die Lager verhindert. Die Luft wird dazu gefiltert und der Druck über einen Druckregler auf 4 bar gesenkt. Beim Werkzeugwechsel wird der Konus der Werkzeugaufnahme mit einem Luftstoss mit 5 bar ausgeblasen. Über ein Magnetventil lässt sich dieser Vorgang auslösen. Alle für den Betrieb der Spindel benötigten Komponenten sind auf einem Pneumatikpanel zusammengefasst, das bei Verwendung des Spindelmoduls an die Hallendruckluft angeschlossen wird. Vom Pneumatikpanel aus sind dann passende Druckluftschläuche direkt zur Spindel verlegt. Für viele Module liessen sich die Pneumatikkomponenten direkt ins Modul integrieren, so dass das Modul direkt oder in Serie mit anderen Modulen an die Hallendruckluft angeschlossen werden könnte.

Die GAE arbeitet ebenfalls pneumatisch und ist auf einen maximalen Betriebsdruck von 16 bar ausgelegt (s. Abschnitt 5.3.2). Für den Betrieb sind wiederum einige Pneumatikkomponenten erforderlich, die in einer mobilen Einheit zusammengefasst sind. Da die Werkhalle Druckluft mit 8 bar zur Verfügung stellt, wird der Druck mittels eines Maximator Druckübersetzers im Verhältnis 1:2 erhöht. Die komprimierte Luft wird in einen Druckbehälter gepumpt, der an der Zuleitung geschlossen werden kann und dann mit dem GAE ein geschlossenes System bildet. Am Ausgang des Druckbehälters befindet sich ein Druckregler, mit dem der am Zylinder der GAE anliegende Druck reguliert wird.

Hydraulik

Im Gegensatz zur Druckluft wird Hydraulikdruck an WZM üblicherweise lokal über maschinenspezifische Hydraulikaggregate zur Verfügung gestellt. Da die Anforderungen an

die Hydraulik je nach eingesetzter Komponente stark variieren, ist diese bedarfsorientierte Lösung die praktikabelste. Benötigt wird Hydraulikdruck meist zum Spannen und/oder Lösen von Klemmungen, zum Beispiel an Rundachsen, Werkstück- oder Werkzeughaltvorrichtungen.

So erfolgt an der Prototypmaschine das Spannen und Lösen der Werkzeuge an der WZ-Spindel mit Hydraulikdruck (s. Abschnitt 5.3.2). Ein Federpaket spannt das Werkzeug mechanisch vor. Damit die Spindel sicher betrieben werden kann, wird zusätzlich 75 bar Hydraulikdruck benötigt, bis der in die Spindel integrierte Sensor eine korrekte Spannposition meldet. Zum Lösen des WZs muss das Federpaket zurückgezogen werden, was ebenfalls mit Hydraulikdruck geschieht.

5.4 Verifikation der Moduleigenschaften

Nach der Konstruktion und der Fertigung der Module wurden diese eingehend messtechnisch untersucht. Ziel war die Verifikation der zur Modellierung der Moduleigenschaften verwendeten Parameter. Im Folgenden werden zunächst die durchgeführten Analysen erläutert, bevor die Ergebnisse der Messungen sowie der Abgleich an den Modulmodellen diskutiert werden.

5.4.1 Durchgeführte Analysen

Die fertig montierten Module wurden mit den am Institut zur Verfügung stehenden Messmitteln hinsichtlich ihrer geometrischen Eigenschaften sowie der Steifigkeitswerte analysiert. Die dabei verwendeten Messmittel und die Messmethodik werden nachfolgend detailliert beschrieben. Die in Kapitel 6 besprochenen Untersuchungen an anderen Maschinenkonfigurationen wurden auf die gleiche Weise durchgeführt.

Geometrische Eigenschaften

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Überprüfung der geometrischen Eigenschaften der Module. Das umfasst die realen Bewegungen der Achsen sowie die Massen der Module.

Die Massen der Module (KLA, LLA) und der vorhandenen Einheiten (VE, GAE) wurden mittels Federwaagen (Messbereich 200 kg \pm 1 kg) ermittelt.

Die geometrischen Messungen der Achsbewegungen wurden an der in Bild 5.12 gezeigten sog. „Inbetriebnahme-Konfiguration“ (IBN-Konfiguration) durchgeführt, jedoch ohne die Werkzeugspindel. Dabei sind die Maschinenachsen unabhängig voneinander auf ei-

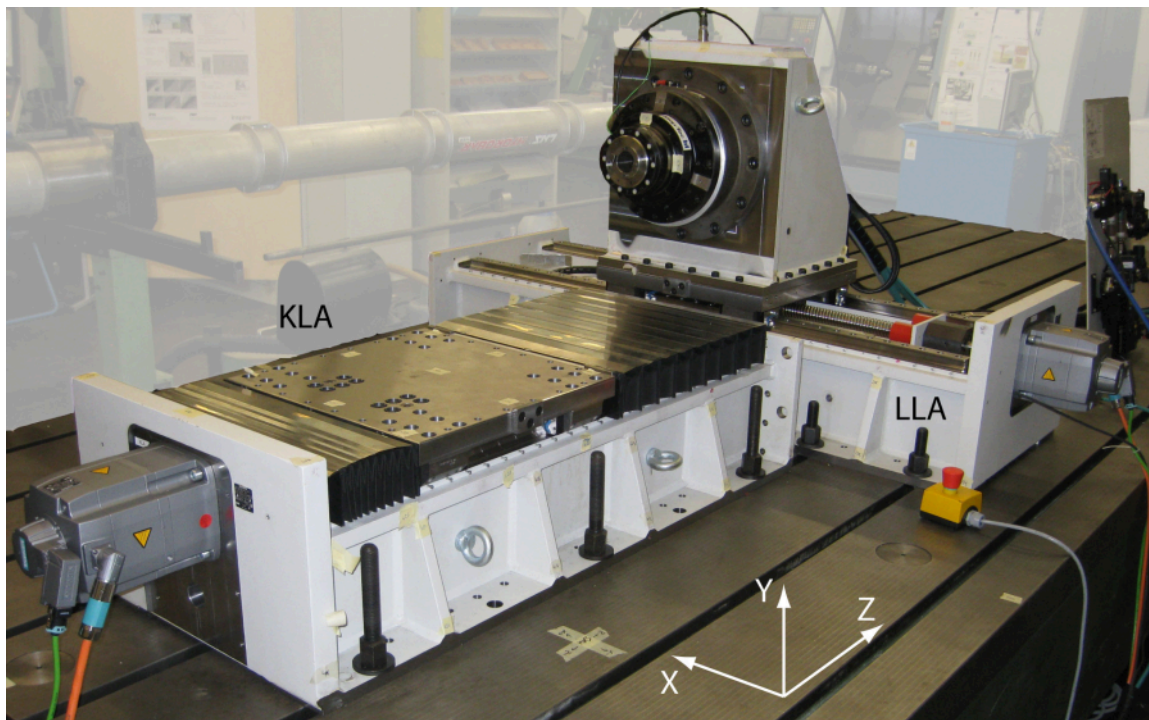


Bild 5.12: In der sogenannten „IBN-Konfiguration“ sind die beiden Linearachsen unabhängig voneinander auf einer grossen Spannplatte montiert. Gemessen werden jeweils die Bewegungen relativ zur Spannplatte, nicht zur anderen Achse.

ner grossen Spannplatte montiert. Gemessen wurden jeweils die Bewegungen relativ zur Spannplatte. Jede Achse – und später auch die verschiedenen Maschinenkonfigurationen – wurde zweimal vermessen, wobei zwischen der Erst- und der Wiederholmessung eine andere Maschinenkonfiguration aufgebaut wurde. Auch innerhalb einer Messreihe wurden stets mindestens zwei Messungen durchgeführt, um die Wiederholbarkeit der Messungen beurteilen zu können. Die Neigungsmessungen Rollen und Nicken an beiden Achsen wurden mit einer elektronischen Wasserwaage Talyvel 3 von Rank Taylor Hobson durchgeführt. Auf dem linken Photo in Bild 5.13 ist beispielhaft die Messung des Rollens ECZ der KLA abgebildet. Die Messunsicherheit des Gerätes beträgt 0.5". Zur Messung wurde jeweils eine elektronische Wasserwaage auf dem Schlitten befestigt und die andere direkt neben dem Modul auf der Spannplatte. Das Messsystem verrechnet die Messwerte intern und gibt direkt die Relativneigung an. Das Anfahren der Messpositionen im Abstand von jeweils 50 mm erfolgte über ein NC-Programm, erfasst wurden die Messwerte manuell.

Für die Geradheits-, Positionier- und Giermessungen mittels Vergleichsmaßstabs (VM) wurde eine Haltevorrichtung aufgebaut, an der der Lesekopf (LK) befestigt wird. Die Messungen wurden mit einem Heidenhain Vergleichsmaßstab VM 182 (Messlänge 520 mm) bzw. VM 102 (Messlänge 1020 mm) durchgeführt, wie sie auf Bild 5.13 rechts zu sehen

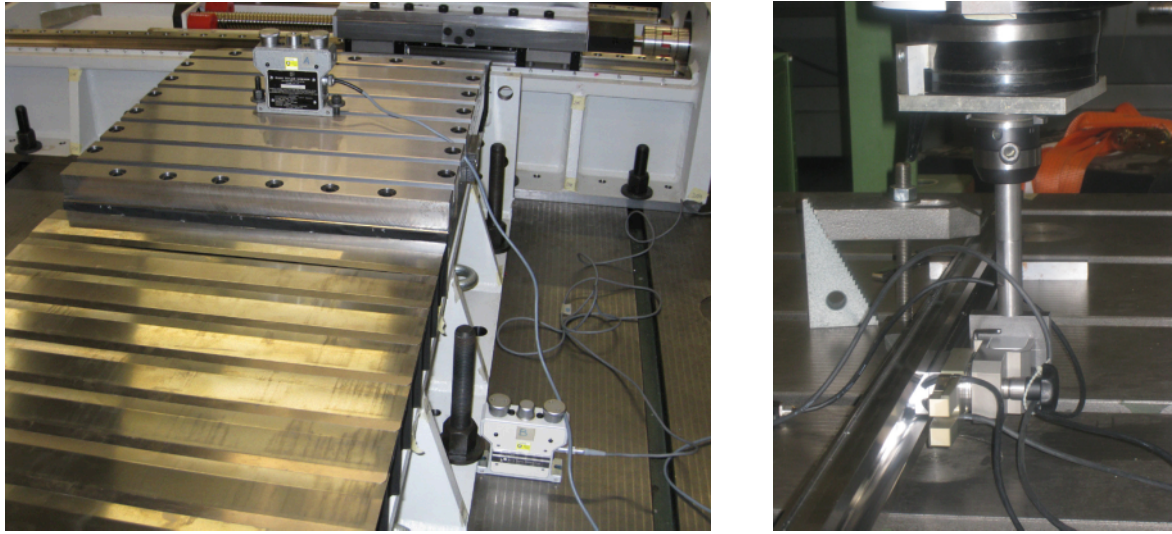


Bild 5.13: Zur geometrischen Prüfung der Maschinenmodule wurden elektronische Wasserwaagen sowie ein Linearmassstab mit optischem Lesekopf verwendet. Das linke Bild zeigt die Neigungsmessung für das Rollen ECZ der KLA. Rechts ist die vertikale Geradheitsmessung an der Fahrständerkonfiguration zu sehen.

sind. Die KLA wurde mit dem kürzeren Massstab vermessen, die LLA mit dem längeren. Die Messunsicherheit U für beide Geräte beträgt $0.6 \mu\text{m}$ in Längsrichtung und $0.9 \mu\text{m}$ in Querrichtung. Der thermische Längenausdehnungskoeffizient α_{therm} beträgt $10 \times 10^{-6} 1/\text{K}$. Anhang F enthält die genaue Spezifikation der verwendeten Messmittel. Aufgezeichnet wurden die Messungen mit einem institutseigenen MATLAB-Messprogramm. Bei den Positioniermessungen wurden gemäss ISO 230-2 bei der KLA acht und bei der LLA zwölf Positionen in fünf Zyklen je einmal aus negativer und positiver Richtung angefahren [43]. Die Messung der Gierbewegung einer Achse erfolgte durch Anfahren derselben Positionen wie bei der Positioniermessung, allerdings nur je einmal von oben und unten, dafür aber auf zwei im Abstand von $d = 275 \text{ mm}$ seitlich versetzten Linien. Aus der Differenz der erfassten Längspositionen kann mit dem Abstand die Verdrehung berechnet werden. Die NC-Programme zur Durchführung der Messungen sind in Anhang G enthalten. Die programmierten Sollpositionen sind Tabelle 5.4 zu entnehmen.

Tabelle 5.4: Sollpositionen zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit und des Gierens.

Messposition	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
KLA	25	73	128	176	229	272	325	375	-	-	-	-
LLA	25	73	128	176	229	272	325	375	423	479	529	575

Die Messunsicherheiten wurden gemäss ISO 230-9 [45] bzw. ISO 230-2 Anhang A [43]

bestimmt. Dazu wurden Herstellerangaben über die Genauigkeit der Messmittel verwendet. Die angegebenen Messunsicherheiten gelten für Messungen in einer Aufspannung mit exakt bekannter Position. Tabelle 5.5 listet die berechneten Messunsicherheiten U mit Erweiterungsfaktor $k = 2$ auf. Die für die Bestimmung zugrundeliegenden Angaben sind in Anhang H enthalten.

Tabelle 5.5: Messunsicherheit U für die durchgeführten Messungen.

KLA	EXZ	EYZ	EZZ	EAZ	EBZ	ECZ
Messunsicherheit	1.7 μm	1.7 μm	1.8 μm	7.1 $\mu\text{m}/\text{m}$	10.8 $\mu\text{m}/\text{m}$	7.1 $\mu\text{m}/\text{m}$
U ($k = 2$)				= 1.4"	= 2.2"	= 1.4"
LLA	EXX	EYX	EZX	EAX	EBX	ECX
Messunsicherheit	2.4 μm	1.7 μm	1.7 μm	7.1 $\mu\text{m}/\text{m}$	13.6 $\mu\text{m}/\text{m}$	7.1 $\mu\text{m}/\text{m}$
U ($k = 2$)				= 1.4"	= 2.7"	= 1.4"

Steifigkeitswerte

Die Steifigkeitswerte der Maschinenmodule wurden mittels experimenteller Modalanalyse bestimmt. Zum Messequipment gehören ein Impulshammer, acht 3D-Beschleunigungssensoren sowie Ladungsverstärker für 25 Kanäle. Ziel der Messungen war die Bestimmung der Steifigkeitswerte an den Koppelstellen sowie zwischen den modellierten Balkensegmenten. Die Anregung erfolgte mittels Impulshammer in allen drei kartesischen Richtungen.

In einem ersten Schritt wurde die Aufspannplatte allein, d.h. ohne jegliche Aufbauten, an 25 Messpunkten untersucht. Auf diese Weise wurden die Steifigkeit der Aufstellung sowie die Biege- und Torsionssteifigkeit des Betts bestimmt. In einem zweiten Schritt wurde dann die IBN-Konfiguration montiert, mit der nun die Module analysiert wurden. Bei den Modulen standen vor allem die Steifigkeiten der Führungen im Zentrum der Untersuchungen.

5.4.2 Auswertung und Abgleich der Modulmodelle

Die durchgeführten Messungen dienen dem Abgleich der zuvor im ABK rechnerisch erstellten Modulmodelle mit den physischen Modulen. Dazu müssen die zur Modellierung der Moduleigenschaften verwendeten Parameter verifiziert werden. Im Folgenden wird die Auswertung der verschiedenen Messungen besprochen. Der Vergleich mit den modellierten Werten sowie ggf. danach vorgenommene Anpassungen werden ebenfalls dargelegt.

Massen

Die Messwerte der Wägung sind in Tabelle 5.6 aufgeführt. Die für die Modellierung verwendeten Werte wurden aus den CAD-Modellen bestimmt und sind ebenfalls angegeben. Der Vergleich der jeweils zusammengehörenden Werte zeigt, dass sich die Differenzen im niedrigen einstelligen Prozentbereich bewegen. Die Massenwerte aus dem CAD liegen – ausser für die GAE – generell unter den gemessenen Werten. Ein Grund ist das Fehlen der Schweissnähte und damit des Materials in den CAD-Modellen² sowie vieler Schrauben, da nur einige wenige Schrauben am Schlitten ins Modell eingefügt wurden. Weiterhin wurden Kleinteile wie Anschlagpuffer oder andere Kunststoffteile bei der Massenberechnung im CAD nicht berücksichtigt. Auf die Anpassung der Massenwerte in den Modellen wurde wegen der geringen Auswirkung verzichtet.

Tabelle 5.6: Vergleich der Massen von Modulen und Erweiterungseinheiten gemäss Angaben aus dem CAD-Programm und Messungen in der Realität.

Wert	Einheit	Linearachse		Spindel- modul	Gewichts- ausgleichs- einheit	Steifigkeitseinheit		
		kurz (KLA)	lang (LLA)			vertikal KLA	horizontal KLA	LLA
CAD	[kg]	489.3	586.6	310.3	71.3	157.5	126.5	142.4
Messung	[kg]	501	593	315	70	162	132	148
Differenz								
absolut	[kg]	11.7	6.4	4.7	-1.3	4.5	5.5	5.6
relativ	[%]	2.3	1.1	1.5	-1.8	2.8	4.2	3.8

Geometrische Prüfungen

Die geometrischen Prüfungen wurden gemäss den Vorgaben in [42, 43, 44] durchgeführt und ausgewertet. Wie schon die Erfassung der Messdaten erfolgte auch ihre Auswertung über institutseigene MATLAB-Programme. Alle mit dem Vergleichsmasstab aufgezeichneten Messdaten wurden ausgerichtet, indem eine Ausgleichsgerade nach Gauss (kleinste Abstandsquadrate) berechnet wurde, welche mit der Abszisse den Winkel einschliesst, um den die Messwerte gedreht werden. Bild 5.14 zeigt die ursprüngliche und die ausgerichtete Messkurve sowie die zugehörige Ausgleichsgerade. Bei den ausgerichteten Messwerten wird zudem unterschieden, ob die Aufzeichnung von der Fahrt in positiver (\uparrow) oder in negativer (\downarrow) Richtung stammt. Alle Messkurven wurden auf ihren Mittelwert genullt, d.h. vertikal so verschoben, dass der Mittelwert der Messdaten gleich Null ist.

²ausser bei der hSE KLA

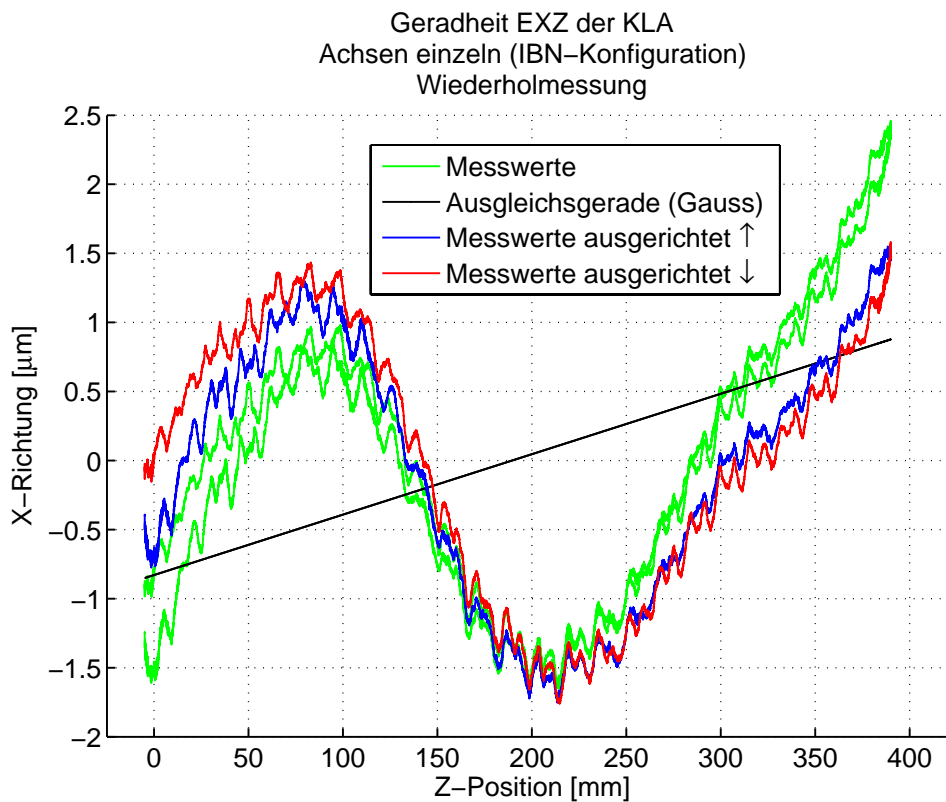


Bild 5.14: Ausrichtung der Messkurven mittels Ausgleichsgerade nach Gauss. Die Messwerte werden um den Winkel zwischen Ausgleichsgerade und Abszisse gedreht. Die Messwerte für die Fahrt in positiver (\uparrow) und in negativer (\downarrow) Richtung werden unterschieden.

Im Folgenden werden ausgewählte Messungen anhand der graphischen Auswertung detailliert besprochen. Die Auswertegraphiken aller Messungen der Komponentenabweichungen finden sich in Anhang I.

Geradheit Allen Geradheitsmessungen gemein ist, dass die Wiederholgenauigkeit zwischen der Erst- und der Wiederholmessung innerhalb weniger μm (KLA: $1 \mu\text{m}$; LLA: $3 \mu\text{m}$) liegt. Die horizontale und vertikale Geradheit der KLA beträgt ca. $4 \mu\text{m}$ bzw. $3 \mu\text{m}$. Bei der LLA liegen diese Werte bei ca. $8 \mu\text{m}$ bzw. $7 \mu\text{m}$, was in allen Fällen etwa der Hälfte der Toleranz für Bearbeitungszentren nach ISO 10791-1 [42] entspricht. Bild 5.15 zeigt die Messung der horizontalen Geradheit EZX der LLA. Die Ausrichtung der Führungsschienen verursacht die horizontalen Abweichungen von der idealen Gerade. Auch Rollen wäre als Ursache denkbar, fällt aufgrund des geringen Versatzes zwischen dem KGT und der Auflage des VMs hier jedoch kaum ins Gewicht. Über Geradheitsmessungen in unterschiedlicher z-Positionen wäre dies zu verifizieren.

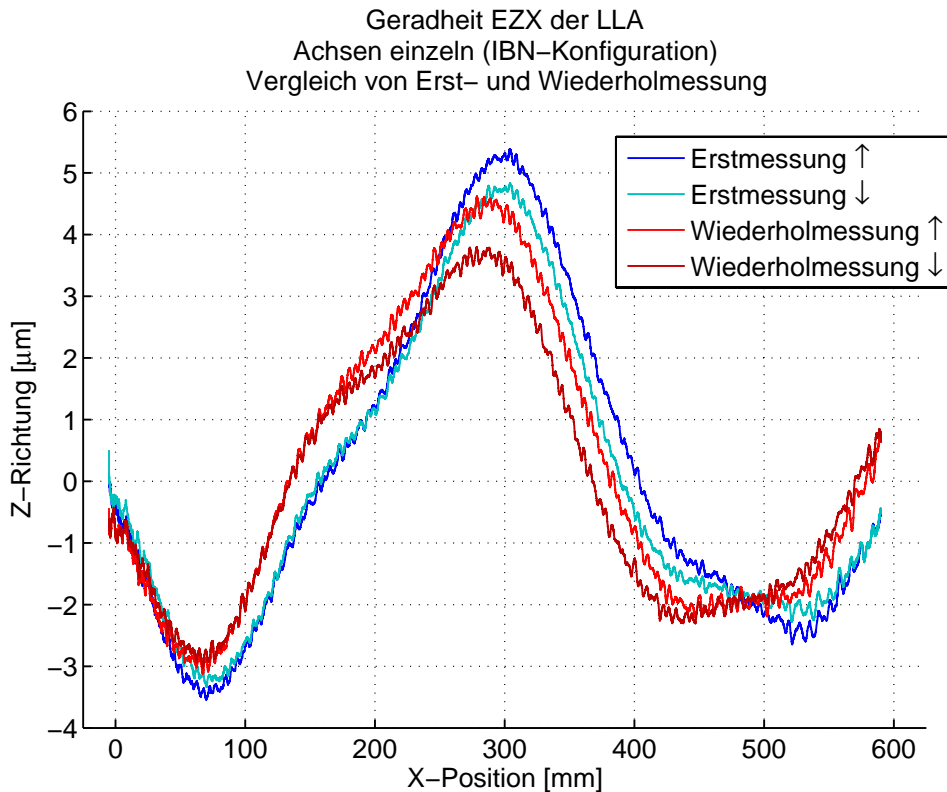


Bild 5.15: Auswertung der horizontalen Geradheit EZX der LLA. Der Unterschied zwischen Erst- und Wiederholmessung liegt innerhalb der Messunsicherheit. Die Spanne von ca. 8 μm entspricht knapp mehr als der Hälfte der Toleranz.

Da die kurzwelligen Amplituden der Signalaufzeichnungen bei einigen Erst- (EM) und Wiederholmessungen (WhM) stark variierten, war zur Identifizierung des Grundes eine Zusatzmessung erforderlich. Bei den fraglichen EMn wurde der Lesekopf des Kreuzgitters (KG) mit dem Vergleichsmaßstab (VM) verwendet, bei den WhMn der zum VM gehörige Lesekopf. Der Grund für die unterschiedlichen Signale wurde deshalb in der Verwendung verschiedener Leseköpfe vermutet. Als Zusatzmessung wurde die horizontale Geradheit der KLA und der LLA mit dem VM gemessen, und zwar je einmal mit dem Lesekopf des KGs und dem Lesekopf des VMs. Die Halterung des KG-Lesekopfs ist kleiner und leichter und wird direkt am Messaufbau verschraubt. Der VM-Lesekopf besitzt eine Magnethalterung zur Befestigung an einer metallischen Fläche sowie einen Führungskörper zum Einschieben in eine Ausrichtehilfe, wodurch er schwerer ist. Wie aus Bild 5.16 ersichtlich ist, tritt das Amplitudenverhältnis bei der Zusatzmessung in gleicher Form wieder auf (vgl. Anhang I, Messung EXZ), wobei die grosse Masse des Messkopfs offenbar dämpfend wirkt. Eine Schwingung kann als Ursache ausgeschlossen werden, da in diesem Fall keine Ortsabhängigkeit gegeben wäre. Allenfalls käme eine erzwungene Schwingung in Frage.

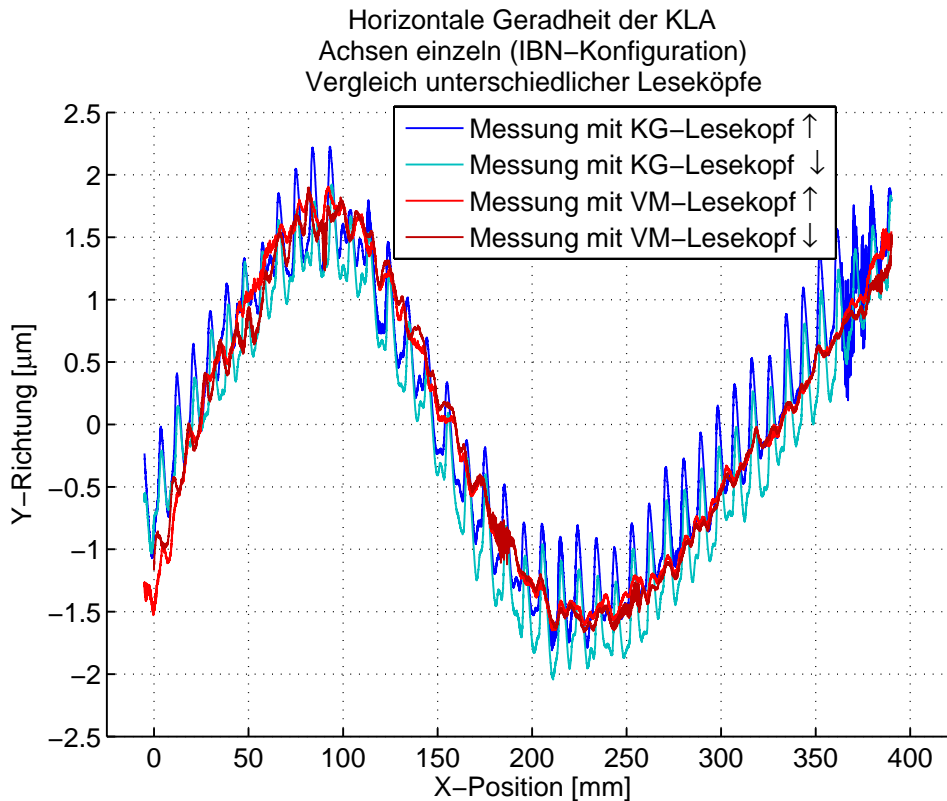


Bild 5.16: Zusatzmessung der horizontalen Geradheit EXZ an der KLA zur Identifizierung der Ursache unterschiedlicher Amplituden der Signalaufzeichnung bei manchen Erst- und Wiederholmessungen. Die Signalaufzeichnungen mit dem KG-Lesekopf weisen hochfrequente Schwingungen auf, die beim VM-Lesekopf nicht erkennbar sind.

Positionierung Die Erst- und Wiederholmessungen der Positioniergenauigkeit liefern – wie schon die Geradheitsmessungen – sehr ähnliche Ergebnisse. Bild 5.17 zeigt jeweils die Wiederholmessung an der KLA (links) und der LLA (rechts). Die roten Punkte sind die Messwerte bei Fahrt in positiver (\uparrow), die grünen bei Fahrt in negativer Richtung (\downarrow). Die durchgezogene Linie verbindet jeweils die Mittelwerte (aufwärts, abwärts, total), die gestrichelte Linie zeigt die Streuung $\pm 2\sigma$ um die jeweiligen Mittelwerte herum an. Auf die Messwerte der KLA wurde rechnerisch eine übliche lineare Kompensation für den Spindelsteigungsfehler angewandt. Die Beurteilung der Positioniergenauigkeit erfolgt über vier Kenngrößen [43]: Die bidirektionale Positioniergenauigkeit einer Achse A (rot und grün gestrichelt), die stets etwas kleinere bidirektionale systematische Positionsabweichung einer Achse E (rote und grüne Punkte), die mittlere bidirektionale Positionsabweichung einer Achse M (blaue Punkte) sowie die bidirektionale Wiederholpräzision der Positionierung einer Achse R .

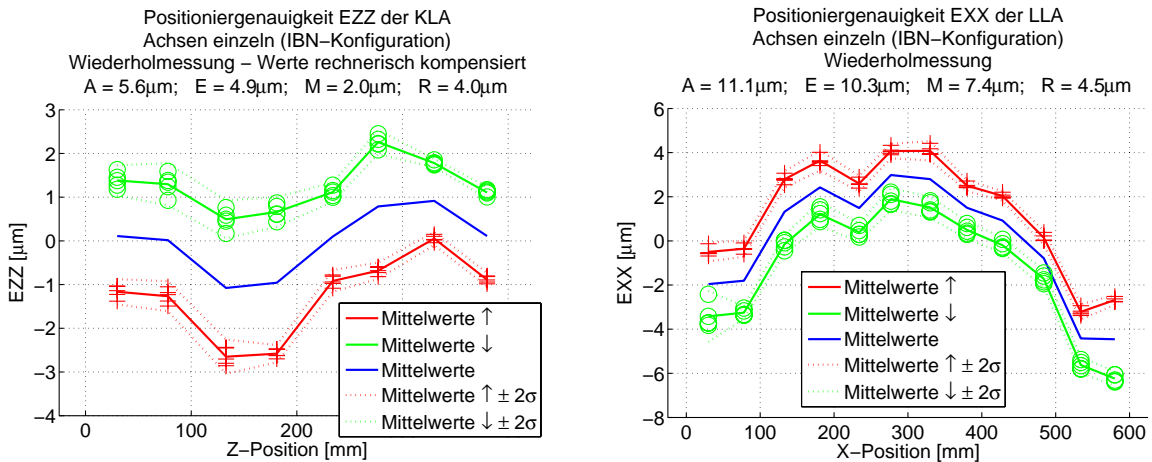


Bild 5.17: Messung der Positioniergenauigkeit EZZ der KLA (links, Werte rechnerisch kompensiert) und EXX der LLA (rechts, direktes Messsystem).

KLA: $A = 5.6\ \mu\text{m}$; $E = 4.9\ \mu\text{m}$; $M = 2.0\ \mu\text{m}$; $R = 4.0\ \mu\text{m}$

LLA: $A = 11.1\ \mu\text{m}$; $E = 10.3\ \mu\text{m}$; $M = 7.4\ \mu\text{m}$; $R = 4.5\ \mu\text{m}$

Die KLA besitzt kein direktes Wegmesssystem, so dass in den Rohmessdaten eine konstant ansteigende Positionierabweichung erkennbar ist, welche auf einen systematischen Spindelsteigungsfehler hindeutet. Eine solche Abweichung lässt sich jedoch relativ einfach über die Steuerung kompensieren. Die dazu erforderlichen Werte können direkt als Maschinendatum im Modulmodell gespeichert werden.

Im Gegensatz zur KLA verfügt die LLA über ein direktes Wegmesssystem, wodurch sich der Positionierfehler deutlich reduziert. Eine lineare Kompensation durch die Steuerung ist in diesem Fall nicht zielführend, eine nicht-lineare Kompensation hingegen könnte angewendet werden. Auffällig ist, dass die Werte der Messung „aufwärts“ über denen der Messung „abwärts“ liegen statt wie üblicherweise, und auch bei der KLA, umgekehrt. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Achse im Umkehrpunkt verkippt, so dass der Schlitten dort eine zusätzliche Verschiebung in Bewegungsrichtung erfährt.

Rollen und Nicken Unterschiede zwischen Erst- und Wiederholmessungen lassen sich beim Rollen und Nicken feststellen. Die Form der Messkurven ist bei den verschiedenen Messungen jeweils sehr gut reproduzierbar. Insbesondere beim Rollen aber variiert die Spanne und teilweise auch die Richtung der Neigungsänderung. Eine mögliche Ursache für die Variation der Spanne sind Temperaturschwankungen zwischen den Messungen. Die Richtungsunterschiede können von der aktuellen Lage auf der Aufspannplatte her rühren.

In Bild 5.18 sind die Neigungsmessungen EAX an der LLA dargestellt. Bei der Erstmessung dreht sich der Schlitten der X-Achse mit zunehmender X-Position in negativer

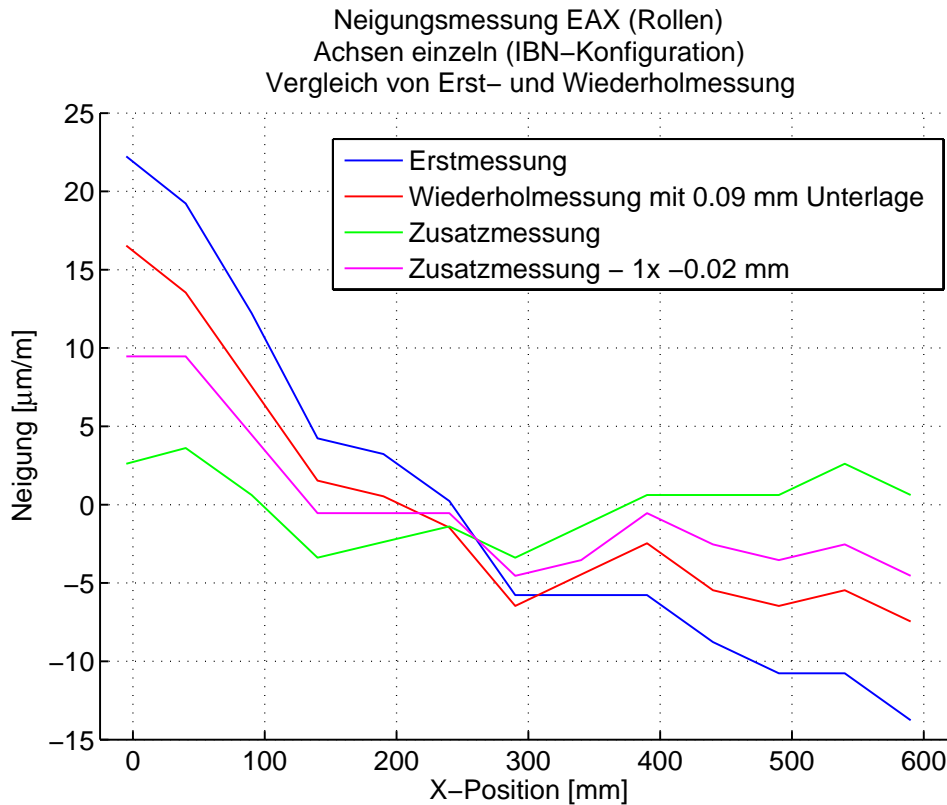


Bild 5.18: Auswertung der Neigungsmessung EAX mit der elektronischen Wasserwaage am Schlitten der LLA. Das Rollen der Achse variiert merklich zwischen den Messungen, was auf den Einfluss der tatsächlichen Lage auf der Spannplatte zurückgeführt wird.

Richtung um die Längsachse. Bei der Wiederholungsmessung wurde versucht, diese Bewegung durch Unterlegen einer Metallfolie gezielt zu beeinflussen. Die Tendenz der Auswirkung entsprach den Erwartungen, in absoluten Werten wurde jedoch nur etwa der Hälfte der erwarteten Auswirkung erzielt. Deshalb wurden Zusatzmessungen durchgeführt, bei denen das Modul einmal auf vier gemeinsam geschliffenen Metallklötzen mit identischer Dicke auflag und einmal einer der Klötze durch einen um 0.02 mm niedrigeren Klotz ersetzt wurde. Jedoch lieferten auch diese Messungen keine kohärenten Ergebnisse. Da die Module nach dem Anheben und Absetzen nie zweimal exakt auf derselben Stelle liegen, wird auf einen erheblichen Einfluss der Aufspannplatte geschlossen. Bei einer messtechnischen Untersuchung der Aufspannplatte wurde festgestellt, dass deren Oberfläche tatsächlich nicht eben, sondern deutlich verworfen ist. Klar erkennbar ist dieser Einfluss bei den ECZ-Messungen an der KLA, wo die Achse bei der Erstmessung um eine Nutenreihe versetzt zu den anderen Messungen auflag, was eine Umkehrung der Drehrichtung zur Folge hatte (vgl. Anhang I).

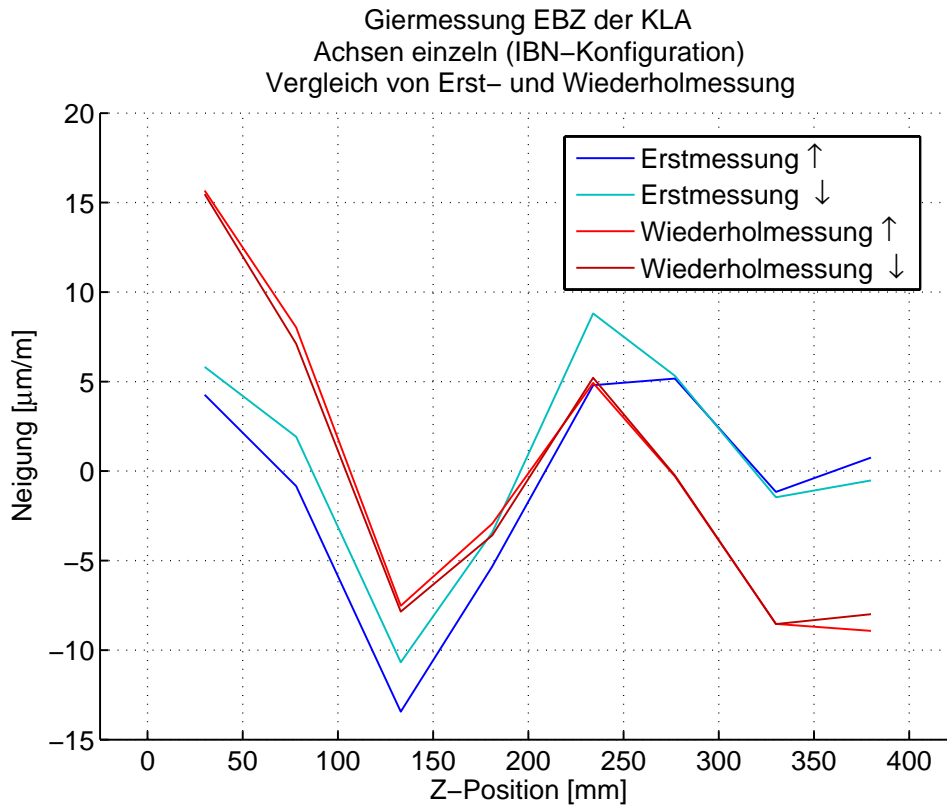


Bild 5.19: Auswertung der Giermessung EBZ der KLA. Beim Verfahren vom unteren zum oberen Ende des Fahrweges dreht sich der Schlitten abschnittsweise in entgegengesetzten Richtungen um die Hochachse.

Gieren Auch die Auswertung der Giermessungen zeigt bei beiden Achsen relativ gut wiederholbare Ergebnisse, jeweils mit einer Schwankungsbreite von ca. $10 \mu\text{m}/\text{m}$ zwischen Erst- und Wiederholmessung. Die Giermessung macht die Rotation des Schlittens um die Hochachse deutlich. Bild 5.19 zeigt die Auswertung der Messung an der KLA. Beim Verfahren vom unteren zum oberen Ende des Fahrbereichs dreht der Schlitten von seiner Ausgangslage zunächst in negativer Richtung um die Y-Achse. Nach etwa 150 mm wechselt die Drehrichtung, und der Schlitten nähert sich wieder der Ausgangslage. Bei ca. 250 mm kehrt die Drehrichtung erneut ins negative.

Zusammenfassung der Messergebnisse Die ermittelten Werte der geometrischen Prüfungen sind in Tabelle 5.7 aufgelistet, zusammen mit den aus Erst- und Wiederholmessung berechneten Mittelwerten sowie den nach [42] anzuwendenden Toleranzen. Die Messungen zeigen, dass die Geradheit und die Positioniergenauigkeit der Module unter mehrmaligen Handlingoperationen beim Rekonfigurieren nicht leiden. Rollen und Nicken hingegen hängen von der Aufstellung ab, so dass die Werte auf der zur Verfügung ste-

henden Unterlage nicht ohne Weiteres reproduziert oder vorhergesagt werden können. Dennoch zeigen die Messungen, dass die Herstellung von kompakten Achsmodulen für rekonfigurierbare WZMn möglich ist. Bereits mit einfachen Werkstattmitteln wurden Genauigkeiten erreicht, welche die für Werkzeugmaschinen üblichen Toleranzen einhalten.

Experimentelle Modalanalyse – Steifigkeiten

Die Messdaten der experimentellen Modalanalyse (EMA) wurden mit dem Programm *MEScope* ausgewertet. Die Aufzeichnungen der Beschleunigungssensoren werden darin derart verarbeitet, dass die Bewegungsinformation frequenzabhängig abrufbar ist. Aus den Übertragungsfunktionen können somit die Eigenfrequenzen abgelesen werden [141].

Zur Visualisierung der Eigenmoden kann ein Drahtgittermodell erstellt werden, dessen Knoten die Messorte bilden. Deren Lage im Raum wurde bei der Messung erfasst respektive nachträglich aus dem CAD-Modell ermittelt. Mit den Bewegungsinformationen zu jedem Sensor und folglich Knoten, kann zu jeder Frequenz der Mode Shape als Animation dargestellt werden. Diese animierten Mode Shapes dienen zum Abgleich der Steifigkeitsparameter mit den Modulmodellen. Beim Abgleich werden die Eigenfrequenzen und -formen des Modells über Parametervariation mit denen der Messergebnisse aus der EMA möglichst in Übereinstimmung gebracht. Direkt berechnen lassen sich Steifigkeitswerte aus der Frequenz isolierter Starrkörpermoden, wenn die Masse des schwingenden Körpers bekannt ist. Für die Aufstellung der Aufspannplatte wurde dieses Vorgehen gewählt, während die Steifigkeitswerte zwischen den Plattensegmenten (vgl. Bild 4.15 und Abschnitt 5.3.1) durch iterative Variation ermittelt wurden. Das Ergebnis der Parameteranpassung ist den Messwerten in Tabelle 5.8 gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, dass die in der Messung identifizierten Eigenfrequenzen bis ca. 200 Hz in der Berechnung nur geringfügig abweichen. Bei der Berechnung im ABK werden auch Eigenfrequenzen ausgegeben, die in der Messung nicht deutlich wahrzunehmen sind. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn ihre Amplituden zu klein sind und die Bewegung deshalb im Rauschen untergeht oder von einer anderen Schwingung überlagert wird. Letzteres ist bei den ABK-Moden 1, 2 und 3 sehr wahrscheinlich.

Es zeigt sich, dass die geometrischen Genauigkeitseigenschaften durch die Rekonfigurierung nicht übermäßig beeinträchtigt werden. Dem Maschinengrundkörper in Form der Aufspannplatte kommt eine hohe Bedeutung zu. Der zentrale Abgleich der physikalischen Eigenschaften via EMA zeigt sehr gute Übereinstimmung.

Tabelle 5.7: Messwerte der geometrischen Prüfung an der IBN-Konfiguration.

KLA	EXZ	EYZ	EZZ	EAZ	EBZ	ECZ
Erst- messung	4.2 μm	3.0 μm	A = 6.2 μm E = 5.1 μm M = 2.2 μm R = 4.3 μm	27 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 5.6"	22.2 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 4.6"	48.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 9.9"
Wiederhol- messung	3.3 μm	3.3 μm	A = 5.6 μm E = 4.9 μm M = 2.0 μm R = 4.0 μm	8.3 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 1.7"	24.6 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 5.1"	14.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 2.9"
Mittel- wert	3.8 μm	3.2 μm	A = 5.9 μm E = 5.0 μm M = 2.1 μm R = 4.1 μm	17.7 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 3.6"	23.4 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 4.8"	31.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 6.4"
Toleranz ³	10 μm	10 μm	A = 22 μm	60 μrad = 12"	60 μrad = 12"	60 μrad = 12"
LLA	EXX	EYX	EZX	EAX	EBX	ECX
Erst- messung	A = 11.6 μm E = 9.5 μm M = 6.5 μm R = 5.2 μm	6.2 μm	8.9 μm	35.5 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 7.3"	27.9 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 5.7"	56.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 11.6"
Wiederhol- messung	A = 11.1 μm E = 10.3 μm M = 7.4 μm R = 4.5 μm	8.4 μm	7.7 μm	24.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 5.0"	39.2 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 8.1"	52.7 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 10.9"
Mittel- wert	A = 11.3 μm E = 9.9 μm M = 7.0 μm R = 4.8 μm	7.3 μm	8.3 μm	29.8 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 6.1"	33.5 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 6.9"	54.3 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 11.2"
Toleranz ⁴	A = 25 μm	15 μm	15 μm	60 μrad = 12"	60 μrad = 12"	60 μrad = 12"

³ Toleranzangaben nach ISO 10791-1 bzw. 10791-4 (Positionierung) für Achslänge $Y \leq 500$ ⁴ Toleranzangaben nach ISO 10791-1 bzw. 10791-4 (Positionierung) für Achslänge $500 < Y \leq 800$

Tabelle 5.8: Vergleich der Eigenfrequenzen der Aufspannplatte gemäss Messung mit experimenteller Modalanalyse und Berechnung im ABK

Modalanalyse (MA)		Unterschied in % bezogen auf MA	Berechnung im ABK		Mode Typ
Mode Nr.	Frequenz [Hz]		Mode Nr.	Frequenz [Hz]	
	konnte nicht identifiziert werden		1	4.91	X-Translation
1	5.12	-0.5	2	5.09	Z-Translation
	konnte nicht identifiziert werden		3	5.77	B-Rotation
2	11.2	0	4	11.2	Y-Translation
	konnte nicht identifiziert werden		5	11.2	C-Rotation
3	13.2	-3.3	6	12.8	A-Rotation
4	30	0.7	7	30.2	1. C-Torsion
5	90	-1.7	8	88.5	1. A-Biegung
6	94	7.4	9	101	2. C-Torsion
7	199	2.0	11	203	3. C-Torsion
8	203	-4.0	10	195	2. A-Biegung

5.5 Konstruktionsrichtlinien

Abschliessend lassen sich mehrere Richtlinien für die Konstruktion von Maschinenmodulen für rekonfigurierbare WZMn ableiten. Diese basieren auf allgemeinen Konstruktionsgrundsätzen sowie empirischen Erkenntnissen, die während der Entwicklung der Module und der anschliessenden Tests gewonnen wurden.

Da im Allgemeinen keine konkrete Bearbeitungsaufgabe hinter der Modulentwicklung steht, muss – wie bei der Entwicklung von Universal-Bearbeitungszentren – ein Anwendungsbereich definiert werden, aus dem sich die Spezifikationen ableiten lassen. Als praktikabel hat sich die Vorgabe eines Referenzteils zur Bearbeitung in einer Referenzkonfiguration erwiesen. Die dabei auftretenden Kräfte sind massgeblich für die Dimensionierung. Die Berücksichtigung mehrerer Konfigurationsvarianten ist dabei essentiell, um verschiedene Möglichkeiten der Achsschichtung abzudecken, wodurch auch die Anzahl und Art der vorzusehenden Modulschnittstellen festgelegt wird.

Oberster Grundsatz für die Konstruktionsausführung ist die konsequente Ausrichtung auf Modularisierung und Standardisierung. Die nachfolgende, nicht abschliessende Auflistung enthält die wichtigsten Punkte und erläutert diese kurz.

- Hohe Steifigkeit: Eigensteife Konstruktionen sind anzustreben. Wo möglich, sind geschlossene Profile zu verwenden und Versteifungen vorzusehen. Erkenntnisse aus dem Leichtbau sollten berücksichtigt werden.

- **Kompakte Bauweise:** Die Module sollen so kompakt gebaut sein, dass sie mit werkstattüblichen Handhabungsgeräten problemlos transportiert und positioniert werden können. Gegebenenfalls sind Kompromisse hinsichtlich der Zugänglichkeit bei der Erstmontage des Moduls zu machen. Der Einsatz höherfester Werkstoffe anstelle von Standard-Baustahl kann vorteilhaft sein, wenn dadurch Material- und somit Gewichtseinsparungen möglich werden.
- **Zugänglichkeit der Schnittstellen:** Für einen reibungslosen praktischen Rekonfigurierungsablauf müssen die Schnittstellen klar erkennbar und gut zugänglich sein. Insbesondere bei Schraubverbindungen ist darauf zu achten, dass ausreichend Platz für die Verwendung eines Akkuschraubers und Drehmomentschlüssels vorhanden ist. Betroffen sind alle Verbindungen, die bei einer Rekonfigurierung potentiell hergestellt bzw. gelöst werden (Module, Erweiterungseinheiten). Die Prinzipien der DFMA-Methodik (Design for Manufacture and Assembly) sollten für die Schnittstellen besonders beherzigt werden [15].
- **Einfaches Modulhandling:** Bereits bei der Konstruktion muss die Handhabung bedacht werden. Ausreichend vorhandene und sinnvoll angebrachte Haltegriffe, Gewindebohrungen für Transportösen und Ausrichtehilfen zur Montage sind vorzusehen.
- **Wenig Trennfugen:** Strukturteile sollten möglichst aus einem einzigen Teil bestehen. Unterlegscheiben und Federringe sind zu vermeiden, da mitverspannte Elemente zusätzliche Trennfugen mit sich bringen. Verringerte Steifigkeit und erhöhte Anfälligkeit für Spaltkorrosion gehen mit jeder zusätzlichen Trennfuge einher.
- **Robuste und vielseitige Modulschnittstelle:** Eine kostengünstige, platzsparende und praktikable Modulschnittstelle ist über Schraubverbindungen realisierbar. Symmetrische Formen sind vorzuziehen, um vielseitige Verwendung zu ermöglichen. Die vorgeschlagene Modulschnittstelle stellt mit ihrer Auflagefläche eine kinematisch zwar unsaubere, aber beherrschte Lösung zur Fixierung der Schnittstellenebene dar; Kinematisch saubere und beherrschte Lösungen können nach [122] entwickelt werden. Die quadratische Form der Modulschnittstelle erlaubt die Anbindung in vier verschiedenen Orientierungen bei kinematisch definierter Ausrichtung über drei Anschläge zur Sperrung der verbleibenden zwei translatorischen und des einen rotatorischen Freiheitsgrades. Der Verzug an den Modulkörpern ist beim Anziehen der Schrauben in korrekter Reihenfolge und gleichmässiger Vorspannung auf ein Minimum reduziert.
- **Symmetrien und Teilungen nutzen:** Symmetrische Konstruktionen weisen in vielerlei Hinsicht Vorteile auf. Beispielsweise ist ihre Schwerpunktlage mittig, was zu gleichmässiger Belastung führt, sie sind in unterschiedlicher Orientierung verwendbar und sowohl die Modellierung wie auch die Fertigung sind weniger fehleranfällig.

Geschickt gewählte Teilabstände für Bohrungen und Anschläge erlauben Befestigungen in abgestuften Positionen. Es sollten konsequent ganzzahlige Vielfache eines Grundabstands verwendet werden. Die Wahl des Grundabstands orientiert sich an den Gegebenheiten zur Anbindung an die Umgebung (Nutenabstände, Maschinenbett, bereits vorhandene Module). Zur Realisierung unterschiedlicher Grössen bietet sich die im Maschinenbau häufig verwendete Normzahlenreihe R10 aus DIN 323-1 [27] an.

- Standardisierung und Verwendung von Normteilen: Aus Kostengründen sowie wegen der besseren Verfügbarkeit sollten nach Möglichkeit Normteile statt Spezialanfertigungen eingesetzt werden. Insbesondere bei Schrauben sollte darauf geachtet werden, dass möglichst wenige, gleichartige Schraubentypen (Gewinde, Durchmesser, Länge, Festigkeit, Kopf) zum Einsatz kommen. Im Idealfall benötigt der Maschinenanwender bei der Rekonfigurierung nur Schrauben eines einzigen Typs. Anzahl, Anordnung und Durchmesser der Schrauben sollten so gewählt werden, dass sich die Druckkegel überschneiden und die Flansche somit flächig zusammengepresst werden. In der Praxis werden sich daher die Gewinde hauptsächlich zwischen M8 und M16 bewegen, was auch der Montierbarkeit zugute kommt, da das Anzugsmoment mit dem Gewindedurchmesser in der dritten Potenz ansteigt.

Bei der Modellierung der Module mittels CAD ist eine Methodik sinnvoll, die ein effizientes Zusammenspiel mit der FE-Berechnung erlaubt. In einer Studie wurde ein Vorgehen entwickelt und angewandt, das mit geringem Mehraufwand bei der Modellerstellung zu grossen Zeiteinsparungen bei der Aufbereitung des Rechenmodells führt. Dazu wird von den Körpern, die normalerweise für die FE-Berechnung vereinfacht werden müssten, noch vor Anwendung von Konstruktionsfeatures eine Kopie erstellt. Der so entstandene Körper ohne Fasen, Bohrungen etc. wird in einer FE-gerechten Modellansicht dargestellt, während der detaillierte Körper in der normalen Konstruktionsansicht verwendet wird. Der Modellexport für FE-Berechnungen erfolgt direkt aus der FE-gerechten Ansicht, wodurch ein grosser Teil der Modellbereinigung im FE-Programm entfällt.

6 Rekonfigurierung einer Maschine

Mit den in Kapitel 5 beschriebenen Maschinenmodulen kann der komplette Ablauf einer Rekonfigurierung ausgeführt werden. Die dabei entstehenden Maschinenkonfigurationen lassen sich im Detail untersuchen und zudem als Prüfstand für steuerungstechnische Optimierungsansätze nutzen.

Im Folgenden wird zunächst das Vorgehen beim Ableiten der Steuerungskonfiguration erläutert. Im Anschluss wird der Umbau einer Maschine beschrieben, wobei der mechanische Zusammenbau und die Konfigurierung der Steuerung separat behandelt werden. Zur Verifikation der Rekonfigurierungsmethodik wurden Tests und Messungen an zwei unterschiedlichen Maschinenkonfigurationen durchgeführt, deren Ergebnisse abschliessend besprochen werden.

6.1 Ableiten der Steuerungskonfiguration

Ein zentraler Punkt für den Einsatz rekonfigurierbarer WZMn ist die Ableitung der Steuerungskonfiguration. Das in Bild 6.1 dargestellte Vorgehen basiert auf der Verwendung einer Modul-Bibliothek, die die in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Modulmodelle enthält. Aus diesen wird im ABK ein mechatronisches Maschinenmodell der gewünschten Maschinenkonfiguration erstellt. Deren Evaluierung erfolgt anhand eines abgeleiteten Strukturmodells. Dabei können mehrere Schleifen mit unterschiedlichen Maschinenkonfigurationen durchlaufen werden. Nach dem Entscheid für eine Maschinenkonfiguration wird mit den Informationen des mechatronischen Maschinenmodells die NC- und die PLC-Konfiguration generiert und auf die Steuerung übertragen. Ausgehend vom mechatronischen Maschinenmodell ist die automatisierte Erstellung und Verwendung weiterer Modelle, beispielsweise zur Kompensation systematischer mechanischer Fehler oder strukturbedingter Unzulänglichkeiten, denkbar.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Werkzeuge, die zum Ableiten der Steuerungskonfiguration verwendet werden, sowie das detaillierte Vorgehen. Dabei wird konkret auf die an der Prototypmaschine verwendete Steuerung Sinumerik 840D sl von *Siemens* eingegangen, deren Auswahl in Abschnitt 5.3.3 behandelt worden war.

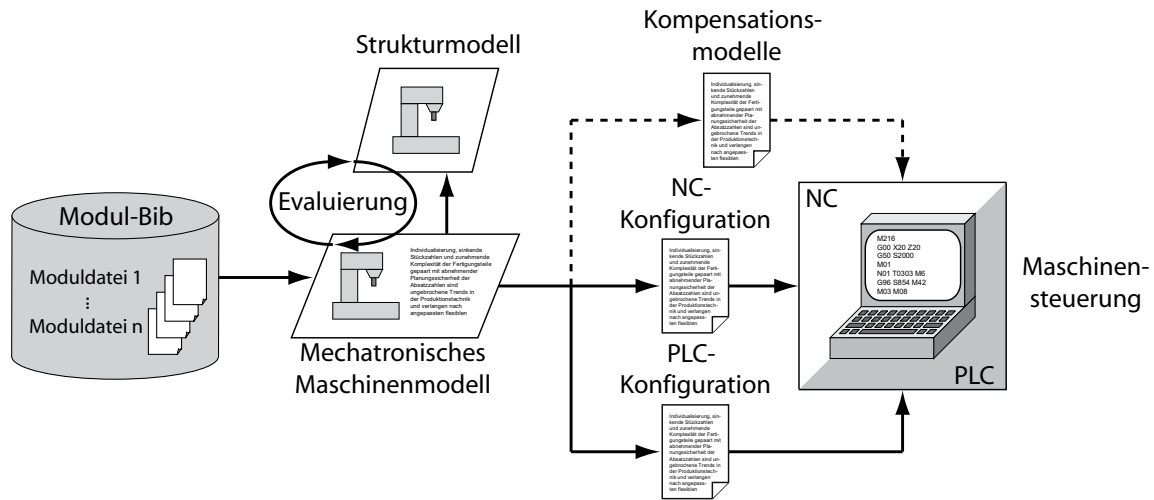


Bild 6.1: Vorgehen zur Ableitung der Steuerungskonfiguration basierend auf einer Modul-Bibliothek zur Erstellung mechatronischer Maschinenmodelle.

6.1.1 Werkzeuge

Zur Erstellung der Steuerungskonfiguration wird herstellerspezifische Software benutzt. Das PLC-Programm wird in der Programmierumgebung *Simatic STEP 7* erstellt und kompiliert. Die benötigten NC- und Antriebsdaten lassen sich mit dem *SinuCom Update Agent* zusammenstellen. Nachfolgend werden die verwendeten Elemente erläutert.

Simatic STEP 7

Die Konfiguration der PLC beinhaltet neben dem eigentlichen PLC-Programm auch die sogenannte Hardware-Konfiguration (HW-Konfig). Für die bei der Sinumerik 840D sl integrierte PLC-Einheit wird beides in STEP 7 erstellt.

In der HW-Konfig werden sämtliche an die PLC angebotenen Komponenten spezifiziert. Die Zusammenstellung dieser Konfiguration erfolgt durch Auswahl der Komponenten aus einer Bibliothek anhand ihrer Typnummern. Ausgehend von einer Basiskonfiguration entsprechend der verwendeten „Station“ genannten Steuerungseinheit (hier: NCU 720.1 mit PLC 317-2DP) werden alle an den Kommunikationsstrang (hier: Profibus) angeschlossenen Komponenten (E/A-Einheiten, Bedienkomponenten etc.) eingebunden und mit eindeutigen Adressen zur Kommunikation versehen. Diese sehr strikte Methode ist auf Anforderungen aus der Anlagensicherheit zurückzuführen. Bei fehlerhafter Konfiguration oder Ausfall einer Komponente geht die Steuerung automatisch in den Stop-Zustand über.

Das PLC-Programm kann in einer der in IEC 61131-3 [39] genormten Programmiersprachen oder der systemeigenen Sprache HiGraph erstellt werden. Zu jeder Steuerungshard-

ware existiert ein Grundprogramm, das je nach Anforderung modifiziert wird. Der Übersichtlichkeit halber wird das PLC-Programm in Teilprogramme zerlegt und über sogenannte Organisations-Bausteine (OB) verwaltet.

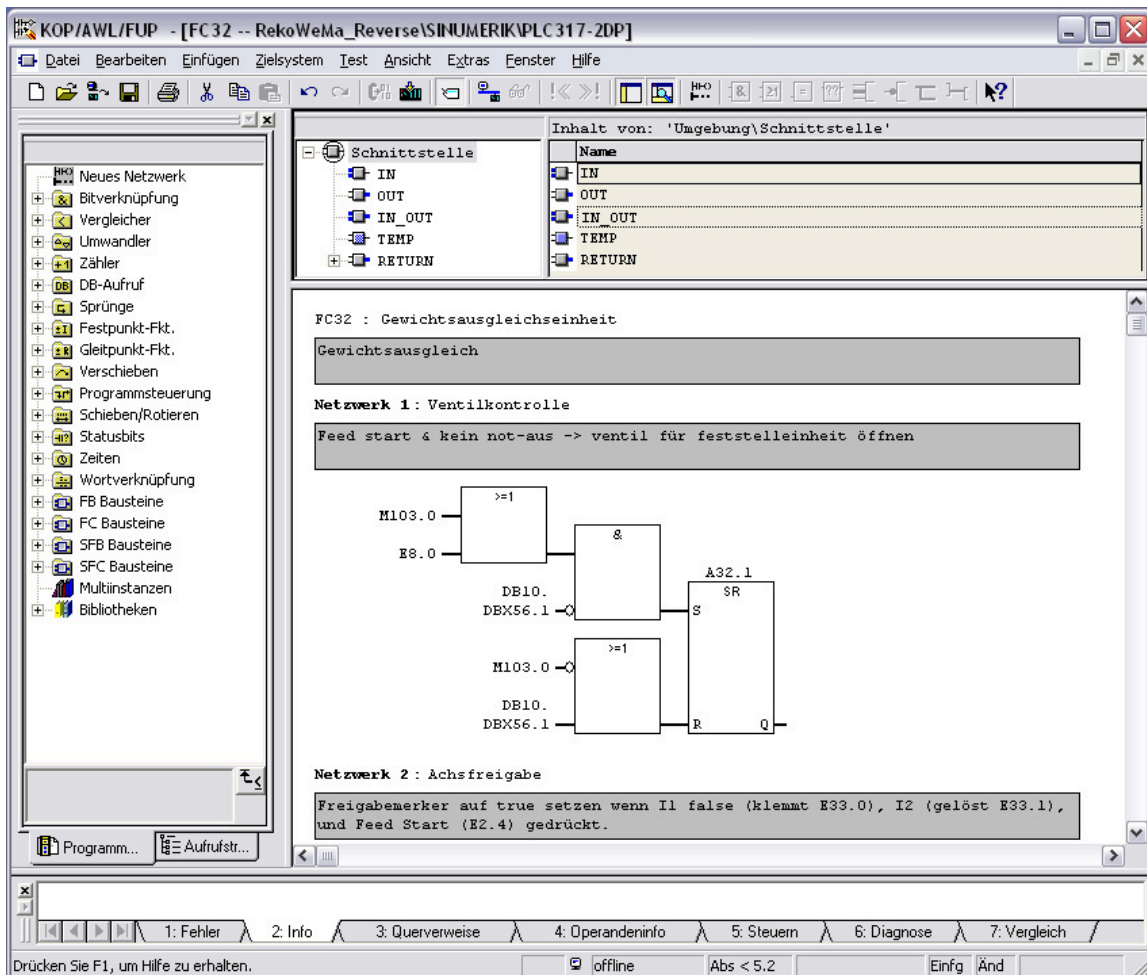


Bild 6.2: Programmierung einer Funktion in STEP 7 als Funktionsplan. Dargestellt ist eine Funktion für die Achsfreigabe bei Verwendung der Gewichtsausgleichseinheit. Diese Funktion wird nur bei Bedarf in das PLC-Programm eingebunden.

Das PLC-Hauptprogramm ist im OB1 enthalten. Dieser Baustein läuft zyklisch ab und bestimmt, welche Funktionen (FC¹) bzw. Funktionsbausteine (FB²) aufgerufen und abgearbeitet werden. Der OB1 wird editiert, um die Aufrufe der FBs bzw. FCs anzupassen oder gewisse Funktionen direkt zu implementieren, beispielsweise die erforderlichen Achsfreigaben für die Anzahl vorhandener Maschinenachsen. Der OB100 wird nur einmal beim Einschalten der Steuerung durchlaufen. Er initialisiert das System und bietet somit die

¹eigenständiger Codebaustein, benötigt aktuelle Eingangswerte beim Aufruf [116].

²Codebaustein mit zugeordnetem Datenbaustein (DB), der auch statische Werte enthalten kann [116].

Möglichkeit, Startparameter zu setzen, um einen definierten Einschaltzustand zu gewährleisten. Bild 6.2 zeigt das GUI zur Programmierung von Bausteinen in STEP 7. Dargestellt ist ein als Funktionsplan (FUP) implementiertes Netzwerk für die Achsfreigabe bei Verwendung der Gewichtsausgleichseinheit; diese Funktion wird bei Bedarf eingebunden.

Das komplette PLC-Programm wird in STEP 7 kompiliert und kann entweder direkt auf die Steuerung übertragen oder als Archiv exportiert werden. Einzelne PLC-Bausteine (OB, FB, FC, DB etc.) lassen sich nicht exportieren. STEP 7 verfügt über einen integrierten Debugger zur Fehlersuche im PLC-Code.

Mit dem Sinumerik Machine Simulator (MS) steht eine weitere Möglichkeit zur Verfügung, die erstellte PLC-Konfiguration umfassend zu überprüfen. Dazu wird im MS ein Modell der realen Maschine erstellt, das alle elektrischen Komponenten und Anschlüsse emuliert, die von der PLC angesprochen werden. Auf diese Weise lassen sich Fehler in der PLC-Konfiguration bereits im Vorfeld beheben. Der Machine Simulator kann entweder an die PLC-Simulation (PLC-Sim) in STEP 7 angebunden werden oder, wie in Abschnitt 2.5.3 beschrieben, als Hardware-in-the-Loop-Simulation mit einer realen Maschinensteuerung gekoppelt werden [127]. Zu erwähnen ist, dass das dazu verwendete Maschinenmodell nur die Logik beinhaltet und keine physikalischen Informationen.

SinuCom Update Agent

Das Software-Paket SinuCom Update Agent besteht aus mehreren Programmen (UPDiff, UPExpert, UPTopo und UPSHield) und ist für die Erstellung von Steuerungsarchiven für variantenarme Serienmaschinen konzipiert. Mit UPDiff können Steuerungsarchive verglichen werden, UPExpert ist das Projektierungstool für die Manipulation der Steuerungsdaten, UPTopo ist das Verdrahtungstool für die Antriebstopologie und mit UPSHield wird das Steuerungsarchiv erstellt. Für die Erstellung der Steuerungsarchive zur Rekonfigurierung der Prototypmaschine werden UPDiff, UPExpert und UPSHield verwendet.

Das Tool UPDiff ermöglicht es, zwei Archive gleichen Typs – NC, PLC oder DO (Drive Objects = Antriebsdaten) – miteinander zu vergleichen und sich die Unterschiede anzeigen zu lassen. Auf diese Weise können beispielsweise Änderungen gegenüber einer Basiskonfiguration festgestellt werden. Auch lassen sich mit diesem Tool – im Gegensatz zu STEP 7 – einzelne PLC-Bausteine isolieren und abspeichern.

UPExpert dient der Projektierung einer Steuerungskonfiguration. Mit diesem Tool wird eine ausführbare Datei erstellt, die alle an der Steuerungskonfiguration durchzuführenden Manipulationen enthält. UPSHield erstellt daraus ein maschinenlesbares Steuerungsarchiv. Grundlage für die Manipulation der Steuerungsdaten sind bereits bestehende Archive mit NC-Daten, dem PLC-Programm und Antriebsdaten. Mit Auswahl eines solchen Archivs wird dieses als Ausgangskonfiguration übernommen. Aufbauend darauf können Manipu-

lationsschritte definiert werden, in denen NC-Maschinendaten Werte zugewiesen, einzelne PLC-Bausteine ersetzt oder hinzugefügt und Antriebsparameter gesetzt werden. Entsprechend dem eigentlichen Zweck des Programms ist es möglich, Dialoge einzufügen, mit denen sich Fallunterscheidungen bei der Erstellung der manipulierten Archive berücksichtigen lassen. In UPExpert werden alle Fälle definiert, von denen der Benutzer beim Erstellen des Archivs mit UPShield den zutreffenden auswählt. Die Anweisungen für jede Manipulation können manuell eingegeben oder aus Textdateien importiert werden.

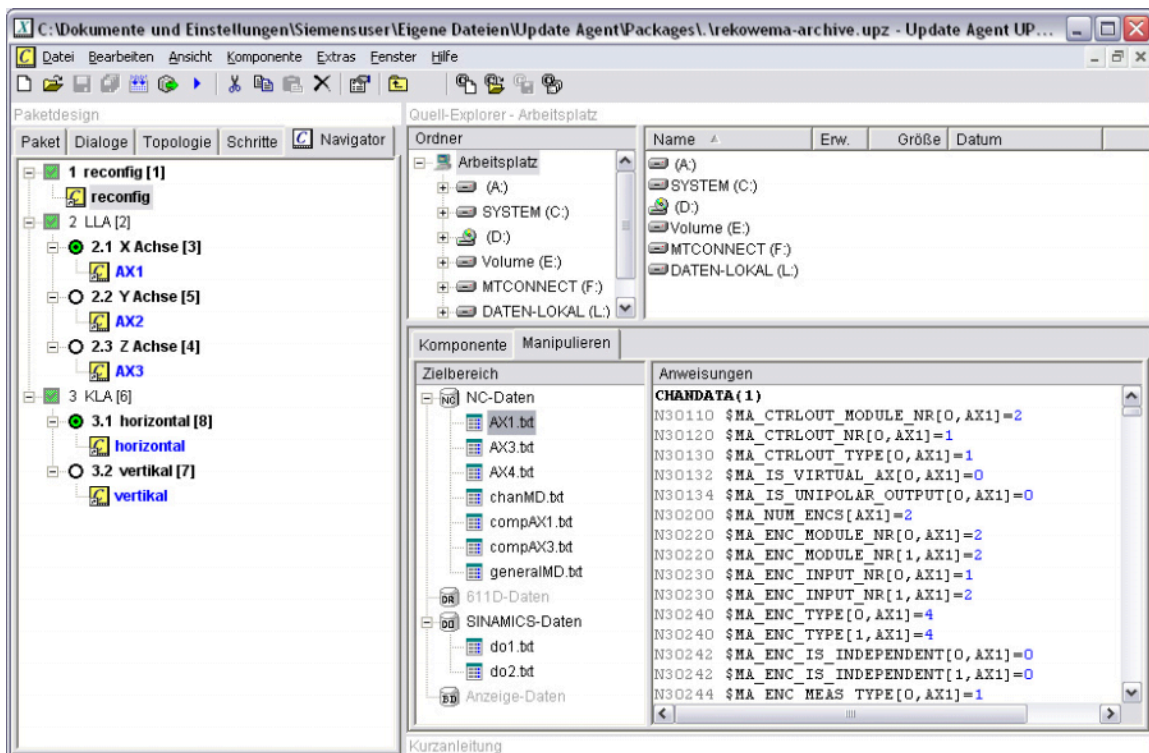


Bild 6.3: Programmfenster des SinuCom Update Agent Expert. Im Navigator (links) werden die Schritte angezeigt, die beim Erstellen des Steuerungsarchivs abgearbeitet werden. Die zu manipulierenden Maschinendaten und die zugehörigen Werte sind in Anweisungen (rechts unten) festgehalten.

Bild 6.3 zeigt das Programmfenster des UPExpert. Im linken Teil gibt der Navigator eine Übersicht über die im Konfigurationspaket definierten Manipulationsschritte. Nach der Grundkonfiguration steht die Wahl der Koordinatenachsrichtung der LLA an und schliesslich eine Fallunterscheidung für den Einsatz der KLA als Horizontal- oder Vertikalachse. Im rechten unteren Fenster sind die während eines Schritts an den unterschiedlichen Archiven durchgeführten Manipulationen aufgeführt. Die hier dargestellten Anweisungen führen zur Parametrierung der ersten Achse in der Steuerung als physisch vorhandene Linearachse, angeschlossen am Motormodul 2, welche über ein zweites Messsystem verfügt.

6.1.2 Vorgehen

Mit Hilfe der zuvor beschriebenen Softwaretools kann ausgehend vom ABK eine komplette Steuerungskonfiguration generiert werden, die bei der Rekonfigurierung einer Maschine auf die Steuerung übertragen wird. Diese kann bereits die über Berechnung und Simulation im ABK ermittelten Reglereinstellungen enthalten. Aufgrund der softwarebedingten Unterscheidung zwischen der Maschinen- und Antriebskonfiguration einerseits und der PLC-Konfiguration andererseits, müssen unterschiedliche Wege zur Generierung der jeweiligen Archive besprochen werden.

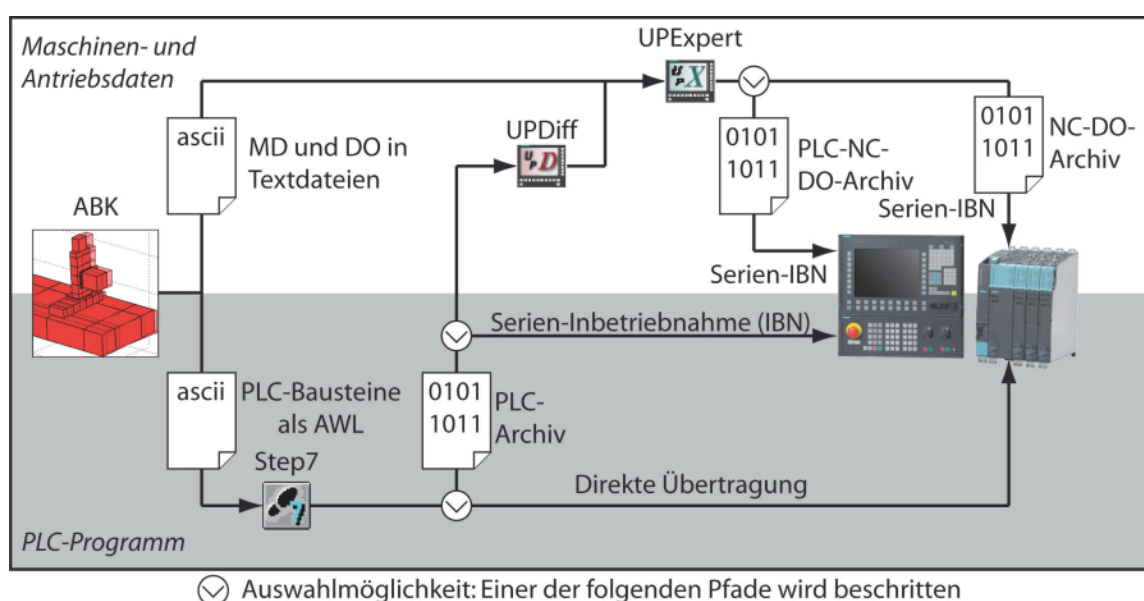


Bild 6.4: Vorgehen zur Generierung und Übertragung der Steuerungskonfiguration unter Verwendung des ABK sowie steuerungsspezifischer Konfigurierungssoftware.

Bild 6.4 illustriert das Vorgehen zur Erstellung einer vollständigen Steuerungskonfiguration unter Verwendung der zuvor beschriebenen Softwaretools: Im ABK wird ein mechanisches Maschinenmodell erstellt. Dieses enthält die einzustellenden Parameterwerte der Maschinen- und Antriebsdaten sowie ggf. den Programmcode für benötigte PLC-Funktionalität. Die Parameterwerte sind entweder direkt im Modell enthalten (Verfahrweg einer Achse, Angaben zum Messsystem, Spindelsteigung etc.) oder sie werden im Rahmen der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Evaluation der Maschinenkonfiguration bestimmt, z.B. bei der modellbasierten Reglerinbetriebnahme [70]. Eine Exportfunktion im ABK generiert für die Maschinendaten (MD) und Antriebsdaten (DO) Listen im Textformat mit der Datumsbezeichnung und dem Parameterwert. Die Bezeichnungen der PLC-Bausteine, die für bestimmte Module erforderlich sind und den jeweiligen Modulmodellen im AWL-Format (Anweisungsliste) beiliegen, sind ebenfalls als Liste im Textformat gespeichert.

Zur Erstellung der PLC-Konfiguration in STEP 7 wird ein zur PLC passendes Grundprogramm mit maschinenspezifischer Konfiguration benötigt. Basierend auf diesem werden die in der Textdatei angegebenen PLC-Bausteine importiert. Das vollständige Programm wird kompiliert und kann dann entweder als PLC-Archiv exportiert oder direkt aus STEP 7 auf die Maschinensteuerung übertragen werden, sofern eine geeignete Kommunikationsverbindung besteht. Das in einem proprietären Binärformat gespeicherte PLC-Archiv kann offline auf die Steuerung kopiert und dort über die Serien-Inbetriebnahme-Funktion (Serien-IBN) eingelesen werden. Alternativ kann das PLC-Archiv für die Einbindung in ein PLC-NC-DO-Komplettarchiv im UPDiff aufbereitet werden. Dazu müssen über einen Vergleich mit einem Grundprogramm die zusätzlichen und abgewandelten PLC-Bausteine ermittelt werden, welche dann separat exportiert werden müssen, um in UPExpert eingebunden werden zu können.

Für die Maschinen- und Antriebsdaten werden, wie im vorangehenden Abschnitt beschrieben, die erforderlichen Manipulationsschritte definiert. Die in den MD- und DO-Textdateien gespeicherten Datenlisten werden beim Import in die einzelnen Manipulationsanweisungen übersetzt. An dieser Stelle können auch die ggf. mittels UPDiff separierten PLC-Bausteine in die Schrittfolge eingebunden werden. Abschliessend wird gemäss der Manipulationsanweisungen ein einziges Steuerungsarchiv mit allen spezifizierten NC-, Antriebs- und PLC-Daten erstellt. Dieses Archiv wird über Serien-IBN in die Steuerung eingelesen.

Zu beachten ist, dass die Archive grundsätzlich differentiell angewendet werden, was bedeutet, dass nur die explizit im Archiv spezifizierten Parameter modifiziert werden. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, durch ein sogenanntes Urlöschen von PLC und NC einen definierten Ausgangszustand herzustellen. Bei diesem Vorgang wird von einem geschützten Speicherbereich ein Grundprogramm bzw. eine Grundkonfiguration auf die Steuerung geladen. Wird bei der Definition der Manipulationsanweisungen dieser Grundzustand nach dem Urlöschen der Steuerung als Basis verwendet, dann werden nur die davon abweichenden Parameterwerte geändert. Kritisch ist diese Eigenschaft dann, wenn beim Einlesen einer Steuerungskonfiguration nicht erst der Grundzustand hergestellt wird. Beispielsweise sei angenommen, ein bestimmtes Maschinendatum in einer Konfiguration 1 (K1) weicht von der Basiskonfiguration (K0) ab. Nun soll eine neue Konfiguration (K2) eingelesen werden, die am selben Maschinendatum den Wert unverändert von K0 übernehmen soll. Im Archiv wird diese Manipulation normalerweise nicht spezifiziert, da es nur Differenzen zu K0 enthält. Nach dem Einlesen des Archivs für K2 entsteht eine Konfiguration K2', die unerwünschterweise das unveränderte Maschinendatum von K1 enthält. Um derartige Inkonsistenzen zu vermeiden, muss entweder vor jeder Konfiguration in einem Zwischenschritt eine definierte Basiskonfiguration hergestellt werden oder alle Manipulationen müssen im Archiv explizit aufgeführt sein.

6.2 Umbau

Dieser Abschnitt behandelt den Umbau einer rekonfigurierbaren WZM als letzten Schritt des in Bild 4.2 dargestellten Rekonfigurierungsablaufs. Neben dem mechanischen Umbau umfasst dies die Konfigurierung der Maschinensteuerung sowie das abschliessende Fein-einstellen der Steuerung und ggf. erforderliche Nullpunktdefinitionen. Die Ausführungen beziehen sich auf die realisierte Prototypmaschine.

6.2.1 Umbau der Mechanik

Beim mechanischen Umbau wird aus den Maschinenmodulen die zuvor im ABK erstellte Maschinenkonfiguration montiert. Das schliesst auch die Anbindung an den Schaltschrank sowie die sonstige Infrastruktur ein.

Transport und Ausrichtung der Module erfolgen mittels geeigneter Handhabungsmittel. An der Prototypmaschine wurden dafür gemäss den in Abschnitt 5.1.2 aufgestellten Betriebsanforderungen Transportösen vorgesehen, so dass die Module mit Hilfe des Hallenkranes angehoben und auf dem Maschinenbett bzw. auf der jeweils gewünschten Modulschnittstelle grob positioniert werden können. Bild 6.5 zeigt die für den Vertikaleinsatz vorbereitete KLA (links) sowie die LLA (rechts) beim Transport am Hallenkran.

Die Justierung der Modulposition auf der Modulschnittstelle wird durch manuelles Ausrichten an den Anschlagplatten erreicht. Fixiert werden die Module durch kreuzweises Verschrauben mittels Akkuschrauber und Drehmomentschlüssel. Das Vorgehen beim Aufbau einer Versteifungseinheit ist identisch.

Die Kabel der Motoren werden direkt vom Schaltschrank zu den Motoren geführt und dort angeschlossen, ebenso ggf. vorhandene Kabel für Messsysteme und weitere Sensoren. Die Kabelführung mittels Robotrax-Energieführungen [48] erweist sich als einfache und robuste Lösung. Neben den elektrischen können darin auch die benötigten pneumatischen und hydraulischen Leitungen geschützt von den Infrastrukturanschlüssen bzw. den Unterstützungsmodulen zu den jeweiligen Verbrauchermodule geführt werden.

Im vorliegenden Fall wurde zum Umbau nur Standardwerkzeug benötigt. Der Zeitbedarf für eine komplette Rekonfigurierung lag bei den Tests an der Prototypmaschine je nach Konfiguration bei 1.5 bis 2 Stunden. Die Rekonfigurierung kann in den meisten Fällen von einer Person alleine durchgeführt werden. Mit den vorhandenen, noch nicht optimierten Hilfsmitteln ging der Umbau jedoch zu zweit deutlich rascher. Die für eine mechanische Rekonfigurierung erforderliche Zeit bietet noch viel Optimierungsspielraum, da derzeit etwa ein Drittel der Zeit für das Lösen und Festziehen von Schraubverbindungen aufgewendet wird.

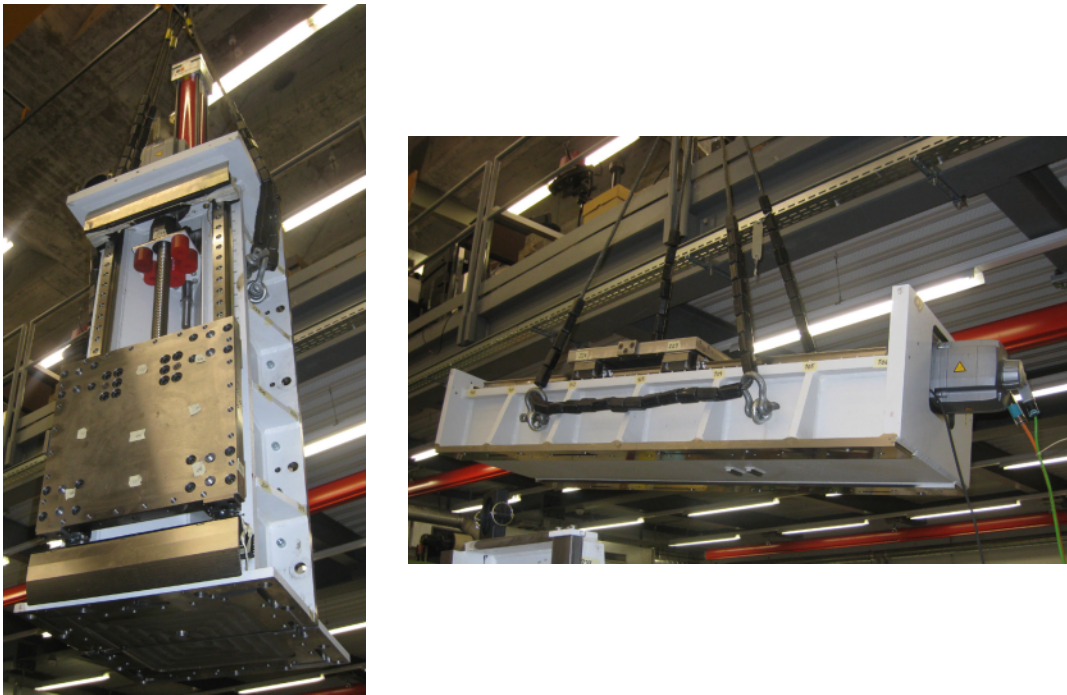


Bild 6.5: Mechanische Rekonfiguration der Prototypmaschine. Transport der für vertikalen Einsatz vorbereiteten KLA (links) sowie der LLA (rechts).

6.2.2 Konfiguration der Maschinensteuerung

Zur Konfiguration der Maschinensteuerung wird die von der Steuerung gebotene Dienstfunktion für Serien-Inbetriebnahmen anhand von Archivdateien genutzt. Die gemäss dem in Bild 6.4 illustrierten Vorgehen erstellten Archive werden wie in Abschnitt 6.1.2 beschrieben eingelesen. Dabei werden die im Archiv spezifizierten Maschinendaten mit den dort angegebenen Parameterwerten belegt. Bild 6.6 zeigt das Auftragsprotokoll beim Einlesen eines NC-Archivs mittels Serien-IBN auf der Sinumerik 840D. Nach Anwahl des Archivs und Start des Einlesevorgangs werden die im Archiv gespeicherten Modifikationsaktionen automatisch durchgeführt. In der Auftragsliste kann der Benutzer den Fortschritt verfolgen. Das Einlesen eines Archivs dauert wenige Minuten und erfordert dabei mehrere Neustarts der NC/PLC-Einheit.

Vor Beginn des Einlesevorgangs wird die Kompatibilität von NC- und PLC-Archiv zur aktuell eingesetzten Version der PLC-Systemsoftware überprüft. Fehlerhafte und dadurch evtl. gefährliche Konfigurationen werden somit durch das System selbst verhindert. Jedoch erfordert die Erstellung der Archive deshalb nicht nur Versionsinformationen der verwendeten Softwarekomponenten, sondern auch die exakte Übereinstimmung der Versionen, was hinsichtlich der Austauschbarkeit bei rekonfigurierbaren WZMn ein limitierender Faktor ist. Um bei der Serien-IBN von einem eindeutig definierten Zustand auszugehen, kann

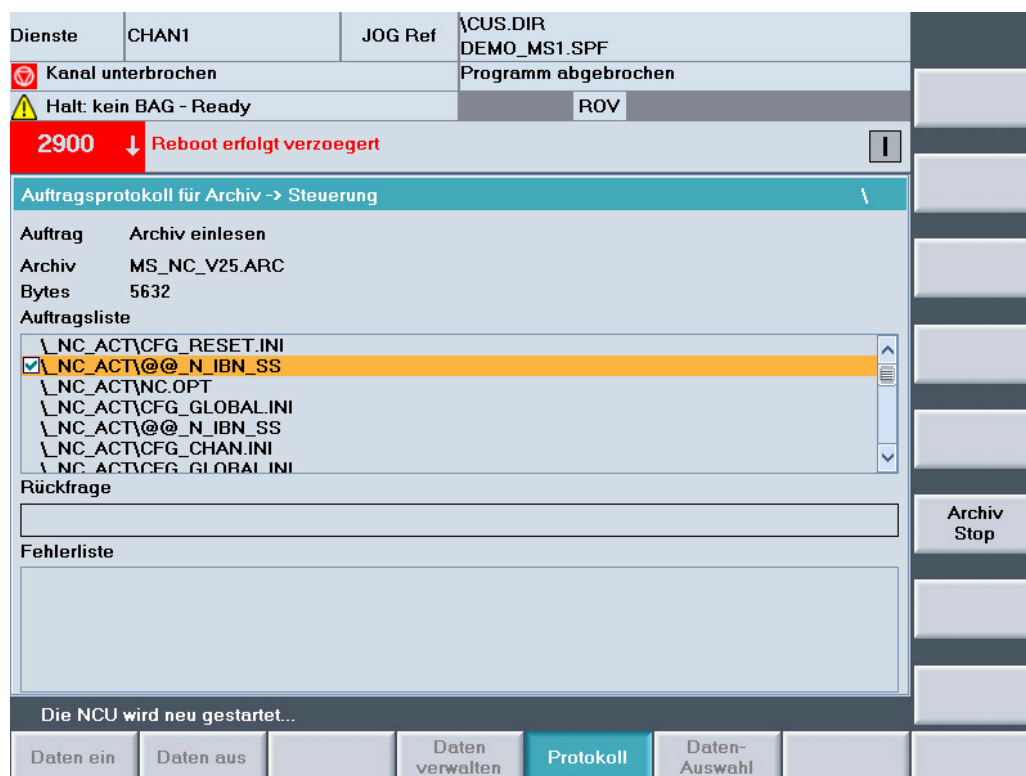


Bild 6.6: Einlesen eines Serien-IBN-Archivs. Sämtliche Änderungsanweisungen, die im Archiv gespeichert sind, werden automatisch ausgeführt.

in einem vorgelagerten Schritt die Steuerung urgelöscht werden, womit eine vom Steuerungshersteller voreingestellte Standardmaschinenkonfiguration geladen wird.

6.2.3 Feineinstellung der Maschine

Nach dem Einlesen der Archive können ggf. erforderliche Kalibrierungen, Justierungen oder Parameteroptimierungen durchgeführt werden. Über eine Kalibrierung wird allgemein die Abweichung eines angezeigten Messwertes, beispielsweise der Position, vom tatsächlichen Wert der Messgröße erfasst [87], wozu eine bekannte Referenz benötigt wird. Bei Maschinenachsen kommen dafür die in Abschnitt 5.4 zur Verifikation der geometrischen Eigenschaften verwendeten Messmittel (Vergleichsmaßstab, elektronische Wasserwaage, Laserinterferometer etc.) zum Einsatz. Grundsätzlich ist eine Kalibrierung für Kompensationszwecke nur durchzuführen sofern die erforderlichen Werte nicht bereits aus den Modellen bestimmt werden können oder falls letztere überprüft werden sollen. Zur Erreichung wichtiger Genauigkeitsanforderungen kann es sinnvoll sein, bestimmte geometrische Eigenschaften messtechnisch zu überprüfen.

Beide Prototypmodule verfügen über ein absolutes Messsystem, dessen Referenzmesswert prinzipiell nur einmal ein Positionswert im Maschinenkoordinatensystem zugeordnet werden muss. Werden die bei der Erstmontage der Module justierten Werte übernommen, so sind nach der Rekonfigurierung keine weiteren Anpassungen notwendig. Nach einer Rekonfigurierung der Prototypmaschine sind weder Kalibrierungen noch Justierungen erforderlich, damit die Maschine einsatzfähig ist.

Zur Parameteroptimierung stehen in der Steuerung Analysefunktionen zur Verfügung. Diese dienen insbesondere der Selbstinbetriebnahme der Regler sowie der Optimierung ihrer Parameter. Je nach Softwareversion der verwendeten Bedienschnittstelle zur Steuerung (Human Machine Interface, HMI) lassen sich die verschiedenen Regler auch automatisch einstellen. Die auf der Steuerung der Prototypmaschine installierte Software bietet Automatismen zur Selbstinbetriebnahme des Drehzahl- und des Stromreglers. Die neueste HMI-Version kann zudem den Lageregler in Betrieb nehmen. Sowohl die Selbstinbetriebnahme als auch die manuelle Optimierung erfolgt primär anhand der Frequenzgänge der Antriebsstränge. Für die korrekte Interpretation der Analyseergebnisse und die darauf basierende Ableitung optimierter Parameterwerte sind allerdings Fachwissen und Erfahrung nötig. Die Rekonfigurierung einer WZM allein mit den im ABK und der Selbstinbetriebnahme ermittelten Parameterwerten ist mit Werkstattpersonal möglich und liefert ein brauchbares Ergebnis. Eine vertiefte Optimierung erfordert speziell geschultes Personal.

6.3 Verifikation der Rekonfiguration

Dieser letzte Abschnitt über die Rekonfigurierung einer Maschine behandelt die exemplarische Überprüfung verschiedener Rekonfigurationen. Das Ziel der Versuche war der Nachweis der Anwendbarkeit des Konzepts der Rekonfigurierbarkeit in der Praxis.

Zunächst werden die beiden Konfigurationsvarianten beschrieben, an denen die Messungen durchgeführt wurden. Wie in Abschnitt 5.4 werden dann auch hier erst die durchgeführten Analysen erläutert, bevor die Messergebnisse diskutiert werden. Schliesslich werden die bei den Versuchen gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst.

6.3.1 Untersuchte Konfigurationsvarianten

Neben der in Abschnitt 5.4 beschriebenen IBN-Konfiguration wurden zwei Maschinenkonfigurationen zur Untersuchung ausgewählt, bei denen jeweils beide Linearachsen in Serie montiert sind, allerdings in unterschiedlicher Reihenfolge. Bild 6.7 zeigt links die Konfigurationsvariante „Fahrständer“ (FS) und rechts die Variante „Kreuztisch“ (KT).

In der FS-Konfiguration wird die LLA als x-Achse horizontal auf die Grundplatte montiert. Auf ihrem Schlitten wird die KLA inklusive vVE und GAE vertikal als z-Achse

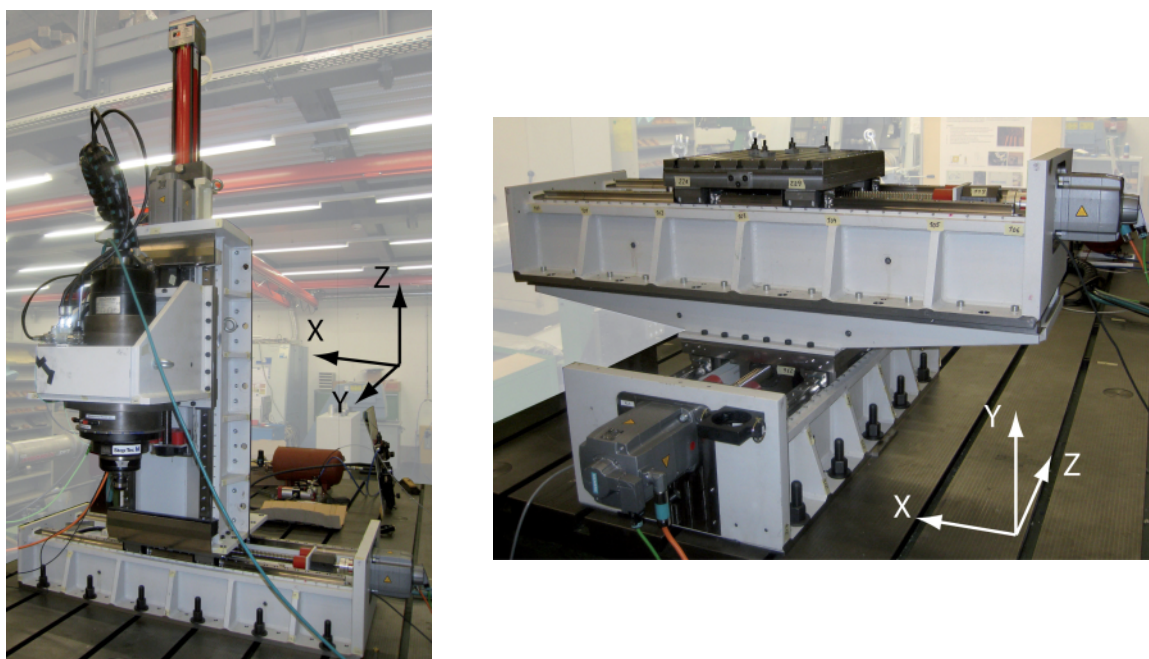


Bild 6.7: Zur Untersuchung im Labor aufgebaute Fahrständerkonfiguration (FS, links) und Kreuztischkonfiguration (KT, rechts).

angebracht. An dieser wird das Spindelmodul mit vertikaler Achsorientierung befestigt. Der Druck im Zylinder der GAE ist per Druckregelventil auf etwa 8 bar eingestellt, womit die Gewichtskraft von ca. 400 kg Masse kompensiert wird.

In der KT-Konfiguration wird die KLA als unterste Achse horizontal auf der Grundplatte befestigt. Auf ihr wird ebenfalls horizontal die LLA samt hVE montiert. Als Abschluss wird darauf eine Aufspannplatte mit T-Nuten angebracht. Der einfacheren Vergleichbarkeit der Messungen halber, werden die Achsbezeichnungen gleich wie bei der IBN-Konfiguration gewählt: Die LLA ist die x-Achse, die KLA die y-Achse, wie es beispielsweise bei einer Horizontalspindelkonfiguration der Fall sein könnte.

6.3.2 Durchgeführte Analysen

Die Verifikation der Rekonfigurationen umfasst drei Analysen: Mit den *geometrischen Prüfungen* werden die selben Komponentenabweichungen (Geradheit, Positionierung, Rollen, Nicken, Gieren) erfasst, wie dies in Abschnitt 5.4 für die einzelnen Module der Fall war. Der Vergleich der einander entsprechenden Messungen gibt Hinweise auf die Beständigkeit der geometrischen Moduleigenschaften und somit über die Wiederholbarkeit der Konfigurationsaufbauten. Jede Konfiguration wurde zweimal untersucht, wobei zwischen Erst- und Wiederholmessung jeweils mindestens eine andere Maschinenkonfiguration montiert

wurde. Es wurden dieselben Messmittel wie bei der Untersuchung der Einzelachsen verwendet; einzig die Positioniergenauigkeit der KLA in FS-Konfiguration wurde mittels Laserinterferometer ermittelt. Zur Untersuchung des Einflusses der Versteifungseinheit auf die statischen Komponentenabweichungen beim Rollen und Nicken wurden an einer modifizierten KT-Konfiguration ohne hVE Zusatzmessungen durchgeführt.

Mittels *experimenteller Modalanalyse* wird die korrekte Modellierung der Maschinenstruktur überprüft. Die Eigenfrequenzen und -moden der beiden Maschinenkonfigurationen wurden analog dem Vorgehen in Abschnitt 5.4 zur Analyse der Aufspannplatte ermittelt.

Zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Maschinenkonfiguration werden *Crosstalk-Messungen* herangezogen. Der während einer einachsigen Positionierbewegung aufgezeichnete Crosstalk (CT) wird mit den Simulationsergebnissen gemäss Abschnitt 4.2.1 verglichen. Darüber lässt sich die Modellierung des Antriebsstrangs sowie deren Zusammenspiel mit dem Strukturmodell beurteilen.

6.3.3 Auswertung der Messungen

Die Auswertung der Messungen konzentriert sich auf ausgewählte Aspekte, die eine Beurteilung der Maschinenkonfigurationen sowie der Effektivität des Rekonfigurierungsablaufs erlauben. Zum Vergleich werden die in Abschnitt 5.4.2 besprochenen Messungen an den Modulen und Resultate aus Berechnungen und Simulationen im ABK herangezogen.

Geometrische Prüfungen

Die geometrischen Prüfungen werden identisch wie bei den einzelnen Modulachsen ausgewertet. Die entsprechende Beschreibung aus Abschnitt 5.4.2 gilt vollumfänglich. Der besseren Vergleichbarkeit halber sind alle Erst- und Wiederholmessungen einer mechanisch gleichen Abweichungskomponente in einer Graphik zusammengefasst. Als Referenz für die je nach Konfiguration unterschiedlich bezeichneten Abweichungen wird die Bezeichnung der Abweichung an der einzelnen Grundachse gewählt, in der Legende als IBN-Konfiguration deklariert. Die Führungsschienen bilden die Ebene der horizontalen Abweichung, die vertikale Abweichung wird in der darauf senkrecht stehenden Ebene gemessen.

Als Messunsicherheit gelten grundsätzlich die in Tabelle 5.5 angegebenen Werte. Bei einzelnen Messungen mit suboptimalem Messaufbau sind ggf. grössere Werte zu veranschlagen, worauf in diesen Fällen explizit hingewiesen wird.

Geradheit Die Geradheitsmessungen zeigen eine sehr gute Wiederholgenauigkeit von 1 bis 3 μm zwischen allen Erst- und Wiederholmessungen. Die Form der Messkurve sowie die Spanne der Geradheitsabweichung wiederholen bei den Messungen der Einzelachsen

und der KT-Konfiguration in der selben Größenordnung. Die Geradheitsabweichung in der FS-Konfiguration weist insbesondere bei den horizontalen Geradheiten eine deutlich abweichende Form auf, ist aber ebenfalls sehr gut reproduzierbar.

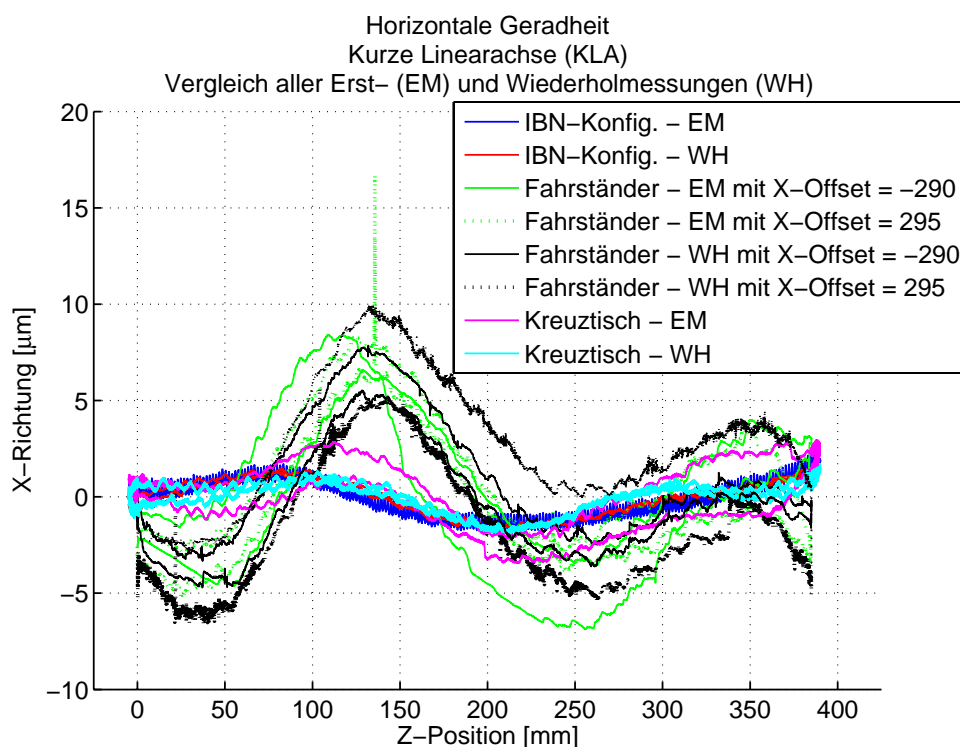


Bild 6.8: Gesamtvergleich aller Erst- und Wiederholmessungen der horizontalen Geradheit der KLA: EYZ am Fahrständer und EXZ an den anderen Konfigurationen.

Bild 6.8 zeigt die horizontale Geradheit der KLA. Die Messungen an der IBN- sowie der KT-Konfiguration erfolgten mit demselben Vergleichsmaßstab. Für die Geradheitsmessung in der FS-Konfiguration konnte der Vergleichsmaßstab aus Platzgründen nicht verwendet werden, deshalb wurde mit einem Messtaster ein Granit-Normal an zwei unterschiedlichen x-Positionen (oberes und unteres Ende des x-Verfahrweges) abgetastet. Die Spitzen in der Aufzeichnung der Tastmessung bei $z \approx 135$ wurden bei der Berechnung der Geradheitswerte herausgefiltert. Die Form aller Messkurven ist ähnlich, da sich Extrema und Wendepunkte in etwa an den selben Stellen befinden. Die Ursache für die abweichende Höhe der Auslenkung in der FS-Konfiguration lässt sich allerdings nicht eindeutig zuordnen, da mehrere Rahmenbedingungen gleichzeitig variiert werden (vertikale Aufstellung, SM und GAE an Schlitten, Messmittel, Messposition).

Der Gesamtvergleich der horizontalen Geradheit der LLA in Bild 6.9 stellt sich ähnlich dar. Die Messkurven aller IBN- und der KT-Konfiguration liegen praktisch übereinander. Die Messungen an der FS-Konfiguration wiederholen zwar sehr gut, weichen qualitativ

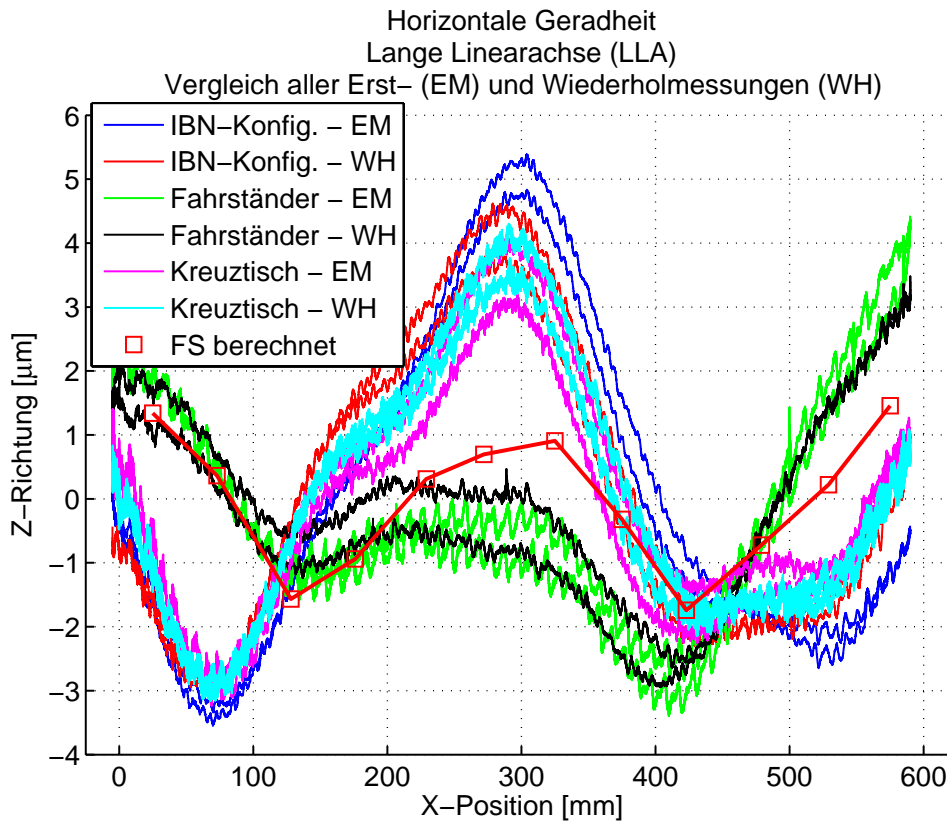


Bild 6.9: Gesamtvergleich aller Erst- und Wiederholmessungen der horizontalen Geradheit der LLA.

jedoch deutlich von den anderen ab. Diese Abweichung lässt sich auf die Kombination aus den Komponentenabweichungen der LLA und dem Messort am TCP zurückführen. Letzterer liegt bei der FS-Konfiguration etwa 350 mm unterhalb der Schlittenfläche, auf welcher die Messungen in den anderen Konfigurationen durchgeführt wurden. Der Lesekopf erfasst aufgrund des vertikalen Versatzes auch horizontale Abweichungen, die durch das Rollen der LLA entstehen. Bei der Messung der Komponentenabweichungen in der IBN- und KT-Konfiguration war der Lesekopf starr mit der Basis verbunden, während sich der Massstab auf dem Schlitten mitbewegte. Durch das Gieren der LLA entstanden so horizontale Abweichungen, die mit zunehmender Entfernung des Schlittens von der Position des Lesekopfs verstärkt werden. Bei der FS-Konfiguration tritt dieser Effekt nicht auf, da der Massstab auf der Basis fixiert war. Die durch rote Quadrate markierten Punkte in Bild 6.9 wurden unter Berücksichtigung der genannten Effekte aus den Werten der IBN-Konfiguration für die FS-Konfiguration berechnet. Die Graphik zeigt, dass rechnerisch von den Komponentenabweichungen der Module auf die Abweichungen in anderen Konfigurationen geschlossen werden kann.

Positionierung Bei den Positioniermessungen an der KLA tritt der Spindelsteigungsfehler als dominante Einflussgrösse hervor. Sowohl die Form der Messkurve als auch die ermittelten Kennwerte finden sich in allen drei Konfigurationen wieder. In der KT-Konfiguration wurde zudem der Effekt der Spindelsteigungsfehlerkompensation untersucht. Aus den Positionsabweichungen in einer vorangegangenen Messung wurden Kompensationswerte bestimmt, die im mechatronischen Modulmodell hinterlegt und mit dem Konfigurationsarchiv direkt auf die Steuerung übertragen wurden. Mit aktivierter Kompensation wird die Positioniergenauigkeit von unkompensiert über $20\ \mu\text{m}$ auf ca. $7\ \mu\text{m}$ reduziert. Die Wiederholpräzision der Positionierung beträgt unabhängig von der Kompensation $4 - 5\ \mu\text{m}$ bei Messung auf dem Schlitten und $14\ \mu\text{m}$ in der FS-Konfiguration.

Mit Kenntnis der Positionsabweichung auf der Messlinie lässt sich unter Berücksichtigung der Kippbewegungen des Schlittens die Positionsunsicherheit im Arbeitsraum bestimmen [139]. Zur Einhaltung einer geforderten Positionstoleranz können im Umkehrschluss die zulässigen resultierenden Beiträge der anderen Abweichungen für ein Modul berechnet werden. Vor Bestimmung der relevanten Positionsabweichung als maximale Differenz der Mittelwerte aller Positionen werden – so wie in dieser Untersuchung rechnerisch angewandt – vorhandene Spindelsteigungsfehler auf Basis der Mittelwerte linear kompensiert.

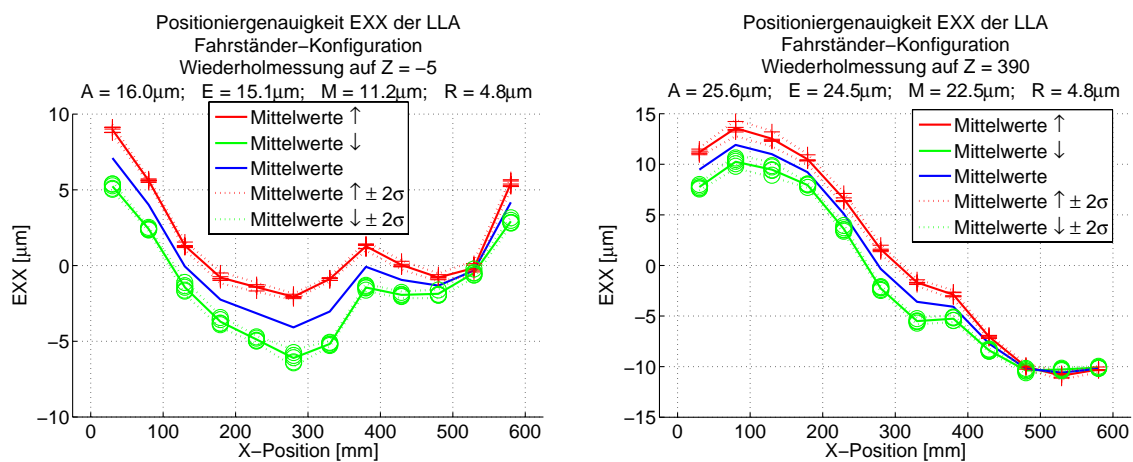


Bild 6.10: Positioniergenauigkeit EXX der LLA in Fahrständerkonfiguration mit unterschiedlicher TCP-Lage (links $z = -5$, rechts $z = 390$).

In den Positioniermessungen der LLA in FS-Konfiguration zeigt sich eine markante Höhenabhängigkeit. In Bild 6.10 sind zwei Positioniermessungen zu sehen, bei der die KLA auf $z = -5$ (links) und $z = 390$ (rechts) gehalten wurde. Lesekopf und Massstab befanden sich dadurch in der Messlage $z = -5$ etwa $150\ \text{mm}$ unterhalb des direkten Messsystems der LLA. In der Messlage $z = 390$ hingegen lagen diese etwa $250\ \text{mm}$ oberhalb des Achsmesssystems. Die entgegengesetzte Positionsabweichung in den beiden Messlagen ist hauptsächlich auf die ausgeprägte Nickbewegung der z -Achse zurückzuführen, welche aus

Bild 6.11 ersichtlich ist. Die Neigung der KLA-SM-Modulkombination bewirkt am TCP eine zum z-Abstand von der Führung proportionale Positionsabweichung. Die Wiederholpräzision der Positionierung liegt in allen Konfigurationen zwischen 4 und 8 μm .

Rollen Die Roll- und Nickmessungen weisen grössere Streuungen auf, wobei auch diese angesichts der für gute Messbedingungen ermittelten Messunsicherheit von 7 $\mu\text{m}/\text{m}$ zu relativieren sind. Die gemessene Rollbewegung folgt bei beiden Achsen einem festen Muster (Knicke, Neigungsänderung). Die Ausrichtung der Messkurve hängt jedoch signifikant von der Lage der Achse auf der Aufspannplatte ab. Verschiedene Messungen, bei denen die KLA in ein und derselben Nutenreihe fixiert ist, weisen eine Differenz unter 15 $\mu\text{m}/\text{m}$ auf. Die Messungen an der LLA in KT-Konfiguration, bei denen die LLA stets an derselben Modulschnittstelle montiert und dadurch kein Einfluss der Aufspannplatte gegeben ist, wiederholen innerhalb von 4 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Nicken Während die Messungen der Nickbewegungen an der KLA keine einheitliche Tendenz aufweisen, zeigt Bild 6.11 dass die Messkurve der LLA für jede Konfiguration qualitativ reproduzierbar ist. Neben den Standardmessungen in IBN-, FS- und KT-Konfiguration wurden Zusatzmessungen durchgeführt, um die Sensitivität der Nickbewegung der Module auf Änderungen der Unterlage zu untersuchen. Dazu wurde in der IBN-Konfiguration eine Messung mit vier in einer Aufspannung geschliffenen und somit gleich dicken Metallklötzen als Auflage durchgeführt. In einer Vergleichsmessung wurde einer der vier gleichen Klötze durch einen um 0.02 mm dünneren Klotz ersetzt. Eine weitere Zusatzmessung erfolgte an einer variierten Kreuztischkonfiguration ohne hVE. Ein signifikanter Unterschied liess sich bei keiner Messung feststellen.

Gieren Die Giermessungen für KLA und LLA ergeben jeweils qualitativ ähnliche Verläufe. Die Spanne der Messwerte streut zwar deutlich, jedoch bewegt sich auch die Messunsicherheit in derselben Grössenordnung um 10 $\mu\text{m}/\text{m}$. Bild 6.12 zeigt den Gesamtvergleich der Giermessungen an der KLA. Das Gieren der Fahrständerkonfiguration konnte, anders als in der IBN-Konfiguration, direkt mittels elektronischer Wasserwaagen erfasst werden. Die Giermessungen der KLA in der KT-Konfiguration und der LLA in der FS-Konfiguration konnten mit den vorhandenen Messmitteln nicht durchgeführt werden.

Zusammenfassung der Messergebnisse Die Tabellen J.1 und J.2 in Anhang J enthalten die in den geometrischen Prüfungen ermittelten Messwerte für die FS-Konfiguration respektive die KT-Konfiguration. Die Messungen zeigen, dass die Kinematik der Achsmodule auch nach mehrmaliger Rekonfigurierung unverändert bleibt. Unterschiede zwischen den Messungen in verschiedenen Maschinenkonfigurationen ergeben sich aus geometri-

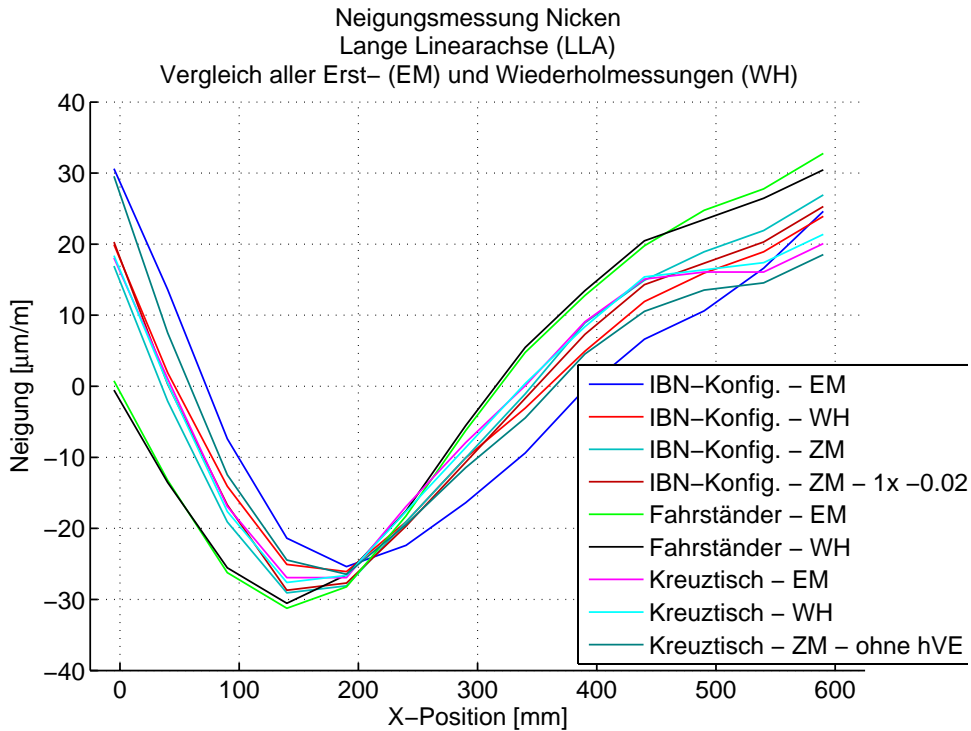


Bild 6.11: Gesamtvergleich der Nickmessungen an der LLA. Qualitativ sind die Messkurven vergleichbar, ein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Konfigurationen ist nicht feststellbar.

schen Abhängigkeiten (Achsversatz, Höhenunterschied etc.) sowie aus Einflüssen durch die Platzierung der Module auf der Aufspannplatte.

Als Anhaltspunkt sind in den Tabellen im Anhang die Toleranzwerte für Bearbeitungszentren nach [42] angegeben. Bereits die am Institut montierten Prototypmodule halten viele der Toleranzen ein. Industriell hergestellte und geprüfte Module dürften präziser sein, was sich positiv auf die Genauigkeitswerte der Maschinenkonfigurationen auswirken sollte (vgl. Einfluss der Nickbewegung der LLA auf die Positionierung der KLA).

Experimentelle Modalanalyse – Frequenzverhalten

Nachdem in Abschnitt 5.4.2 die Modellierung der Aufspannplatte diskutiert wurde, wird dieselbe Methodik nun zur Verifikation der Modellierung der aus den Modulmodellen erstellten Maschinenstrukturen angewendet. Tabelle 6.1 zeigt exemplarisch und analog zu Tabelle 5.8 die durch Messung ermittelten sowie die im ABK berechneten Eigenfrequenzen der Fahrständerkonfiguration. Der Vergleich der Eigenfrequenzen liefert im massgeblichen Bereich bis 100 Hz sehr gute Übereinstimmung: bei zwei Drittel der Moden beträgt die

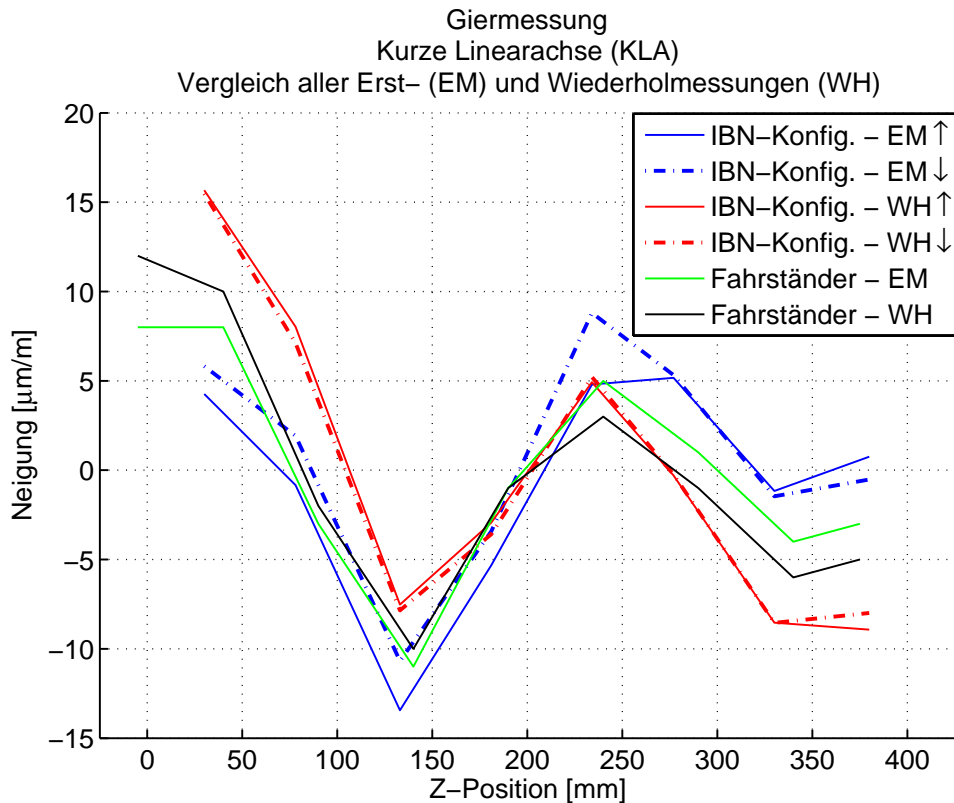


Bild 6.12: Gesamtvergleich der Giermessungen an der KLA. Die Verläufe sind gut reproduzierbar. Die Streuung liegt im Bereich der Messunsicherheit.

Differenz maximal 5 %. Bis 30 Hz sind die Starrkörpermoden der Aufspannplatte dominant, danach treten erste Strukturmoden auf.

Einige Moden traten zwar in der EMA oder in der Berechnung auf, konnten aber in der jeweils anderen Untersuchung nicht identifiziert werden. Alle betroffenen Frequenzen liegen nah an einer anderen Eigenfrequenz, so dass eine schlecht wahrnehmbare Vermischung der Moden nicht ausgeschlossen werden kann, insbesondere bei kleinen Amplituden.

Die Maschinenmodelle im ABK wurden gemäß dem in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Vorgehen erstellt. Die Modulmodelle werden dabei unverändert eingebunden und nur bei Bedarf manuell adaptiert. Bei der Fahrständerkonfiguration beispielsweise erfolgte dies aufgrund der ungleichen Massenverteilung auf dem Schlitten der LLA einzig an den betreffenden Führungssteifigkeiten.

Tabelle 6.1: Vergleich der Eigenfrequenzen der Fahrständerkonfiguration gemäss Messung mit experimenteller Modalanalyse und Berechnung im ABK

Modalanalyse (MA)		Unterschied in %	Berechnung im ABK		Mode Typ
Mode Nr.	Frequenz [Hz]	bezogen auf MA	Mode Nr.	Frequenz [Hz]	
1	4.17	5.5	1	4.4	X-Translation
2	4.58	3.5	2	4.7	Y-Translation
	konnte nicht identifiziert werden		3	5.67	C-Rotation
3	9.89	-2.8	4	9.6	B-Rotation
	konnte nicht identifiziert werden		5	10.4	Z-Translation
4	12.5	-2.4	6	12.2	A-Rotation
5	29.46	-12.8	7	25.7	B-Torsion
6	33.15	1.7	8	33.7	A-Rotation KLA
7	41.93	-3.7	9	40.4	B-Torsion
8	73.64	-3.3	10	71.2	C-Rotation KLA
9	82.3	-8.7	11	75.2	Z-Translation Spindel
10	86.23	konnte nicht identifiziert werden			
11	94.39	7.0	13	101	2. B-Torsion
12	109.3	-11.6	12	96.7	1. A-Biegung
13	115.3	-4.6	14	110	X-Antrieb

Crosstalk-Messungen – Dynamisches Verhalten

Das dynamische Verhalten von Werkzeugmaschinen wird mittels Crosstalk-Messungen analysiert. Dabei werden die Querabweichungen des TCP von einer programmierten Bahn gemessen. Zur Beurteilung einer Rekonfiguration aus den Prototypmodulen erfolgte eine Untersuchung an der FS-Konfiguration. Der Vergleich der Messergebnisse mit den im ABK simulierten Bahnen lässt Rückschlüsse auf die Modellierung des geregelten Maschinensystems sowie dessen Verwendung zur virtuellen Maschineninbetriebnahme zu.

Als Soll-Bahn wurde eine achsparallele Positionierbewegung über eine Distanz von $s = 150$ mm gewählt. Gemessen wurden die Abweichungen an beiden Achsen jeweils in beiden Querrichtungen bei programmierten Soll-Geschwindigkeiten von $v = 0.2, 0.5, 2, 5$ und 20 m/min sowie einer maximalen Achsbeschleunigung von $a = 1$ bzw. $a = 3$ m/s². Zur Verifikation der Modellierung, insbesondere des Antriebsstrangs, wurden die Messungen mit vier verschiedenen Reglereinstellungen (RE) durchgeführt, welche wie nachfolgend beschrieben ermittelt wurden:

- a) Reglereinstellungen nach Selbstoptimierung der Steuerung:

Für die Reglerinbetriebnahme bietet die Siemens 840D eine Funktion an, mit der die

Verstärkungsfaktoren und Nachstellzeiten der Geschwindigkeits- und Stromregler automatisch eingestellt werden. Die Steuerung erfasst dazu den Frequenzgang am Motor. Dies erfolgt durch Aufbringen eines Krafrauschens über den Motor, wodurch der Antriebsstrang in Schwingung versetzt wird und die Eigenfrequenzen angeregt werden.

- b) Reglereinstellungen nach manueller Inbetriebnahme an der Steuerung:
Für die manuelle Inbetriebnahme stellt die Steuerung Analyse-Funktionen zur Verfügung, mit denen verschiedene Übertragungsfunktionen über die integrierten Messsysteme ermittelt werden können. Damit lassen sich die Steuerungsparameter konventionell durch Iteration einstellen.
- c) Reglereinstellungen nach Rechenregeln auf Basis der ABK-Modelle:
Dieser modellbasierte Ansatz berechnet die Parameter gemäss den in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Formeln nach [155], welche im ABK implementiert sind. Zur Berechnung der Parameterwerte werden die benötigten Angaben über Trägheiten und Motordaten direkt dem Modell entnommen.
- d) Reglereinstellungen nach simulationsbasierter Inbetriebnahme mittels ABK:
Die erstellten mechatronischen Modelle werden wie in Abschnitt 4.2.2 erläutert hinsichtlich ihres Verhaltens im Zeitbereich untersucht. Die simulationsbasierte Inbetriebnahme bezeichnet ein iteratives Vorgehen, bei dem die für die Simulation verwendeten Parameterwerte manuell angepasst werden.

Die verwendete Hard- und Software der Steuerung bietet nur Funktionen zur Selbstinbetriebnahme des Strom- und des Geschwindigkeitsregelkreises. Der Lageregler muss manuell eingestellt werden. Sämtliche Analysefunktionen der Steuerung können nur auf die Informationen der an die Steuerung angeschlossenen Messsysteme zurückgreifen. Das Verhalten am TCP wird nicht erfasst. Die modellbasierten Ansätze berücksichtigen die modellierte Maschinenstruktur und dadurch entstehenden Trägheitsverhältnisse. Über die Rechenregeln lassen sich Parameterwerte für alle drei Regelkreise bestimmen. Die auf die vier beschriebenen Arten ermittelten Reglereinstellungen sind in Tabelle 6.2 aufgelistet. Die an der Maschine bestimmten Reglereinstellungen sind deutlich dynamischer als die modellbasiert ermittelten, was darauf zurückzuführen ist, dass an der Steuerung nur die Frequenzgänge zur Beurteilung herangezogen werden. Andere Probleme, beispielsweise an den Antrieben auftretendes Quantisierungsbrummen, das eine Reduzierung der Werte erfordert, bleiben dabei unberücksichtigt. Zudem zielen die in Abschnitt 4.1.2 erläuterten Formeln zur Bestimmung der Regelungsparameter auf das Dämpfungsoptimum im Geschwindigkeitsregelkreis, was zu moderaten Einstellwerten führt. Erfahrungsgemäss können die damit bestimmten Werte noch um 10% - 30% angehoben werden, während die Werte aus der Selbstinbetriebnahme reduziert werden müssen.

Tabelle 6.2: Vergleich der verschiedenen Reglereinstellungen (RE) für die Messungen.

<i>Grösse</i>	Geschwindigkeits- verstärkung	Nachstell- zeit	Lageregel- verstärkung	Stromregler- verstärkung	Stromregler- nachstellzeit
	K_p	T_n	K_v	K_{pi}	T_{ni}
<i>Einheit</i>	[Nms/rad]	[ms]	[m/min/mm]	[V/A]	[ms]
<i>Achse 1 (LLA)</i>					
RE a)	4.146	10.74	1 (Standard)	25.4	2
RE b)	4.5	10.74	3	25.4	2
RE c)	1.790	21.96	2.0231	18.6	2
RE d)	1.5	15	0.9	18.6	2
<i>Achse 2 (KLA)</i>					
RE a)	4.875	8.59	1 (Standard)	25.4	2
RE b)	5.5	8.59	3	25.4	2
RE c)	2.615	10.19	2.0231	18.6	2
RE d)	3.5	8	0.9	18.6	2

Zum Vergleich mit der insgesamt 160 Einzelmessungen umfassenden Messreihe wurde die Positionierbewegung mit dem ABK simuliert, allerdings mit nur einer Geschwindigkeit $v_{sim} = 20$ m/min und einer Beschleunigung $a_{sim} = 3$ m/s², welche bei einer Wiederholungssimulation auf $a_{sim} = 2$ m/s² reduziert wurde. In der Simulation war eine Ruckbegrenzung auf 300 m/s³ aktiv und der Geschwindigkeitsvorsteuerungsfaktor war jeweils auf Null gesetzt. Bild 6.13 zeigt links den am TCP gemessenen Crosstalk in z-Richtung bei Beschleunigung in x-Richtung (EZXPp) für die vier Reglereinstellungen. Die Messungen erfassen jeweils die Abweichung zwischen Spindel und Aufspannplatte während einer Positionierbewegung der LLA und zeigen die typischen Auslenkungen beim Beschleunigen und Abbremsen einer Achse. Deutlich erkennbar ist der jeweils grössere Crosstalk-Wert für RE b) und c), hervorgerufen durch den im Vergleich zu RE a) und d) grösseren K_v -Faktor.

Die in Bild 6.13 rechts dargestellte simulierte Bahn gleicht qualitativ den gemessenen Bahnen. Die Tendenz der Abweichungen, signifikante Wendepunkte sowie Relation der maximalen Crosstalk-Werte zwischen RE c) und d) sind vergleichbar. In allen Vergleichen zeigt sich jedoch eine deutliche Abweichung der absoluten Crosstalk-Werte. Untersuchungen der Simulationsmodelle zeigten, dass der Grund dafür in Effekten zu suchen ist, die bei der Aufbereitung der Stromsollwerte in der Steuerung auftreten. Die von der Steuerung bewirkte Bestromung der Antriebe weicht eklatant vom theoretisch berechneten Profil ab. Eine in der Steuerung eingestellte Maximalbeschleunigung von $a = 3$ m/s² entspricht in etwa einer effektiven Beschleunigung a_{eff} von nur 2 m/s² [70].

Der Vergleich der Messungen mit der Simulation lässt die Aussage zu, dass das dynamische Verhalten einer aus Modulen erstellten Maschinenkonfiguration mit dem ABK mit

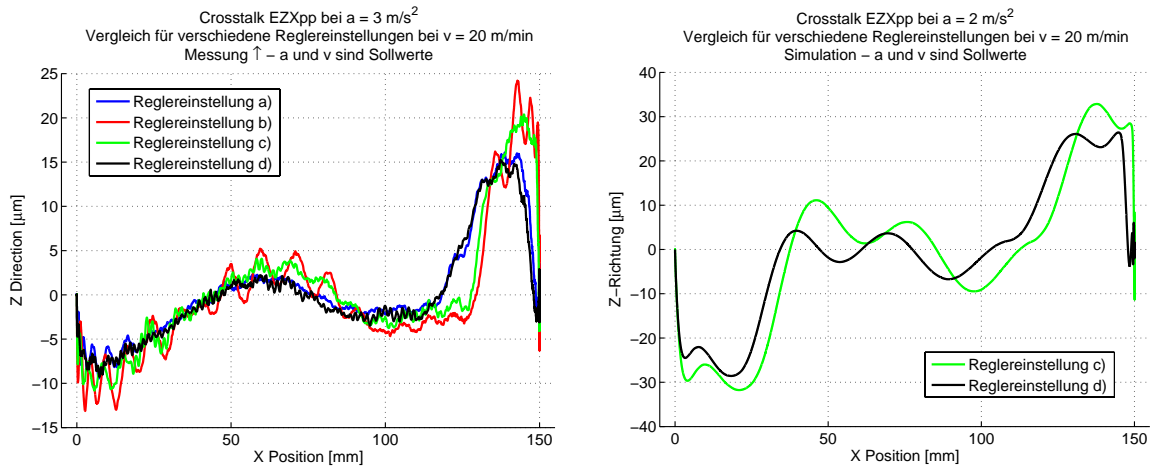


Bild 6.13: Vergleich des Crosstalks in Messung und Simulation für verschiedene Reglereinstellungen. Aufgezeichnet sind die Abweichungen in vertikaler Richtung bei einer Positionierbewegung der FS-Konfiguration in x-Richtung mit $v = 20$ m/min und einer effektiven Beschleunigung von $a_{\text{eff}} = 2$ m/s².

bestimmten Einschränkungen untersucht werden kann. Der Effekt wichtiger Reglereinstellungen kann qualitativ vorhergesagt werden. Um quantitativ korrekte Ergebnisse zu erhalten, ist ein Antriebsmodell nötig, das steuerungsinterne Spezifika insbesondere bei der Strom-Sollwertgenerierung präziser nachbildet.

6.3.4 Erkenntnisse aus den Rekonfigurationen

Der Praxistest des Rekonfigurationsablaufs mit den Prototypmodulen ist ein essentieller Bestandteil dieser Arbeit. Damit konnte gezeigt werden, dass die Rekonfiguration einer Maschine nach dem entwickelten Ablauf grundsätzlich erfolgreich möglich ist. Die entstehenden Maschinenkonfigurationen lassen sich mit Hilfe der vorab generierten Steuerungsarchive effizient in Betrieb nehmen. Die physikalischen Eigenschaften der auf diese Weise zusammengesetzten Maschinenkonfigurationen lassen sich mittels ABK vorhersagen und liegen im Rahmen der im Werkzeugmaschinenbau üblichen Wertebereiche.

Nachfolgend sind einige interessante, während der Rekonfigurationen und Messungen gewonnene Erkenntnisse zusammengefasst:

- **Modulkonstruktion:** Die Module sind robust, ihr kinematisches Verhalten ändert sich auch bei mehrfacher Rekonfiguration nicht. Mit Ausnahme des Einflusses der Aufspannplatte, zeigen die Messungen weitgehend deterministisches Verhalten. Dies sind gute Voraussetzungen für die automatische Ableitung eines kinematischen Kompensationsmodells zur Parametrierung der Steuerung.

- **Modulschnittstelle:** Die Ausrichtung der Module mittels dreier Anschläge ist eine zufriedenstellende, kostengünstige Lösung. Die Fixierung mit Schrauben ist günstig, aber zeitintensiv. Für den kommerziellen Einsatz müsste die erreichbare Wiederholgenauigkeit bei der Montage im Detail untersucht werden. Auch andere kinematisch saubere Anbindungen nach [122] müssten geprüft werden.
- **Modulhandling:** Die kompakte Bauweise der Module, bei der die Komponenten so weit wie möglich integriert sind, hat sich bewährt. Den Handlingvorrichtungen am Modul bzw. den Anbringungsmöglichkeiten muss von Anfang an Aufmerksamkeit geschenkt werden. Ungünstig angebrachte Haltevorrichtung erschweren und verlangsamen den Transport sowie die Ausrichtung der Module. Nachträgliches Austarieren der Module ist kaum möglich.
- **Maschinenbasis:** Die Beschaffenheit der Unterlage, auf der die Module montiert werden, ist ein kritischer Faktor. Die als Maschinenbett verwendete Aufspannplatte gilt als Ursache auffälliger Variationen der kinematischen Genauigkeit bei unterschiedlicher Positionierung der Module darauf. Ein für den Einsatz in der Produktion geeignetes Maschinenbettsystem für rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen muss als eigenständiges Modul betrachtet werden, dessen Eigenschaften die geometrischen und dynamischen Eigenschaften des Maschinensystems wesentlich beeinflussen.
- **Modulmodelle:** Die Modellierung der Module nach dem angepassten Starrkörperansatz hat sich als sehr effizient erwiesen. Die Analyse des Frequenzverhaltens im ABK liefert sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der experimentellen Modalanalyse, was für eine korrekte Abbildung der Struktur spricht. Die Strukturmodelle erlauben die Vorhersage der Maschinendynamik, womit sie künftig zur Kompensation von Unzulänglichkeiten über die Steuerung verwendet werden könnten.
- **Antriebsmodell:** Das detaillierte Antriebsmodell ermöglicht die qualitative Evaluierung des dynamischen Verhaltens der geregelten Maschine. Hier hat sich gezeigt, dass die Modellierung des Antriebsstrangs noch suboptimal ist. Gewisse Effekte, die bei der Sollwertgenerierung in der NC auftreten, entgehen dem Modell. Der Einfluss der konkret eingesetzten Steuerung muss als kritisch für die Erlangung quantitativ korrekter Simulationsergebnisse angesehen werden. Die Mitarbeit des jeweiligen Steuerungsherstellers bei der Erstellung der Modelle ist unerlässlich.

7 Abschluss

Mit der vorliegenden Arbeit wurde der Einsatz rekonfigurierbarer WZMn als wandelbares Produktionsmittel in der Serienfertigung aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet. Abschliessend wird nun ein Fazit gezogen, in dem die erzielten Resultate diskutiert, und Potentiale, aber auch Risiken aufgezeigt werden. Ein Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten, die für eine erfolgreiche Umsetzung des Konzepts erforderlich sind, sowie auf Szenarien, die nicht in unmittelbarer Zukunft industriell realisierbar sein werden, rundet das Kapitel ab.

7.1 Fazit

Um Schlüsse aus dieser Arbeit zu ziehen, wird zunächst diskutiert, inwieweit die erzielten Resultate der in Abschnitt 2.7 formulierten Zielsetzung gerecht werden.

Das erste Teilziel dieser Arbeit war eine Beschreibung von Einflussparametern auf die Wirtschaftlichkeit rekonfigurierbarer WZMn. Aufbauend darauf sollte ein Satz von Einsatzszenarien für rekonfigurierbare WZMn entwickelt werden. In Kapitel 3 wurden dazu Merkmale zur Beschreibung von WZMn herausgearbeitet, anhand derer die Stärken und Schwächen von Sondermaschinen, herkömmlichen WZMn sowie rekonfigurierbaren WZMn deutlich werden. In einer separaten Betrachtung wurden die relevanten Einflussfaktoren auf die Stückkosten bestimmt. Die Kombination dieser beiden Ergebnisse zeigt, dass mit rekonfigurierbaren WZMn in der Mittelserienfertigung deutliche Kostenvorteile zu erzielen sind. Das trifft insbesondere dann zu, wenn eine rekonfigurierbare WZM mehrere andere Maschinen ersetzt. Damit wurden die geforderten Einsatzszenarien beschrieben und mit einer exemplarischen Kostenrechnung belegt.

Die in Kapitel 4 dargelegte Methodik sowie die Implementierung essentieller Funktionen eines integrierten Rekonfigurierungstools im ABK erfüllen das zweite Teilziel. Aus gekapselten Modulmodellen lässt sich ein mechatronisches Maschinenmodell erstellen, das eingehend analysiert werden kann. Die im Modell hinterlegten Daten werden direkt zur Ableitung der Steuerungskonfiguration einer rekonfigurierten Maschine verwendet. Damit wurde gezeigt, dass eine durchgängige Kette von der Simulation verschiedener Maschi-

nenkonfigurationen zur Abschätzung ihrer Eigenschaften bis zur Übertragung kompletter Konfigurationsarchive auf eine Maschinensteuerung realisierbar ist. Der in dieser Arbeit gewählte Weg nutzt zur Erstellung der maschinenlesbaren Steuerungsarchive zwar Software des Steuerungsherstellers, dies jedoch einzig deshalb, da die Archive in einem proprietären Format geschrieben sind, dessen Struktur nicht offengelegt ist. Dazu wird die im ABK erstellte Steuerungskonfiguration in einem neutralen Datenformat abgespeichert und in die Software des Steuerungsherstellers importiert. Unter Einbezug des Steuerungsherstellers wäre die Integration in ein einziges Tool möglich.

Zur Erreichung des dritten Teilziels wurden die in Kapitel 5 beschriebenen Prototypmodule entwickelt. Aus diesen lassen sich wie gefordert verschiedene Maschinenkonfigurationen montieren, die im Labor eingehend messtechnisch analysiert werden können. Jedes einzelne Modul wurde im Detail untersucht, so dass umfassende Informationen darüber vorliegen. Werden zusätzliche Module nach der gleichen Systematik entwickelt, lassen sich weitere interessante Kinematikkonfigurationen realisieren.

In Kapitel 6 wurde schliesslich der Nachweis erbracht, dass die vorgeschlagene Methodik prinzipiell anwendbar ist, was als viertes und letztes Teilziel gesetzt war. Die aus den Modulen zusammengesetzten Maschinenkonfigurationen sind unmittelbar nach Übertragen des Steuerungsarchivs in funktionsfähigem Zustand. Die Untersuchungen der Maschinenkonfigurationen zeigen gute Reproduzierbarkeit der geometrischen Eigenschaften, die sich direkt auf die Einzelmodule zurückführen lassen. Auch die modellbasierten Vorhersagen über das Frequenzverhalten wurden bestätigt. Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Optimierung der Regelungsparameter auf Basis von Simulationen im Zeitbereich. Die Simulation führt zu deutlich konservativeren Reglereinstellungen als sie tatsächlich eingestellt werden können. Optimierungsbedarf besteht demnach an den Simulationsmodellen des Antriebsstrangs inklusive Steuerung und Regelung – insbesondere der Stromsollwertgenerierung –, der Ermittlung und Berücksichtigung der relevanten Dämpfungswerte (Aufstellung, Modulankopplung) sowie Algorithmen zur automatisierten Suche optimaler Regelungsparameter. Auch die Notwendigkeit der Berücksichtigung weiterer Maschinen- bzw. Modulparameter zur Optimierung der Regelungsparameter wäre zu untersuchen.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass rekonfigurierbare WZMn in der Serienfertigung unter gewissen Voraussetzungen eine wirtschaftlich vorteilhafte Alternative darstellen. Die technische Machbarkeit des Konzepts wurde nachgewiesen, indem eine durchgängige Kette ausgehend von der Generierung von Konfigurationsvarianten über deren Analyse und Bewertung bis hin zur Inbetriebnahme der Maschinen mit Hilfe automatisch generierter Steuerungsarchive aufgezeigt wurde. Das Vorgehen zur automatisierten Steuerungskonfigurierung wurde zwar vor allem für rekonfigurierbare WZMn entwickelt, kann aber auch bei herkömmlichen WZMn eingesetzt werden und dort die Inbetriebnahme beschleunigen.

Neben den beschriebenen Einsatzszenarien bergen rekonfigurierbare WZMn weitere Potentiale, die je nach technologischer Entwicklung und unternehmerischer Rahmenbedin-

gungen zum Tragen kommen. Die modulare Bauweise prädestiniert rekonfigurierbare Maschinen für bedarfsorientierte Konfigurationen, die sich durch parallelen Werkzeugeinsatz und Verfahrenskombinationen von herkömmlichen WZMn abheben. Damit erschliessen sich für kleine und mittlere Stückzahlen Fertigungsmöglichkeiten, die bislang der Grossserienproduktion vorbehalten waren.

Das derzeit in der EU laufende Verfahren zur Erarbeitung von Richtlinien zur Energieeffizienz von WZMn [30, 31] sowie die in letzter Zeit merklich gestiegene Sensibilität der Gesellschaft für Umweltfragen konfrontiert nicht nur die Werkzeugmaschinenhersteller, sondern auch die Anwender mit neuen Anforderungsprofilen. Rekonfigurierbare WZMn könnten in diesem Umfeld neue Akzente setzen. Als Produktionsmittel, das speziell auf eine bestimmte Arbeitsaufgabe ausgelegt ist, verfügt eine solche Maschine nur über die für die Bearbeitung erforderlichen Module und Funktionalitäten. Somit werden keine überflüssigen Verbraucher betrieben, und die bewegte Masse kann ebenfalls minimiert werden. Denkbar ist auch der Einsatz besonders energieeffizienter Module für bestimmte Aufgaben bzw. ein frühzeitiger Austausch von Modulen mit schlechtem Wirkungsgrad.

Ein weiterer Aspekt, bei dem die Rekonfigurierbarkeit Vorteile aufweisen kann, ist die Maschinenverfügbarkeit. Durch den schnellen Austausch kompletter Module kann eine Maschine innerhalb kurzer Zeit wieder produzieren, während die Reparatur samt ggf. erforderlicher Fehlersuche am ausgewechselten Modul ohne Zeitdruck in der Service-Werkstatt erfolgen kann. Dieser Aspekt lässt sich auch allgemeiner als Wartungsfreundlichkeit interpretieren, da die Zugänglichkeit der Maschine und ihrer Komponenten durch Demontage von Modulen deutlich erleichtert wird. Voraussetzung ist natürlich, dass die Module selbst auch wartungsfreundlich konzipiert sind.

Den genannten Potentialen stehen stets Risiken gegenüber. Entscheidend für den Erfolg eines neuartigen Konzepts ist die Akzeptanz der Kunden. In der Anwenderumfrage wurde gehäuft die Ansicht geäußert, die heute verwendete Steuerungstechnik sei zu kompliziert und überfordere viele Benutzer. Ein kommerziell verwertbares integriertes Rekonfigurierungstool muss deshalb weitgehend automatisiert arbeiten und dem Benutzer ausreichend Hilfestellung geben, vor allem bei der Konfigurierung der Steuerung, aber auch bei der Evaluierung und Auswahl von Maschinenkonfigurationen oder der Parameteroptimierung. Ein weiteres Hemmnis bei der Umsetzung kann in der Werkzeugmaschinenbranche selbst liegen, die als sehr konservativ gilt [54]. Das Festhalten an bewährten Konzepten und die Fokussierung auf immer komplexere Hochleistungsmaschinen mit beachtlicher Funktionsvielfalt ist der Einführung des neuen Konzepts der rekonfigurierbaren WZM mit tendenziell einfacheren Modulen und reduzierten Funktionen hinderlich.

Damit rekonfigurierbare WZMn für einen Maschinenanwender eine attraktive Alternative darstellen, muss eine kritische Mindestanzahl an Modulen verfügbar sein. Erst wenn aus diesen Modulen genügend sinnvolle Konfigurationen zusammengestellt werden können, kommen die Vorteile des Konzepts zum Tragen. Ein Hersteller allein wird diese kritische Anzahl nur schwer erreichen können. Ggf. sind in diesem Fall neue Geschäftsmodelle nö-

tig, die Zugriff auf Modulpools gewähren, wie bereits in [90] beschrieben.

Der Umbau von Maschinen bei einem und durch einen Anwender stellt eine neue Dimension möglicher Gefahren im Betrieb dar. Gerade bei der Inbetriebnahme geht von unvorhergesehenem Maschinenverhalten aufgrund von möglichen Steuerungs- bzw. Konfigurationsfehlern Gefahr für Menschen aus. Die Schulung des damit betrauten Personals und damit die Entwicklung eines adäquaten Gefahrenbewusstseins sind kritische Themen, die bei Nichtbeachtung zu heiklen Situationen führen. Durch geeignete technische Massnahmen sind aber auch diese Risiken beherrschbar.

7.2 Ausblick auf weiterführende Forschungsarbeiten

Diese Dissertation zeichnet einen Weg zu Aufbau und Nutzung rekonfigurierbarer WZMn in der Serienproduktion, wirft aber gleichzeitig eine Reihe neuer Fragen auf. Bis solche Maschinen in der Industrie eingesetzt werden können, besteht in vielen Bereichen noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick, welche Aspekte vertieft untersucht werden sollten, um die Thematik voranzutreiben.

- **Konsolidierung der Modellierung:** Die bestehenden mechatronischen Modelle ermöglichen gute Vorhersagen des physikalischen Verhaltens sowie die Ableitung einer funktionierenden Steuerungskonfiguration. Im Sinne einer schlanken und konsistenten Datenhaltung ist jedoch zu prüfen, ob alle enthaltenen Informationen benötigt werden und umgekehrt ob alle benötigten Informationen enthalten sind. Eine Reduzierung auf die kritischen Parameter, also diejenigen mit signifikantem Einfluss, ist anzustreben.
- **Automatisierung Erstellung der PLC-Konfiguration:** Die Definition der Hardware-Konfiguration erfordert bislang, so wie auch nach der Einbindung zusätzlicher PLC-Programmblöcke, einen manuellen Benutzereingriff. Ideal wäre die Integration dieser Vorgänge in das Rekonfigurierungstool, bestenfalls mit angepassten Ausgabeoptionen für verschiedene Steuerungsfabrikate.
- **Verifizierung von PLC- und NC-Code mittels erweiterter Simulationsmodelle:** Zum Testen der PLC-Programme wäre die direkte Anbindung an eine erweiterte Simulationsumgebung interessant. In Fortführung der bisherigen Arbeiten könnten die Modelle im *Machine Simulator* mit physikalischen Angaben angereichert werden, womit realistischere Simulationen möglich wären. Bisher rein kinematische Simulationen zur Verifizierung von NC-Code könnten auf diese Weise dynamische Effekte berücksichtigen.
- **Nutzung eines kinematischen Kompensationsmodells:** Die Resultate der geometrischen Prüfungen an den einzelnen Modulen können zur Erstellung eines kinemati-

schen Kompensationsmodells für die jeweilige Maschinenkonfiguration genutzt werden. Aus diesem Modell liesse sich die Parametrierung der in der Steuerung verfügbaren Kompensationen ableiten und direkt im Steuerungsarchiv übertragen.

- **Integration eines dynamischen Kompensationsmodells:** In einem nächsten Schritt wäre die Verwendung eines dynamischen Kompensationsmodells sinnvoll, das zur Laufzeit auf der Steuerung ausgewertet wird. Gerade bei rekonfigurierbaren WZMn, die aufgrund ihrer Modularität stets grössere strukturelle Unzulänglichkeiten aufweisen werden, verspricht dieser Ansatz deutliche Verbesserung. Da zu allen Modulen detaillierte Modelle existieren, bieten sich rekonfigurierbare WZMn erst recht für den Einsatz von Kompensationsmodellen an.
- **Simulation des thermischen Verhaltens:** Thermisch induzierte Deformationen an WZMn zählen zu den Hauptursachen für Ungenauigkeit an Werkstücken. In den letzten Jahren wurden Simulationsmethoden entwickelt, mit denen sich der Temperaturgang von Maschinen sehr effizient vorhersagen lässt. Die für diese Simulationen erforderlichen Informationen sollten in die mechatronischen Modulmodelle integriert werden, um die ausgewählten Maschinenkonfigurationen vor dem realen Zusammenbau auch hinsichtlich ihres thermischen Verhaltens zu analysieren.
- **Automatische Generierung von Konfigurationsvarianten für eine Fertigungsaufgabe:** Mit steigender Anzahl erhältlicher Module nimmt die Menge theoretisch möglicher Varianten rasant zu. So wie ein CAM-Programm zu einem Bauteil NC-Code generieren kann, wäre für rekonfigurierbare WZMn eine Erweiterung denkbar, die eine geeignete Maschinenkonfiguration aus den verfügbaren Modulen vorschlägt. Die Ansätze der in Abschnitt 2.2 erwähnten Arbeiten zur Findung geeigneter Kinematikvarianten für eine gegebene Bearbeitungsaufgabe müssten dazu in ein CAM-Tool integriert werden. Für einen durchgängigen Datenfluss wird zudem eine Schnittstelle zum Rekonfigurierungstool benötigt.
- **Eine universelle Basis für vielfältige Maschinenkonfigurationen:** Das Maschinenbett ist die Basis für den Aufbau unterschiedlicher Konfigurationsvarianten. Es muss ausreichend Flexibilität bei der Anbindung der Maschinenmodule bieten, damit nicht für jede Konfiguration ein neues Maschinenbett benötigt wird. Anpassungen bzw. Erweiterungen des Maschinenbetts sollten bei Bedarf auf kostengünstige und effiziente Weise möglich sein.
- **Anwenderfreundliche und genaue Modulschnittstelle:** Die an der Prototypmaschine verwendete Modulschnittstelle ist robust, kostengünstig und ermöglicht unterschiedliche Orientierungen der Module. Für den Einsatz in der Praxis sollte die Handhabung der Schnittstelle anwenderfreundlicher gestaltet werden, um die Zeit für den

Wechsel der Module zu reduzieren. Zudem wäre eine kinematisch saubere Lösung z.B. nach den Ansätzen in [122] erstrebenswert.

- Robuste Methoden zur Justierung: In praktischen Tests sollte die Notwendigkeit verschiedener Justierungsmöglichkeiten beim Zusammenbau der Maschinenmodule untersucht werden. Bei identifiziertem Bedarf müssen zuverlässige und robuste Methoden entwickelt werden, die auch nach wiederholtem mechanischen Umbau noch zu wiederholgenauen Resultaten führen.
- Geschäftsmodelle für Hersteller und Betreiber: Maschinenhersteller wollen neue Maschinen verkaufen, das Konzept der Wiederverwendbarkeit von Modulen, vielleicht sogar mit Modulen anderer Hersteller, passt nicht zu ihrem bisherigen Geschäftsmodell. Aus diesem Grund werden neue Geschäftsmodelle für Modulhersteller, aber auch für die Maschinenbetreiber benötigt. Miet- und Poolkonzepte, eventuell auch Dienstleistungskonzepte in denen die erbrachte Fertigungsleistung im Vordergrund steht, sind mögliche Ansätze. Vielversprechende Modelle sind zu untersuchen und geeignete Modelle auszuarbeiten (vgl. [90]).

In fernerer Zukunft sind Szenarien denkbar, in denen ein übergeordnetes Modulverwaltungssystem selbstständig passende Maschinenkonfigurationen für die anstehenden Bearbeitungsaufgaben erstellt und auch zusammensetzt. Das übergeordnete System kann dabei an eine Art „Grundmaschine“ gekoppelt sein oder aber einen ganzen Bereich in einer Werkhalle verwalten. Die Maschinenmodule würden dann, ähnlich wie heute Werkzeuge und Werkstückpaletten, aus einem Modullager entnommen und zu Maschinen zusammengesetzt. Die Konfigurierung der Steuerung erfolgte nach der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik automatisch durch das Modulverwaltungssystem.

In der Werkzeugmaschinenforschung wird bereits an mechatronischen Strukturelementen gearbeitet, in die beispielsweise Piezoelemente integriert sind, die sowohl sensorische wie auch aktorische Funktionen übernehmen können. Deshalb sowie wegen ihrer Auflösung im Nanometer-Bereich eignen sie sich für aktive Kompensationen mit Hüben im niedrigen μm - und Sub- μm -Bereich, wie sie bei rekonfigurierbaren WZMn an vielen Modulen sinnvoll eingesetzt werden könnten. Statische Kompensationen für bekannte geometrische Abweichungen liessen sich aus dem Maschinenmodell berechnen und bei der Steuerungskonfigurierung als Grundkompensationen einrichten. Diesen könnten dynamische Kompensationen überlagert werden, die aus dem bereits erwähnten Kompensationsmodell berechnet werden, das zur Laufzeit ausgewertet wird und woraus sich die Steuerspannung für den Piezoaktor bestimmen lässt. Bei rekonfigurierbaren WZMn sind solche aktiven Komponenten auch zur Justierung an der Modulschnittstelle denkbar.

Neben den in Kapitel 3 beschriebenen Einsatzszenarien in der herkömmlichen Teilefertigung könnten rekonfigurierbare WZMn auch für andere Zwecke eingesetzt werden. Durch

Miniaturisierung der Module eröffnet sich ein neues Anwendungsfeld in der Mikrobearbeitung. Die bisherige Forschung zu dieser mit „Square Foot Manufacturing“ oder „Desktop Factory“ umschriebenen Thematik behandelte Steuerungsaspekte nur am Rande [149]. Die Zusammenführung der Forschungsergebnisse kann dem Thema Rekonfigurierbarkeit weitere Impulse geben.

Zwar nicht als Miniatur-Ausführung, sondern als kompakte, mobile Maschine könnten rekonfigurierbare WZMn für Schulungs- und Testzwecke eingesetzt werden. Die Maschinen könnten sowohl in Ausbildungsstätten als auch bei Kundenbesuchen vor Ort eingesetzt werden. Aus der Industrie wurde bereits Interesse an dieser abgewandelten Form bekundet.

A Objekte im Datenmodell

Der Wertebereich von Zahlentypen entspricht dem Standardwertebereich des angegebenen Typs in Matlab. Für Variable, die diskrete Werte annehmen, werden in der Spalte „Bemerkungen“ die zur Verfügung stehenden Zustände aufgelistet.

Ein Pfeil \rightarrow mit Angabe einer anderen Klasse weist diese als Elternklasse aus, von der die Attribute und Methoden geerbt werden.

Matrizen und Vektoren werden in eckigen Klammern [] angegeben.

Leere Variable werden mit dem Leermengensymbol \emptyset gekennzeichnet.

Tabelle A.1: Attribute der abstrakten Modellklasse für einen Antrieb
Abstract Class Abstract Drive

Variable	Typ	Einheit	Defaultwert	Bemerkungen
Motor	Motor	[-]	\emptyset	
Encoder	Encoder	[-]	\emptyset	
MotorModule	MotorModule	[-]	\emptyset	
Type	String	[-]	\emptyset	
NomLoad	Double	[kg]	\emptyset	
MaxAcc	Double	[m/s ²]	\emptyset	
MaxJerk	Double	[m/s ³]	\emptyset	

Tabelle A.2: Attribute der Modellklasse für ein Antriebssystem mit Kugelgewindetrieb
Class Ball Screw Drive \rightarrow Abstract Drive

Variable	Typ	Einheit	Defaultwert	Bemerkungen
Ballscrew	Ballscrew	[-]	\emptyset	

Tabelle A.3: Attribute der abstrakten Modellklasse für eine allgemeine Komponente

Abstract Class Part

Variable	Typ	Einheit	Defaultwert	Bemerkungen
Manufacturer	String	[-]	∅	
Type	String	[-]	∅	

Tabelle A.4: Attribute der Modellklasse für einen Kugelgewindetrieb

Class Ball Screw → Part

Variable	Typ	Einheit	Defaultwert	Bemerkungen
Pitch	Double	[m]	0.01	
Diameter	Double	[m]	0.010	
Length	Double	[m]	1	
Preload	Double	[-]	0.05	
SpindleStiffness	Double	[N/m]	200e6	
NutStiffness	Double	[N/m]	600e6	
BearingStiffness	Double	[N/m]	400e6	
TotalStiffness	Double	[N/m]	∅	Automatische Berechnung
Note	String	[-]	∅	Für weitere Angaben, z.B. Bestellbezeichnung

Tabelle A.5: Attribute der Modellklasse für ein Messsystem

Class Encoder → Part

Variable	Typ	Einheit	Defaultwert	Bemerkungen
Version	String	[-]	∅	
Art	String	[-]	'ri'	ri, li, ra, la
IdentNo	String	[-]	∅	
SerialNo	String	[-]	∅	
nGeber	Integer	[-]	16384	
Teilungen	Double	[m]	10 / 1e6	
Interpolation_r	Integer	[-]	2048	

Tabelle A.6: Attribute der Modellklasse für einen Motor

Class Motor → Part

Variable	Typ	Einheit	Defaultwert	Bemerkungen
Mass_M	Double	[kg]	1	
Inertia_J	Double	[kg m ²]	1 / 1000	
Inductivity_L	Double	[H]	1 / 1000	
Resistance_R	Double	[Ohm]	1	
MotorConstant_KM0	Double	[Nm/A]	1	
VoltageConstant_VM	Double	[Vs/rad]	1 / 1000	
Current_Imax	Double	[A]	15	
Current_IN	Double	[A]	5	
Current_I0	Double	[A]	5	
Speed_nN	Double	[U / min]	3000	
Speed_nMax	Double	[U / min]	3000	
Torque_MN	Double	[Nm]	1	
Torque_M0	Double	[Nm]	1.3	
Encoder	Encoder	[-]	∅	
Brake	String	[-]	∅	Typbezeichnung

Tabelle A.7: Attribute der Modellklasse für eine Antriebseinspeisung

Class Motor Module → Part

Variable	Typ	Einheit	Defaultwert	Bemerkungen
PosCtrlCT_Tx	Double	[s]	1e-3	
VelCtrlCT_Tv	Double	[s]	125e-6	
CurCtrlCT_Ti	Double	[s]	125e-6	
Voltage_UZ	Double	[V]	600	
FilterFrequency_FftrDenom	Double	[Hz]	[2000 2000 2000 2000]	
FilterDampingNum	Double	[-]	[0.7 0.7 0.7 0.7]	
FilterDampingDenom	Double	[-]	[0.7 0.7 0.7 0.7]	
ActiveFilters	Double	[-]	∅	
FilterType	Cell	[-]	[PT2 PT2 PT2 PT2]	PT2; GSO
DeadTime_Ttot	Double	[s]	250e-6	

B Fragebogen zur Anwenderumfrage

Die Fragebögen wurden im Dezember 2006 an 55 kleine und mittlere Unternehmen (KMU) in der Schweiz versendet. Im April 2007 wurde der Fragebogen über ein Partnerinstitut in Deutschland an 400 dort ansässige Firmen geschickt. Aus der Schweiz lagen am Ende 24 und aus Deutschland 49 ausgefüllte Fragebögen vor. In der Schweiz wurde der Fragebogen nur an Unternehmen versendet, die auf eine vorgängige Anfrage per E-Mail die Beantwortung der Fragen nicht ausdrücklich abgelehnt hatten.

Die mittlere Antwortquote beträgt 16 % (Schweiz 41 %, Deutschland 12%). Die insgesamt 73 beantworteten Fragebögen wurden ab Juni 2007 ausgewertet.

Fragebogen zum Produktionszyklus in Fertigungsunternehmen

Aufbau des Fragebogens

Vielen Dank, dass Sie sich Zeit nehmen, diesen Fragebogen auszufüllen!

Es gibt heute viele verschiedene Behauptungen bezüglich der Entwicklung der Rahmenbedingungen und entscheidenden Einflussfaktoren in der Fertigung. Handfeste Daten liegen jedoch nicht vor, und die Ansichten unterscheiden sich stark.

In dem Fragebogen werden Sie mehrmals nach Daten gefragt, die gemittelt sind. Diese sehen z.B. so aus:

Ein Auftrag wird erteilt. Wie viel Zeit bleibt Ihnen bis zur ersten Lieferung?

Sie sollen hier also eine allgemeine Antwort geben, obwohl sicherlich dieser Zeitraum im Alltag unterschiedlich lang sein kann. Geben Sie einfach einen Durchschnittswert an.

Wir wissen, dass es nicht immer einfach ist, solche Fragen zu beantworten. Gerne können Sie auch Anmerkungen hinzufügen. Die Bögen werden manuell ausgewertet.

Der Fragebogen ist in drei Teile gegliedert: Gleich am Anfang des Fragebogens werden einige statistische Angaben über Ihr Unternehmen abgefragt, die wir zur Auswertung benötigen. Im zweiten Teil werden organisatorische Aspekte betrachtet und im dritten die eingesetzte Technologie.

Wenn Sie keine Aussage zu einer Frage treffen können oder wollen, streichen Sie die entsprechende Nummer einfach durch.

Damit der Fragebogen gewertet werden kann, sollten mindestens 70% der Fragen beantwortet sein.

Selbstverständlich werden alle Angaben streng vertraulich und anonym behandelt. Die Daten werden nur statistisch ausgewertet und anonymisiert verwendet oder veröffentlicht.

Wir danken Ihnen für die Teilnahme an unserer Befragung!

Ihr
IWF / inspire



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Teil 1: Statistische Daten

1. Wie viele Produktionsstandorte haben Sie?

- einen 2-3 4-6 7-10 > 10

a) Haben Sie Produktionsstandorte im Ausland? Wenn ja, in welchen Ländern?

- nein ja, in:
- _____

2. Wie viele Angestellte hat Ihr Unternehmen?

_____ Mitarbeiter

a) Wie viele davon arbeiten in der Produktion?

- max. 20% 20%-40% 40%-60% 60%-80% 80%-100%

b) Nach welchem Arbeitszeitmodell arbeitet Ihre Produktion?

i) Wochentage

- Mo-Fr Sa So Sa nur bei Bedarf So nur bei Bedarf

ii) Schichten

- 1-Schicht 2-Schicht 3-Schicht 2-Schicht nur bei Bedarf 3-Schicht nur bei Bedarf

Andere: _____

c) Wie hoch schätzen Sie die Auslastung Ihrer Produktionsmaschinen? (Während der Arbeitszeit)

- unter 50% 50%-70% 70%-80% 80%-90% 90%-100%

3. Wie lange behalten Sie eine Produktionsmaschine?

- bis 2 Jahre 2-4 Jahre 4-8 Jahre 8-12 Jahre mehr als 12 Jahre

a) Aus welchen Gründen kaufen Sie hauptsächlich neue Maschinen?

- alte ersetzen Kapazität erhöhen auf neuestem Stand bleiben Abschreibungsgründe neue Verfahren anwenden

4. Wie hoch ist Ihr jährlicher Umsatz ungefähr?

_____ Millionen CHF

5. Sind Sie ein Originalausrüstungshersteller (OEM)? D.h. Stellen Sie eigene Produkte her, die Sie unter Ihrem eigenen Namen in den Handel bringen? (In diesem Fall sind Sie kein Zulieferer)

- ja nein

Wenn ja, betrachten Sie bitte in den folgenden Fragen den „Kunden“ als den internen Auftraggeber, also z.B. die Konstruktion oder der Verkauf.



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

6. Stellen manche Branchen (z.B. Anlagenbau, Automobilbau, Luft- und Raumfahrtindustrie usw.) einen bedeutenden Teil Ihrer Kundschaft dar?

- Ja Nein

a) Wenn ja, welche Branchen sind das? Wie hoch ist jeweils der Anteil am Jahresumsatz?

trifft zu	grosser Anteil (ab 30 %)
<input type="checkbox"/> Anlagenbau	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Werkzeugmaschinenindustrie	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Automobilindustrie	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Luft- und Raumfahrtindustrie	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Personentransport- und Logistikunternehmen	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Energieerzeuger	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Elektroindustrie	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Elektronik	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Haustechnik (Installationen)	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Küchen- und Haushaltsgeräte	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Lebensmittelindustrie	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Landwirtschaft	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Pharmaindustrie	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Medizintechnik	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/>

Teil 2: Organisation

Zeitraum zwischen Anfrage und Produktionsbeginn:

7. Erhalten Sie eher Aufträge für Einzel- oder Serienfertigung?

- | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <10 Einzel-
fertigung | 10-100
Kleinserie | 100-1000
Mittelserie | 1.000-10.000
Grossserie | >10.000
Massenproduktion |

8. Wie verteilen sich Neu- und Folgeaufträge auf den Auftragseingang?

Folgeauftrag: Auftrag, der auf einem vorhergehenden Auftrag aufbaut oder diesen ersetzt.
Neuauftrag: Auftrag ohne Bezug auf einen anderen, bereits bestehenden Auftrag.

- | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 100%
Neuaufträge | 75 % / 25 % | 50% / 50% | 25 % / 75 % | 100 %
Folgeaufträge |

9. Wie viel Zeit verstreicht, nachdem Sie eine Anfrage erhalten haben, bis Sie dazu den Auftrag erhalten?

- | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 0-2 Wochen | 2-4 Wochen | 1-3 Monate | 3-6 Monate | >6 Monate |

10. In der Anfrage wurde ein Liefertermin gewünscht. Danach erhalten Sie den Auftrag. Weicht der Liefertermin im Auftrag von dem in der Anfrage ab?

- | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| >10 Wochen
früher | 1-10 Wochen
früher | +/- 1 Woche | 1-10 Wochen
später | > 10 Wochen
später |

11. Ein Auftrag wird erteilt. Wie viel Zeit bleibt Ihnen bis zur ersten Lieferung? Wie verteilen sich die Zeitspannen?

- | | | | | |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> _____ % | <input type="checkbox"/> _____ % | <input type="checkbox"/> _____ % | <input type="checkbox"/> _____ % | <input type="checkbox"/> _____ % |
| 0-2 Wochen | 2-4 Wochen | 1-3 Monate | 3-6 Monate | >6 Monate |



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

12. Ein Auftrag wird erteilt. Wie viel Zeit benötigen Sie, bis Sie frühestens mit der Produktion anfangen können? Wie verteilen sich die Zeitspannen?

- ____ % ____ % ____ % ____ % ____ %
 0-2 Wochen 2-4 Wochen 1-3 Monate 3-6 Monate >6 Monate

a) Wofür benötigen Sie am meisten Zeit?

- Material Werkzeug Vorrichtung Maschine Personal
 beschaffen beschaffen besorgen besorgen

Andere: _____

13. Erteilen Sie Unteraufträge, um die gewünschte Zahl liefern zu können? Beispiel: 250 Stück fertigen Sie selbst, den Rest geben Sie aus Kapazitätsgründen ausser Haus.

- gar nicht, 6 % - 33 % 34 % - 66 % 67 % - 100 %
 bis 5 % der Aufträge der Aufträge der Aufträge

14. Wie haben sich die Stückzahlen für einen Auftrag zur Fertigung eines Teils entwickelt? Betrachten Sie dafür bitte die vergangenen 5 – 10 Jahre und geben Sie eine Tendenz an: Die Stückzahlen sind ...

- deutlich grösser eher grösser gleich eher kleiner deutlich kleiner
 >+50 % bis + 50 % bis -50 % < -50 %

15. Wie hat sich die Laufzeit für einen Auftrag zur Fertigung eines Teils entwickelt? Betrachten Sie dafür bitte die vergangenen 5 – 10 Jahre und geben Sie eine Tendenz an: Die Laufzeiten sind ...

- deutlich länger eher länger gleich eher kürzer deutlich kürzer
 >+50 % bis + 50 % bis -50 % < -50 %

Während der Fertigung:

16. Für wie viele Kunden arbeitet Ihre Produktion gleichzeitig?

- 1 - 5 6 - 10 11 - 25 26 - 50 51-100 > 100

17. Welche Aspekte bereiten bei nachträglicher Änderung grosse bzw. kleine Probleme?

a) Erhöhung der Menge

- | gross | klein | trifft nicht zu | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Personal |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Gesetzgebung (Beispiel: Lärmemission) |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Maschinenleistung / Durchsatz |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Logistik |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Andere _____ |

b) Änderung bezüglich Teileigenschaften

- | gross | klein | trifft nicht zu | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Maschinenfunktionalität (Freiheitsgrade, Werkzeugbewegung) |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Maschinenleistung / Durchsatz |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Maschinenprogrammierung |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Genauigkeit / Toleranz |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Personal |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Andere _____ |



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

18. Flexible Produktionsmaschinen lassen sich innerhalb eines vom Hersteller vorbestimmten Rahmens anpassen.

Für welche der genannten Punkte trifft das bei Ihren Maschinen bereits heute zu?

Bei welchen Punkten ist mehr Flexibilität wünschenswert? (Bitte Dringlichkeit angeben)

Bereits heute	Wünschenswert	Dringlichkeit (6 = sehr dringend, 1 = nicht so wichtig)	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Bearbeitungstechnologie
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Produktionskapazität (Durchsatz, Geschwindigkeit)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Maschinenkinematik (Anzahl und Anordnung der Achsen, Hardware)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Werkstück-Spektrum (Arbeitsraum, Aufspannung)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Werkzeug-Spektrum
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Steuerungstechnik (Software)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Materialfluss / Verkettung
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	In-Prozess-Messung
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Andere: _____
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Andere: _____

19. Stellen Sie sich eine Maschine vor, die man aus Modulen frei zusammensetzen und bei Bedarf immer wieder umbauen kann: Durch wen sollte dieser Umbau erfolgen können? Wie dringlich sind diese Punkte?

Anwender	Maschinen-Hersteller	Dringlichkeit (6 = sehr dringend, 1 = nicht so wichtig)	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Bearbeitungstechnologie
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Produktionskapazität (Durchsatz, Geschwindigkeit)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Maschinenkinematik (Anzahl und Anordnung der Achsen, Hardware)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Werkstück-Spektrum (Arbeitsraum, Aufspannung)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Werkzeug-Spektrum
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Steuerungstechnik (Software)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Materialfluss
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	In-Prozess-Messung
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Andere: _____
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Andere: _____



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

Teil 3: Technologie

Dieser Teil des Fragebogens betrifft technologische Aspekte der Fertigung in Ihrem Unternehmen. Darunter sind Werkstücke und deren Eigenschaften, Maschinen sowie Verfahren zu verstehen. Mit diesen Fragen möchten wir herausfinden, ob sich Kategorien mit charakteristischen Eigenschaften definieren lassen, in die Fertigungsbetriebe entsprechend ihrer Struktur und ihren Bedürfnissen eingeordnet werden können.

20. Werden Werkstücke (d.h. Fertigteile) mit einer besonderen Geometrie besonders häufig angefragt?

- bei max. 20%
 bei 20%-40%
 bei 40%-60%
 bei 60%-80%
 bei 80%-100%

a) Wenn ja, was für Teile sind das? (Beispiele: Deckel, Gehäuse, Ventile, Wellen, Stifte usw.)

b) Wie gross sind diese Teile

Abmessungen: _____

c) Wie viel wiegen die Teile?

Masse: _____

21. Verarbeiten Sie Rohmaterial mit einer spezifischen Geometrie besonders häufig?

- bei max. 20%
 bei 20%-40%
 bei 40%-60%
 bei 60%-80%
 bei 80%-100%

a) Wenn ja, welche Geometrieform?

- Würfel
 Quader
 Zylinder
 Freiform

Andere: _____

i) Verarbeitung erfolgt als

- Stangenmaterial

22. Werden bestimmte Werkstoffe weitaus häufiger angefragt als andere?

- | | |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Allgemeine Baustähle | <input type="checkbox"/> Vergütungsstähle |
| <input type="checkbox"/> Automatenstähle | <input type="checkbox"/> Korrosionsbeständige Stähle (rostfrei) |
| <input type="checkbox"/> Einsatzstähle | <input type="checkbox"/> Werkzeugstähle |
| <input type="checkbox"/> Aluminium-/Legierungen | <input type="checkbox"/> Sonstige Nichteisenmetalle |
| <input type="checkbox"/> Kunststoffe | |

Andere: _____

23. Verwenden Sie Werkstoffe, die vor kurzem noch keine Rolle gespielt haben?

- Trifft zu
 Trifft eher zu
 Teils, teils
 Trifft weniger zu
 Trifft nicht zu

a) Wenn ja, welche Werkstoffe?

i) Erfordern diese Werkstoffe neue Maschinen zur Bearbeitung oder Änderungen an bestehenden?

- Trifft zu
 Trifft eher zu
 Teils, teils
 Trifft weniger zu
 Trifft nicht zu

ii) Erfordern diese Werkstoffe neue Werkzeuge zur Bearbeitung?

- Trifft zu
 Trifft eher zu
 Teils, teils
 Trifft weniger zu
 Trifft nicht zu



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

24. Haben sich die Anforderungen hinsichtlich Form-, Mass- und Lagetoleranzen in den letzten 5 Jahren geändert?

a) Allgemein

lockerer etwas lockerer gleich etwas enger enger

b) Oberfläche: R_a-Stufen bzw. N-Stufen

mehr als 1 lockerer bis 1 lockerer gleich bis 1 enger mehr als 1 enger

c) Masstoleranz: IT-Stufen

mehr als 1 lockerer bis 1 lockerer gleich bis 1 enger mehr als 1 enger

d) Lagetoleranz

> 50% lockerer bis 50% lockerer gleich bis 50% enger über 50% enger

e) Formtoleranz (Grobgestalt)

> 50% lockerer bis 50% lockerer gleich bis 50% enger über 50% enger

Andere: _____

25. In welchen Bereichen sehen Sie Weiterentwicklungsbedarf bei Werkzeugmaschinen?

ja	nein	Dringlichkeit (6 = sehr dringend, 1 = nicht so wichtig)	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Leistung / Schnelligkeit
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Genauigkeit
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Anpassung des Arbeitsraums / Zugänglichkeit
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Verschiedene Prozesse auf einer Maschine (gleichzeitig)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Anpassung der Maschine an eine Aufgabe (durch Umbau)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Kosten: Anschaffung, Unterhalt, Wartung
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Wartungsfreundlichkeit
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Einbindung in die Betriebsdatenerfassung
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Sicherheit
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Andere _____
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	___	Andere _____

26. Wie viele aktive Produktionsmaschinen (Fräsen, Drehen, Bohren, Schleifen) besitzen Sie zur Auftragsbearbeitung? (hierzu zählen NICHT Maschinen zur gelegentlichen Nachbearbeitung)

< 5 5 bis 9 10 bis 19 20 bis 29 30 bis 39 ≥ 40



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

27. Besitzen Sie eine oder mehrere Maschinen der folgenden Typen?

Bohren	Fräsen	Drehen	Schleifen	Andere Verfahren	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Einfache Maschine
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CNC-Maschine
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CNC-Zentrum (mit Werkzeug-Wechsler)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CNC-Zelle (mit Werkzeug- und Werkstück-Wechsler)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Rundtaktautomat
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Sondermaschine

28. Besitzen Sie ein Mehrachs-Bearbeitungszentrum?

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nein	Ja	Ja, mehrere

a) Wenn ja, mit wie vielen Achsen und Spindeln? Mit Drehschwenktisch?

i) Wie viele Achsen werden dabei gleichzeitig benutzt, d.h. synchron verfahren?

ii) Wieso haben Sie die Maschine angeschafft?

Für Serienfertigung

Dieser Teil ist nur relevant sofern Sie Serien fertigen.

29. Wie viele verschiedene Serien produzieren Sie gleichzeitig?

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1-5	6 - 10	11 - 25	26 - 50	51-100	> 100

30. Wie produzieren Sie verschiedene Varianten? Werden Aufträge komplett am Stück oder in Losen produziert?

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Auftrag am Stück	Auftrag in Losen	Perlenkette „in sequence“

31. Beobachten Sie starke Stückzahlschwankungen während der Fertigung von Serienteilen? D.h. müssen Sie von einem Serienteil, das Sie regelmässig liefern, unterschiedliche Mengen liefern? Beispiel: Laut Auftrag sollen alle 14 Tage 200 Stück eines Teils geliefert werden. Tatsächlich müssen dann aber einmal 170 Stück, ein anderes Mal 220 Stück geliefert werden. Die Schwankungsbreite beträgt dann $30/200 = 15\%$.

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Trifft zu	Trifft eher zu	Teils, teils	Trifft weniger zu	Trifft nicht zu

a) Wenn ja, wie hoch ist die Schwankungsbreite bezogen auf die ursprünglich geplante Stückzahl?

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
max. 20%	20%-40%	40%-70%	70%-100%	über 100%



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung
Institute of Machine Tools and Manufacturing

32. Sie haben bereits einen Auftrag und produzieren. Kommt es zu ungeplanten Verlängerungen oder Verkürzungen, die dazu führen, dass Sie die Produktion von einem Teil länger oder kürzer als erwartet laufen lassen sollen?

a) Produktion soll länger laufen:

- nein, bis 5 %
 6 % - 33 %
 bei 34 % - 66 %
 bei 67 % - 100 %

i) Wenn ja, aus welchen Gründen?

- Mehr Teile werden gebraucht
 Unerwartete Zwischenfälle kosten Zeit
 Produktlaufzeit wird verlängert

Andere: _____

b) Produktion soll kürzer laufen: (weniger Teile, Auftrag vorzeitig abgebrochen)

- nein, bis 5 %
 6 % - 33 %
 bei 34 % - 66 %
 bei 67 % - 100 %

i) Wenn ja, aus welchen Gründen?

- Weniger Teile werden gebraucht
 falsche Markteinschätzung
 Produkt wird eingestellt
 Endprodukt benötigt Teil nicht mehr
 Verlagerung der Produktion

Andere: _____

33. Haben Abweichungen der ursprünglichen Annahmen (Ihre oder die Ihres Kunden) Auswirkung auf Ihre laufende Produktion? Beispiel: Ihr Kunde bestellt 100 Teile pro Monat für sein neues Produkt. Aufgrund des unerwarteten Verkaufserfolges benötigt er plötzlich die zehnfache Menge. (Auswirkung auf ganze Produktion)

- Trifft zu
 Trifft eher zu
 Teils, teils
 Trifft weniger zu
 Trifft nicht zu

a) Wenn ja, wie gehen Sie damit um?

- Lieferverzögerung in Kauf nehmen
 Kapazität erhöhen durch Aufrüsten von Maschinen
 neue Maschinen dazukaufen
 Anteile vom Auftrag ausser Haus geben
 Produktion abbrehen Auftrag zurückgeben

Andere: _____

34. Besitzen Sie Sondermaschinen, die einzig für die Herstellung eines bestimmten Bauteils ausgelegt wurden (Einzweckmaschinen)? Beispiel: Ventilgehäuse für Kunde Meier.

- Ja
 Nein

a) Wenn ja, welche Maschinen?

b) Und für welche Art von Teilen?

Wir danken Ihnen für die Teilnahme an unserer Befragung!

C Lastenheft für RekoWeMa-Module



Lastenheft

Rekonfigurierbare Werkzeugmaschine – Achsmodule

1. Ausgangssituation und Zielsetzung

Das IWF/inspire benötigt für seine Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet „Rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen“ eine Prototypenmaschine. Diese Maschine soll aus einzelnen Maschinenmodulen bestehen, die in unterschiedlichen Konfigurationen zu einer Maschine zusammengesetzt werden können.

Nach der automatisierten Konfigurierung der Steuerung sollen die unabhängigen Module fehlerfrei zusammenarbeiten und somit eine einfache CNC-Werkzeugmaschine ergeben. An dieser Prototypenmaschine sollen die Möglichkeiten und Grenzen der automatisierten Konfigurierung erforscht sowie ein praktikables Vorgehen für die Konfigurierung entwickelt werden.

2. Produkteinsatz

Die Maschinenmodule werden zu Forschungszwecken verwendet und nicht in der produktiven Fertigung eingesetzt. Aus diesem Grund können gewisse Sicherheitsvorschriften, die für Produktionsmaschinen gelten, unberücksichtigt bleiben. Die Anbindung von Peripheriegeräten soll bei der Konzeption bedacht werden, allerdings können bei der Realisierung des Prototyps Abstriche gemacht werden. Die Maschine soll in der Maschinenhalle des IWF im A-Stock des CLA-Gebäudes aufgebaut werden.

Die Maschinenmodule für den Prototyp sollen für die Bearbeitung von Kurbelgehäusen für PKW-Motoren ohne automatischen Werkzeugwechsel ausgelegt werden. Für die Auslegung sind zwei Referenzwerkstücke mit folgenden Eigenschaften gegeben:

	Werkstück A	Werkstück B
Material:	Grauguss (GGL)	Aluminiumguss
Abmessungen (L × B × H):	600 mm × 400 mm × 600 mm	
Masse:	100 kg	35 kg

3. Produktübersicht

Geforderte Bestandteile

- 2 unterschiedliche Linearachsen
- 1 Rotationsachse
- 1 Werkzeugspindel

Zum Betrieb erforderliche Steuerungs- und Leistungskomponenten und Peripherie (KSM).

4. Anforderungen

Maschine

- Arbeitsraum: 600 × 400 × 400 (X × Y × Z)
- Störvolumen 1700 × 1400 × 1400 (X × Y × Z)
Maximaler Raum für grösstes WS für verschiedene (!) Konfigurationen.
X, Y: Verfahrweg + Länge der Spannplatte + Überstand
Z: Verfahrweg + Werkstückmass + Überstand
- Werkstückauflage: Spannplatte nach DIN 55201 mit T-Nuten nach DIN650
Abmessungen: 400 × 500
- Befestigung: Aufspannplatte mit 8 T-Nuten DIN 650 – 28
- Verfügbare Fläche: 3000 × 2000 auf Platte, Bodenfläche um Platte herum
- Schmierung: Fettschmierung für alle Wälzlager
 - Linearführungen
 - KGTe
 - Spindel
- Gestelle: Schweisskonstruktion
- Einheitliches Schnittstellenkonzept
- Umbau mit Hilfe des Hallenkrans → Transportösen

Linearachsen

- v_{\max} : 30 m/min < v < 40 m/min
- a_{\max} : 0.5g (= 5 m/s²)
- Beide Achsen sollen als unterste Schicht verwendet werden können
→ Antriebsnennlast: 850kg
→ Antriebskraft: Für bewegte Massen und Prozess (Vorschubkraft) auslegen
- Genauigkeit:
 - Positioniergenauigkeit: ≤ 0.010 mm
 - Wiederholgenauigkeit (Hysterese) ≤ 0.005 mm
- Längere Achse: Einsatz horizontal
- Kürzere Achse: Einsatz horizontal und vertikal

Rotationsachse

- Drehzahl: ≥ 10/min
- $\dot{\omega}_{\max}$: (= 5 rad/s²)
- Die Achse soll nur als oberste Schicht oder mit einer darüber liegenden Achse verwendet werden können
→ Antriebsnennlast: 600kg
→ Antriebsmoment: Für bewegte Massen und Prozess (Vorschubkraft) auslegen
- Genauigkeit:
 - Positioniergenauigkeit ≤ 10" (= 0.0028°)
 - Wiederholgenauigkeit (Hysterese) ≤ 5" (= 0.0014°)
- Einsatz horizontal (Drehachse vertikal)

Werkzeugspindel

- Schnittstelle für verschiedene Spindeltypen
 - Frässpindel
 - Werkzeugrevolver (optional)
- Drehzahl: 20'000 ... 40'000 /min
- Drehmoment: Aus Prozesskräften berechnen
- Werkzeugaufnahme: HSK 63
- Sperrluft

Vorzusehende Optionen

- Bremssystem
- Massenausgleich
- Direktes Messsystem

Weitere Aspekte

- Steuerung / Leistungselektronik: Ergibt sich aus der Wahl der Antriebe
- Peripherie:
 - KSM: Anbindung vorsehen
 - Druckluft: Notwendig für Sperrluft an der Spindel
 - Späneförderer: Anbindung vorsehen
 - Werkzeugwechsler
- Sicherheitsvorrichtungen

Zuverlässigkeit

- Robuste Ausführung gefordert, geeignet für Testbedingungen
- Gutmütiges Fehlverhalten

5. Entwicklungsablauf

- Funktionsstruktur klären
- Schnittstellen definieren
- Lösung auswählen (Methodisch → Morphologischer Kasten)
- Pflichtenheft erstellen
- Konzept entwerfen
- Detailkonstruktion ausarbeiten

Entscheidungsfindungen sind nachvollziehbar zu dokumentieren.

6. Lieferumfang

- Spezifikation
- CAD-Daten
- Dokumentation

7. Abnahmekriterien

- Erfüllung der Anforderungen gemäss Lastenheft
 - Überprüfung durch Angabe von Nenndaten und Berechnungen

D Universal-Maschinenbett für RekoWeMa

In einer Studie wurde ein Konzept für ein Universal-Maschinenbett für rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen erarbeitet. Grundlage waren die auskonstruierten Maschinenmodule, diese sollten damit vielseitig einsetzbar sein. Genauer untersucht wurden schliesslich vier Varianten.

Die Varianten 1, 2 und 3 Bild D.1 sind für einen Scharnierbandförderer mit einer Scharnierbandbreite von 900 mm ausgelegt. Bei der vierten Variante wird eine Version mit zwei Schneckenförderern geprüft. Die Flächen, welche dem Zusammenführen der Späne dienen, sind bei Variante 1 um 45° und bei Variante 2 um 35° geneigt. Dies wirkt sich auf die Dicke des Mineralgusses unter dem Späneförderer aus. Je geringer die Neigung der Flächen, welche dem Zusammenführen der Späne dienen, desto dicker kann der Bereich unter dem Späneförderer ausgelegt werden.

Variante 1 und 3 sind identisch bis auf eine bei Variante 3 im mittleren Bereich über dem Scharnierbandförderer angebrachte Art Brücke (Bild D.1). Dadurch soll die Steifigkeit erhöht werden und gleichzeitig kann das Gitter an dieser Stelle abgestützt werden. Bei Variante 4 wird der Einsatz von Schneckenförderern geprüft. Da ein Schneckenförderer deutlich weniger breit ist als ein Scharnierbandförderer, müssen zwei Schnecken angebracht werden. Die Problematik mit der Breite des horizontalen Maschinenbettmoduls und dem Neigungswinkel wird durch zwei parallel montierte Späneförderer deutlich entschärft. So kann ein Neigungswinkel von 45° eingehalten werden, ohne gleichzeitig die Struktur unter dem Förderer zu schwächen (Bild D.1). Das Gitter kann zudem in der Mitte abgestützt werden. Da sich in der Mitte des Gitters kein parallel zum Späneförderer verlaufender Gittersteg befindet, wird das Gitter durch Rippen abgestützt, welche sich jeweils unter den entsprechenden, senkrecht zum Späneförderer verlaufenden Gitterstegen befinden. Die Dimensionen der Rippen werden an die Dicke der Gitterstege angepasst. Bei der detaillierten Auslegung ist Vorsicht geboten: Für das Mineralgusselement wird derjenige Mineralguss mit dem höchsten E-Modul verwendet. Dies setzt eine Minimalwandstärke von 80 mm voraus. Da die Stege des Gitters und damit die darunterliegenden Rippen aber eine Dicke von 40 bis 50 mm haben, kann es dort einen Konflikt geben.

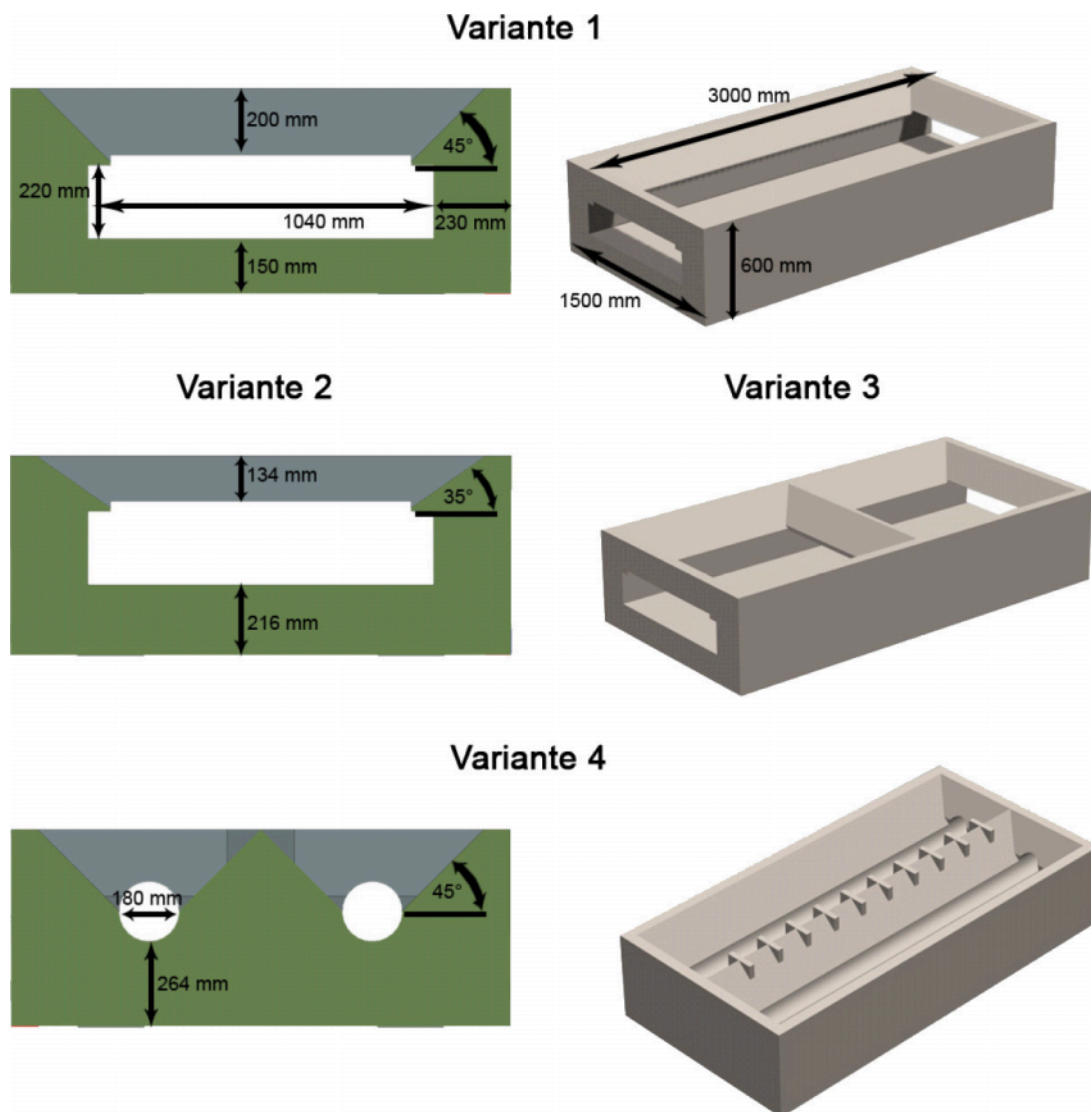


Bild D.1: Querschnitte und 3D-Ansichten der untersuchten Varianten eines Universal-Maschinenbetts

Die Varianten 1 bis 3 unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Späneförderer stark von Variante 4. Auch die Kosten für die Späneförderer variieren stark. Daneben muss geprüft werden, ob ein einzelner Späneförderer mehrere hintereinander positionierte Maschinenbettmodule bedienen kann. Die Steifigkeit des Mineralgusselementes wird mit Hilfe von ANSYS Workbench untersucht. Die jeweiligen Varianten werden in Kombination mit einem Gitter untersucht. Als Belastung wird das Gewicht der Maschinenmodule (1000 kg und 900 kg) sowie eine Prozesskraft von 2500 N in horizontaler Richtung angesetzt. Das Eigengewicht des Gitters und des Mineralgusselementes wird ebenfalls berücksichtigt. Die Verbindungsstellen zwischen dem Gitter und dem Mineralgusselement

werden idealisiert und der in Realität auftretende Steifigkeitsverlust wird vernachlässigt. Das Mineralgusselement wird an der Unterseite an allen vier Ecken fixiert gelagert. Der E-Modul des Gitters beträgt für die Berechnung 170000 N/mm^2 (Sphäroguss), der des Mineralgusselements 40000 N/mm^2 .

Die Resultate der Steifigkeitsbetrachtung sind in Bild D.2 und Tabelle D.1 dargestellt, wobei nur die Verformung der ersten Variante zu sehen ist, da sich Variante 1 und 2 nahezu identisch verhalten.

Tabelle D.1: Steifigkeitsbetrachtung der Mineralgusselemente

Variante	Gewicht (ohne Aufspanngitter)	Maximale Gesamtverformung
Variante 1	3177 kg	75 μm
Variante 2	3633 kg	74 μm
Variante 3	3318 kg	55 μm
Variante 4	4962 kg	9 μm

Die Achsmodule werden für die Steifigkeitsbetrachtung aufgrund der Gitterteilung nicht mittig montiert. Die Verformung des Gitters der vierten Variante (Bild D.2) ist deshalb auf der einen Seite deutlich ausgeprägter als auf der anderen. Die Schwächung der Struktur unter dem Späneförderer bei Variante 2 führt bei dieser Belastung nur zu einem minimalen Steifigkeitsverlust. Da Variante 1 einen besseren Spänefluss ermöglicht, ist diese zu bevorzugen. Durch die Abstützung des Gitters in der Mitte ist Variante 3 gegenüber Variante 1 um ca. 27% steifer. Die Brücke verursacht ein Mehrgewicht von 140 kg. Die maximale Gesamtverformung der vierten Variante wird gegenüber der ersten Variante um einen Faktor acht reduziert. Zum Gewicht des beinahe fünf Tonnen schweren Mineralgusselementes kommen das Gewicht der Schneckenförderer und das Gewicht des 1300 kg bis 2200 kg schweren Gitters dazu. Die komplette Einheit überschreitet das angestrebte Maximalgewicht von fünf Tonnen deutlich.

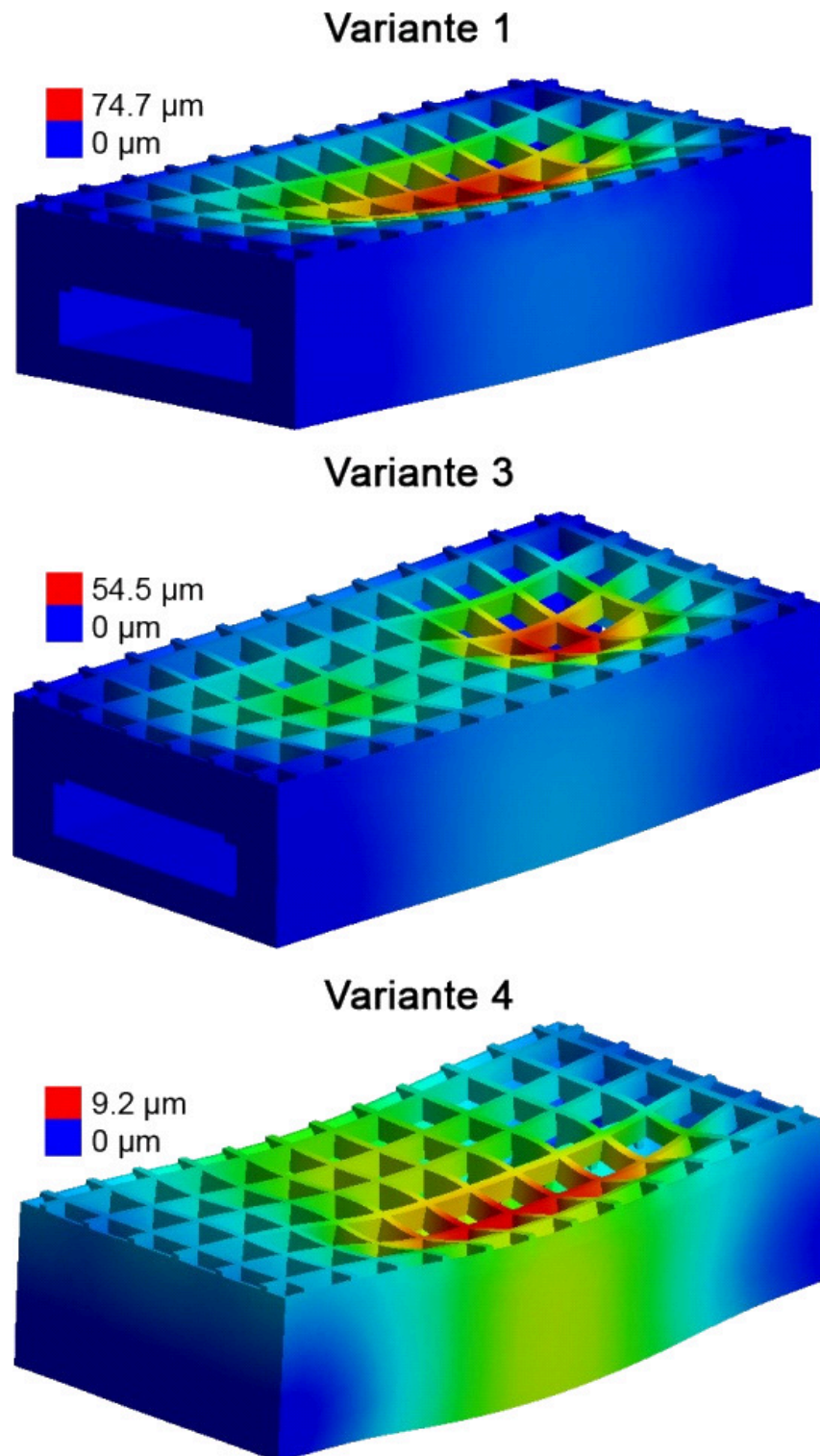


Bild D.2: FE-Untersuchung der Verlagerungen an den Maschinenbettvarianten unter Belastung durch zwei montierte Module sowie eine horizontale Prozesskraft.

E Vergleichstabelle NC-Steuerungen

S: Standard O: Option k.A. keine Angabe

Kriterium	Steuerung		
Hersteller	Siemens	Heidenhain	BoschRexroth
Reihe	840	iTNC	IndraMotion MTX
Typ	D sl / Di sl	530	performance
Preis [CHF]	10'000 – 15'000	k.A.	10'000 – 15'000
<i>NC</i>			
Hauptrechner (CPU)	NCU 710,720,730 / PCU50	MC 422 C (13 A.) MC 420 (5 A.)	IndraControl P60
Max. Anzahl Achsen unabhängige Kanäle	$\leq 31^1$ / ≤ 20 $\leq 10^2$ / ≤ 10	5 (S) / 13 (O) 1	8 – 64 3 (S) – 12 (O)
interpolierende Achsen pro Kanal	≤ 12	5	4 (S) – 8 (O)
Hauptspindeln	= Anzahl Achsen; ≤ 5 pro Kanal	≤ 2	$\leq 32^3$
Drehachsen Gantry-Achsen	= Anzahl Achsen ≤ 8 Achsen (= 24 Antriebe)	≤ 3 ≤ 2 (= 4 Antriebe)	= Anzahl Achsen ≤ 8 pro Kanal
Prozessor(en)	Pentium M	Pentium III / Pentium M (O)	Celeron
Betriebssystem	Linux (D) / Windows (Di)	HEROS	k.A.
Schnittstelle zu Antrieben	DriveClick (D) / Profibus (Di)	k.A.	Sercos, Profibus
<i>Regler</i>			
Antriebsregelung	Integriert ⁴	Integriert, digital	Integriert in Leistungsteil
Regler-Einheit	Sinamics S120	CC 422, CC 424 B	IndraDrive Basic/Advanced
Anzahl Regelkreise	6^4 (S)	≤ 15	k.A.

E Vergleichstabelle NC-Steuerungen

<i>Stromrichter</i>			
Stromrichtersystem	Sinamics S120	Integriert	IndraDrive
Versorgungsspannung	3 × 400 V	3 × 400 V	3 × 400 V
Netzfrequenz	50 – 60 Hz	50 – 60 Hz	50 – 60 Hz
<i>PLC</i>			
integrierte PLC	CPU 317-2DP	ja ⁵	ja
Programmiersprachen	IEC 61131-3, HiGraph	AWL	IEC 61131-3
Programmierung	STEP7	PLCdesignNT	IndraWorks
Dateiformat	Proprietär	Ascii (Text)	Proprietär
PLC-Zykluszeit	10 ms (variabel)	≤ 10.8 ms	≥ 1 ms ⁶
Anzahl analoge Ein-/Ausgänge	E/A-Module über Profibus ⁴	3/6	
Anzahl High-Speed- Ein-/Ausgänge ⁷			8/8
Anzahl Feldbus-Ein- /Ausgänge [Byte]	k.A.	k.A.	8192/8192
Anzahl Feldbus-Slaves Schnittstellen	≤ 128 Profibus DP	k.A. Profibus DP (O)	k.A. Leistungsteil: Sercos, Peripherie: Profibus DP
<i>HMI</i>			
HMI-Rechner	Sinumerik PCU 50.3	k.A.	IndraControl V
<i>Konfigurierung</i>			
Art der Konfigurierung	Manuell und automatisiert	Manuell und automatisiert	Manuell
Dateityp Parametersatz	Binär	Binär	Binär
Dateityp Programme	Binär	Ascii	Binär
Generieren der Daten	UpdateAgent	TNCOpt	IndraWorks
Datenschnittstelle	Ethernet, USB	Ethernet, USB	Ethernet, USB
Testmöglichkeiten im Voraus	Machine Simulator	k.A.	k.A.

¹ ≤ 6 mit NCU 710

² ≤ 4 mit NCU 710

³ mit SERCOS/IndraDrive

⁴ modular erweiterbar

⁵ erweiterbar mit externen PLC-Systemen PL 510, PL 511, PL 512 oder PL 550

⁶ Zykluszeit einstellbar für verschiedene Tasks

⁷ Zykluszeit ≤ 1 ms, für zeitkritische Anwendungen

F Spezifikation der Messmittel

Tabelle F.1: Spezifikation des Messsystems zur Neigungsbestimmung: elektronische Wasserwaage Talyvel

Range:	± 600 seconds
Readout Display:	4 digit LCD with polarity, decimal point and low battery indication. Analogue meter indicating tilt direction and indication of position in the range. With ± 10 seconds fine range switchable.
Display Resolution:	0.001 mm / m
System Accuracy:	within 0.2 second $\pm 3\%$ of reading
Response Time:	Settling time of display 2 seconds
Battery Life:	Not less than 40 hours continuous use from fully charged state.
Working Temperature Range:	-5 °C to +40 °C
Ambient Storage Temperature:	-20 °C to +70 °C (Instrument without batteries)
Standard Cable Length:	3.5 metres (11.65 ft)
Maximum Distance between Display Unit and Level Unit:	100 m (300 ft) or 800 m (1/2 mile) with special leads.
Computer Compatibility:	RS232 and analogue output as standard
Level Unit:	Base 100 x 32 mm (4 in x 1.25 in), Height 80 mm (3.2 in), 1 kg (2.21 bs)
Display Unit:	270 x 210 x 110 mm (10.64 in x 8.72 in x 4.33 in), 5 kg (11.01 bs)

Tabelle F.2: Spezifikation der verwendeten optischen Messsysteme: Heidenhain Vergleichmasstab und Heidenhain Kreuzgittermesssystem

	KGM 182	VM 182/102
Massverkörperung:	Zwei-Koordinaten gitter-Teilung	TITANID-Phasen- Zwei-Koordinaten gitter-Teilung
Längenausdehnungskoeffizient:	$\alpha_{therm} \approx 8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$\alpha_{therm} \approx 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Genauigkeitsklasse:	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 1 \mu\text{m}$ in Längsrichtung $\pm 1.5 \mu\text{m}$ in Querrichtung
Messbereich:	$\varnothing 230 \text{ mm}$	Längsrichtung: 1020 mm / 520 mm Querrichtung: $\pm 1 \text{ mm}$
Referenzmarke:		1 Referenzmarke am Beginn der Messlänge
Inkrementalsignale:		$\sim 1 \text{ VSS}$
Signalperiode:	4 μm in Messrichtung I und II	4 μm in Längs- und Querrichtung
Empfohlener Messschritt:	$\geq 0.001 \mu\text{m}$ (mit IK 220)	
Spannungsversorgung:	5 V $\pm 5 \%$ / $< 100 \text{ mA}$ (je Achse)	
Ankopplung des Abtastkopfs:	$\varnothing 20\text{h7}$	magnetisch an Planfläche; Winkel als Zubehör lieferbar
Verfahrgeschwindigkeit:		$\leq 80 \text{ m/min}$
Masse:	Messplatte ca. 3.1 kg Abtastkopf ca. 0.6 kg	Masstab ca. 7.17 kg / ca. 3.82 kg Abtastkopf ca. 1.86 kg

G Messprogramme

Geradheitsmessung

GeradheitKLA.spf

```
; Geradheitsmessung der KLA nach ISO 230
; Verfahrbewegung der KLA in Z-Richtung
N130 F5000
N140 G1 X290
N150 F250
    N210 G1 Z-5 ; Initialpositionierung
    N220 G1 Z0
    N230 G4 F5
    N240 G1 Z385
    N250 G4 F5
    N260 G1 Z390
    N270 G1 Z385
    N280 G4 F5
    N290 G1 Z0
    N300 G4 F5
    N310 G1 Z-5
N700 MSG("Messung beendet")
M30
```

GeradheitLLA.spf

```
; Geradheitsmessung der LLA nach ISO 230
; Verfahrbewegung der LLA in X-Richtung
N130 F5000
N140 G1 Z190
N150 F250
```

```
N210 G1 X-5 ; Initialpositionierung
N220 G1 X0
N230 G4 F5
N240 G1 X585
N250 G4 F5
N260 G1 X590
N270 G1 X585
N280 G4 F5
N290 G1 X0
N300 G4 F5
N310 G1 X-5
N700 MSG("Messung beendet")
M30
```

Positioniermessung

PositionierungKLA.spf

```
; Positioniermessung der KLA nach ISO 230
; Verfahrensbewegung der KLA in Z-Richtung mit Halt
N100 DEF INT PZ = 0 ; Zaehlvariable Positionszaehler
N110 DEF INT MP = 8 ; Anzahl der Messpunkte
N120 DEF INT ZPOS[8] = (25, 73, 128, 176, 229, 272, 325, 375)
N130 DEF INT ZZ = 1 ; Zaehlvariable Zyklenzaehler
N140 F5000
N150 G1 X290
N160 F250
WHILE ZZ <= 5 ; 5 Messzyklen nach ISO 230-2
  N200 MSG("Zyklus " << ZZ <<" in positiver Richtung")
  N210 G1 Z0 ; Initialpositionierung
  WHILE PZ <= MP - 1
    N300 G1 Z = ZPOS[PZ] ; Positionieren
    N310 G4 F5
    N320 PZ = PZ + 1 ; Zaehlerinkrement
  ENDWHILE
N400 MSG("Zyklus " << ZZ <<" in negativer Richtung")
N410 G1 Z385
WHILE PZ > 0 ; Eintritt in die Schlaufe für PZ von 8 ... 1,
  Ausfuehrung dann mit 7 ... 0
```

```

    N500 PZ = PZ - 1 ; Zaehlerdekrement
    N510 G1 Z = ZPOS[PZ] ; Positionieren
    N520 G4 F5
  ENDWHILE
  N600 ZZ = ZZ + 1
ENDWHILE
N700 MSG("Messung beendet")
M30

```

PositionierungLLA.spf

```

; Positioniermessung der LLA nach ISO 230
; Verfahrensbewegung der LLA in X-Richtung mit Halt
N100 DEF INT PZ = 0 ; Zaehlvariable Positionszaehler
N110 DEF INT MP = 12 ; Anzahl der Messpunkte
N120 DEF INT XPOS[12] = (25, 73, 128, 176, 229, 272, 325, 375, 423,
  479, 529, 575)
N130 DEF INT ZZ = 1 ; Zaehlvariable Zyklenzaehler
N140 F5000
N150 G1 Z190
N160 F250
WHILE ZZ <= 5 ; 5 Messzyklen nach ISO 230-2
  N200 MSG("Zyklus " << ZZ <<" in positiver Richtung")
  N210 G1 X0 ; Initialpositionierung
  WHILE PZ <= MP - 1
    N300 G1 X = XPOS[PZ] ; Positionieren
    N310 G4 F5
    N320 PZ = PZ + 1 ; Zaehlerinkrement
  ENDWHILE
  N400 MSG("Zyklus " << ZZ <<" in negativer Richtung")
  N410 G1 X585
  WHILE PZ > 0 ; Eintritt in die Schlaufe für PZ von 8 ... 1,
    ; Ausführung dann mit 7 ... 0
    N500 PZ = PZ - 1 ; Zaehlerdekrement
    N510 G1 X = XPOS[PZ] ; Positionieren
    N520 G4 F5
  ENDWHILE
  N600 ZZ = ZZ + 1
ENDWHILE
N700 MSG("Messung beendet")

```

M30

Neigungsmessung

KLA_Z50mm.spf

```
; Verfahrbewegung der KLA über volle Länge in Z-Richtung,  
    Abstand 50 mm zwischen den Haltepunkten  
; Programm geeignet zur Messung von Rollen und Nicken der Achse  
N110 DEF INT SCHRITT = 50 ; Schrittweite fuer Positionierbewegung  
N120 DEF INT ZPOS = 40 ; Anfang für gleichmaessige Positionsverteilung  
N130 F2500  
N140 G1 Z-5 ; Initialpositionierung  
N150 F1000  
WHILE ZPOS <= 390  
    N150 G1 Z = ZPOS ; Positionieren  
    N160 ZPOS = ZPOS + SCHRITT ; naechste Position bestimmen  
ENDWHILE  
M30
```

LLA_X50mm.spf

```
; Verfahrbewegung der LLA über volle Länge in X-Richtung,  
    Abstand 50 mm zwischen den Haltepunkten  
; Programm geeignet zur Messung von Rollen und Nicken der Achse  
N210 DEF INT SCHRITT = 50 ; Schrittweite fuer Positionierbewegung  
N220 DEF INT XPOS = 40 ; Anfang für gleichmaessige Positionsverteilung  
N230 F2500  
N240 G1 X-5 ; Initialpositionierung  
N250 F1000  
WHILE XPOS <= 590  
    N250 G1 X = XPOS ; Positionieren  
    N260 XPOS = XPOS + SCHRITT ; naechste Position bestimmen  
ENDWHILE  
M30
```

H Bestimmung der Messunsicherheit

Die nachfolgende Bestimmung der Messunsicherheiten für die bei der geometrischen Prüfung verwendeten Messmittel wurde nach den Vorgaben in [45] durchgeführt.

Tabelle H.1: Bestimmung der Messunsicherheit der Positioniermessungen

Beitrag	Parameter	Einheit	u	Einheit
<i>Unsicherheit durch Messmittel (Vergleichsmassstab)</i>				
Messlänge	600 / 400	mm		
Genauigkeitsklasse	± 1	μm		
Fehlerspanne	2.0	μm		
$u_{\text{Messmittel}}$			0.6	μm
<i>Unsicherheit der Temperaturmessung an der Maschine</i>				
Längenausdehnungskoeffizient der Maschine	12	$\mu\text{m}/^\circ\text{C}$		
Spanne des Temperaturunterschieds zwischen Werkstückhalterung und Massstab	0.1	μm		
$u_{M,WZM}$			0.2 / 0.1	μm
<i>Unsicherheit der Temperaturmessung am Vergleichsmassstab</i>				
Null, Massstab nimmt Temperatur der Maschine an				
$u_{M,\text{Messmittel}}$			0	μm
<i>Unsicherheit durch Temperatureinfluss</i>				
Temperaturdifferenz zu 20 °C	3	$^\circ\text{C}$		
Fehlerspanne des Ausdehnungskoeffizienten	2	$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}/^\circ\text{C}$		
$u_{T,WZM}$			1.0 / 0.7	μm
<i>Kombinierte Standardunsicherheit</i>				
$U(k = 2)$			2.4 / 1.8	μm

H Bestimmung der Messunsicherheit

Tabelle H.2: Bestimmung der Messunsicherheit der Gerademessungen

Beitrag	Parameter	Einheit	U	Einheit
<i>Unsicherheit durch Messmittel (Vergleichsmassstab)</i>				
Genauigkeitsklasse	± 1.5	μm		
Fehlerspanne	3.0	μm		
$u_{\text{Messmittel}}$			0.9	μm
<i>Kombinierte Standardunsicherheit</i>				
$U(k = 2)$			1.9	μm

Tabelle H.3: Bestimmung der Messunsicherheit der Roll- und Nickmessungen

Beitrag	Parameter	Einheit	U	Einheit
<i>Unsicherheit durch Messmittel ($2 \times$ el. Wasserwaage)</i>				
Unsicherheit einer el. Wasserwaage			2.5	$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$
$u_{\text{Messmittel}}$			3.5	$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$
<i>Kombinierte Standardunsicherheit</i>				
$U(k = 2)$			7.1	$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$

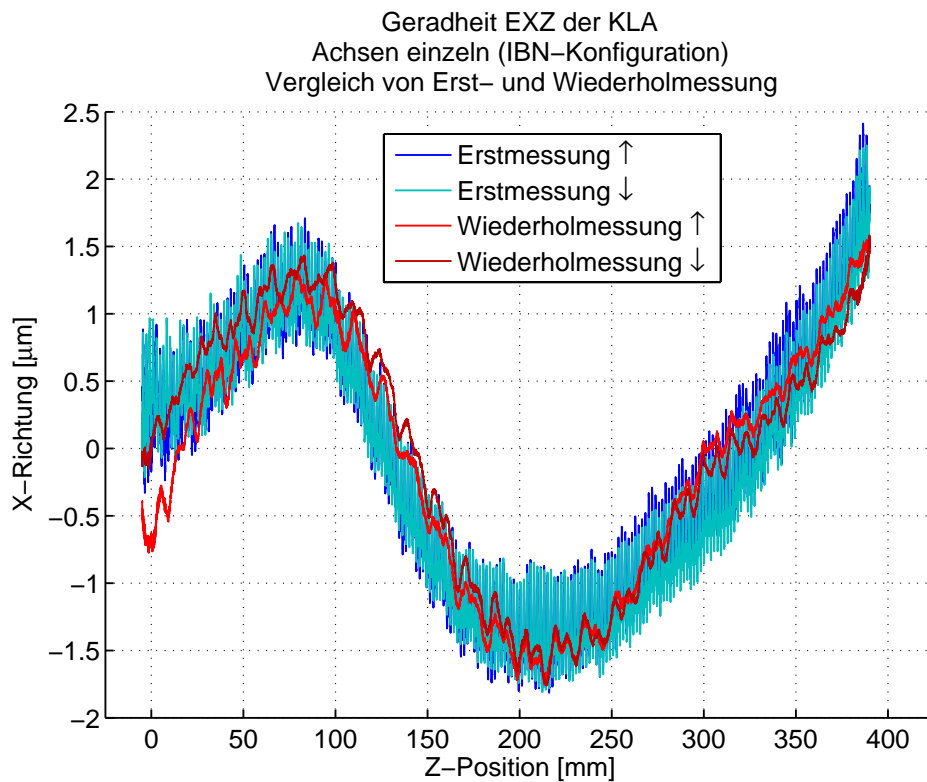
Tabelle H.4: Bestimmung der Messunsicherheit der Giermessungen

Beitrag	Parameter	Einheit	U	Einheit
<i>Unsicherheit durch Messmittel ($2 \times$ Vergleichsmassstab)</i>				
Unsicherheit der Positionsdifferenz	1.7 / 1.3	μm		
Abstand d der Bahnen	275	mm		
$u_{\text{Messmittel}}$			6.1 / 4.7	$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$
<i>Unsicherheit durch Abstand der Bahnen</i>				
Spanne des Bahnabstands	± 5	mm		
$u_{\text{Bahnabstand}}$			0.11 / 0.09	$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$
<i>Unsicherheit durch Umwelteinflüsse (Drift)</i>				
Fehler durch Umwelteinflüsse E_{TVE}	1.0	μm		
$u_{E_{TVE}}$			1.0 / 0.7	$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$
<i>Unsicherheit durch Wiederholbarkeit der Positionierung</i>				
Spanne der Positionierwiederholbarkeit	2.5	μm		
u_R			2.6	$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$
<i>Kombinierte Standardunsicherheit</i>				
$U(k = 2)$			13.6 / 10.8	$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$

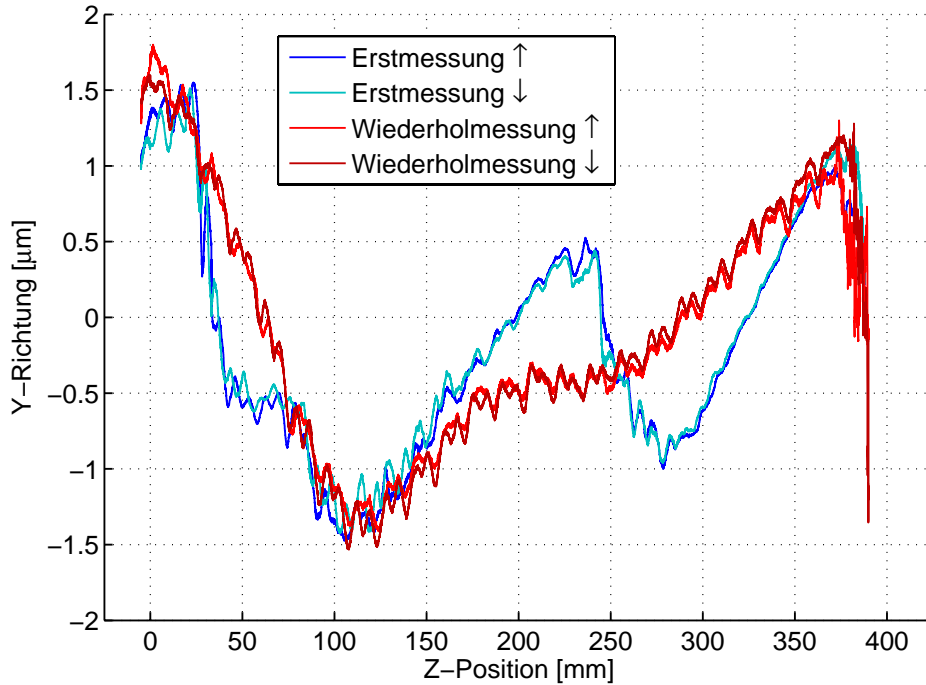
I Auswertung der Komponentenabweichungen

Nachfolgend sind alle Auswertungen der Messungen der Komponentenabweichungen an der KLA und der LLA abgebildet. Ausser für die Positioniermessungen enthalten die Graphen jeweils die Messkurven der Erst- und der Wiederholmessung zum direkten Vergleich.

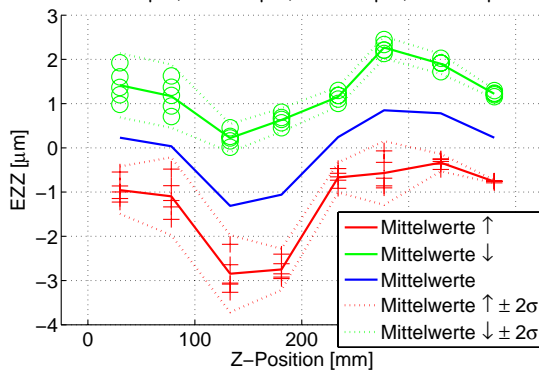
Kurze Linearachse – KLA



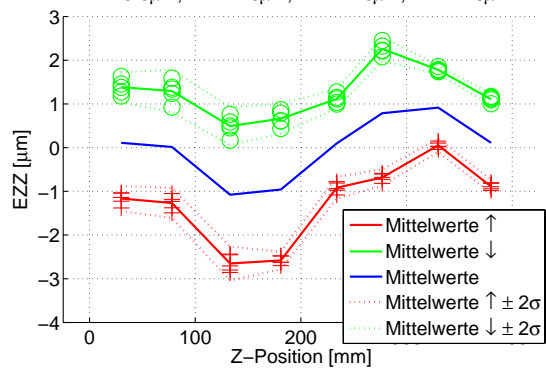
Geradheit EYZ der KLA
 Achsen einzeln (IBN-Konfiguration)
 Vergleich von Erst- und Wiederholmessung

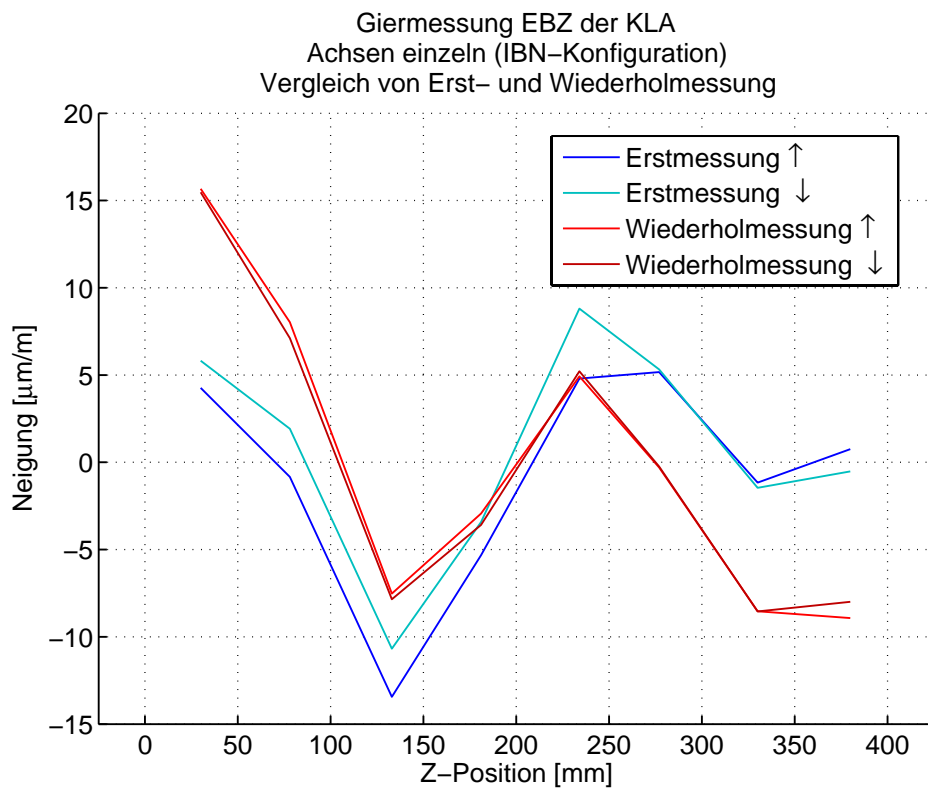
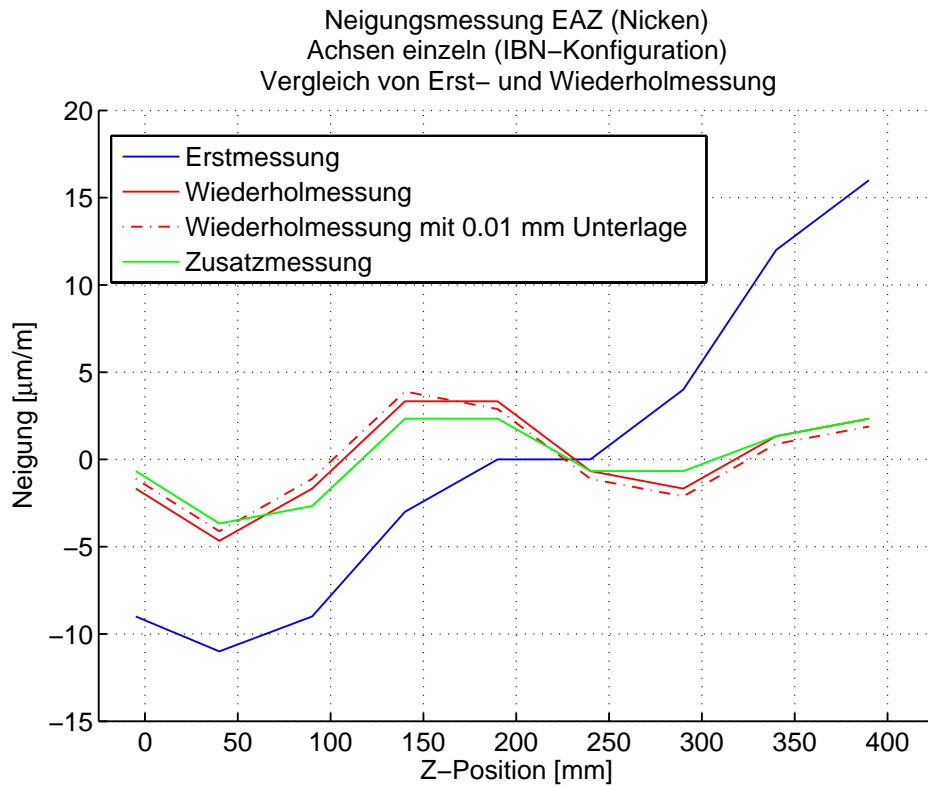


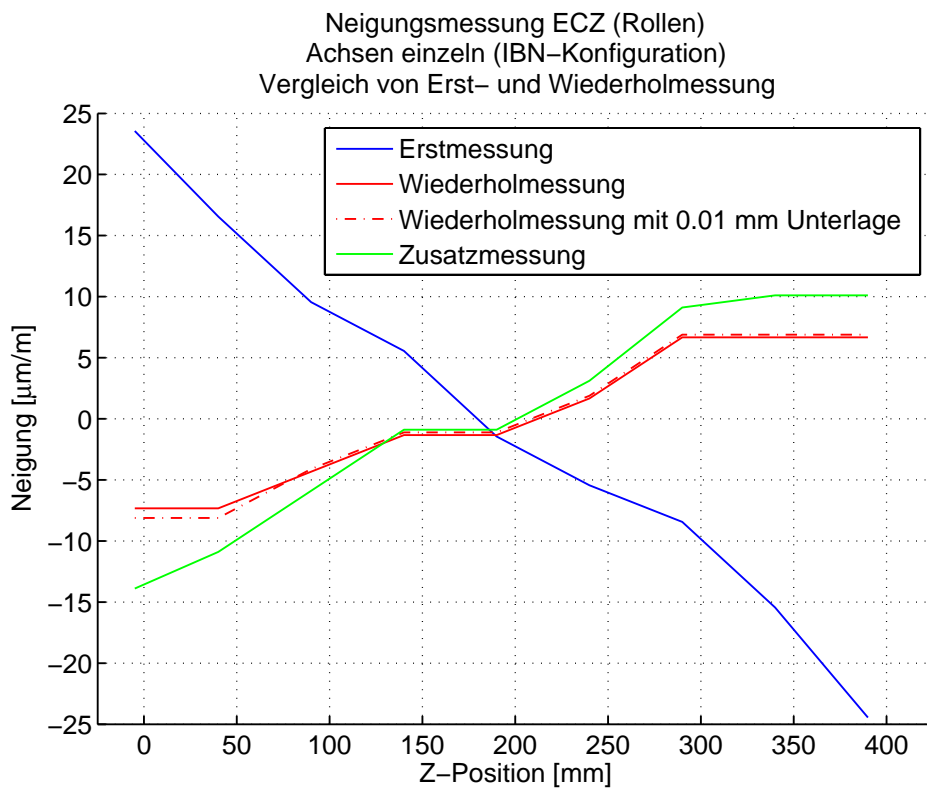
Positioniergenauigkeit EZZ der KLA
 Achsen einzeln (IBN-Konfiguration)
 Erstmessung – Werte rechnerisch kompensiert
 A = $6.2\mu\text{m}$; E = $5.1\mu\text{m}$; M = $2.2\mu\text{m}$; R = $4.3\mu\text{m}$



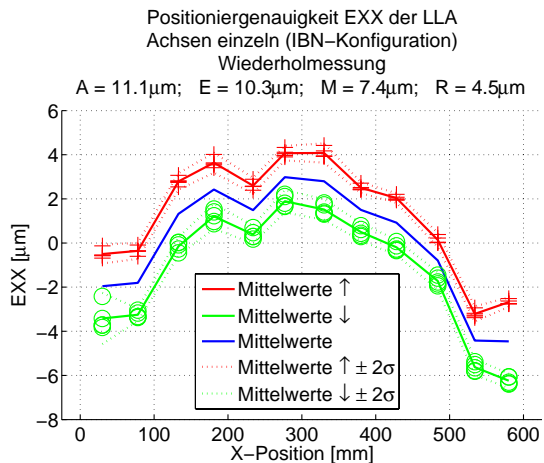
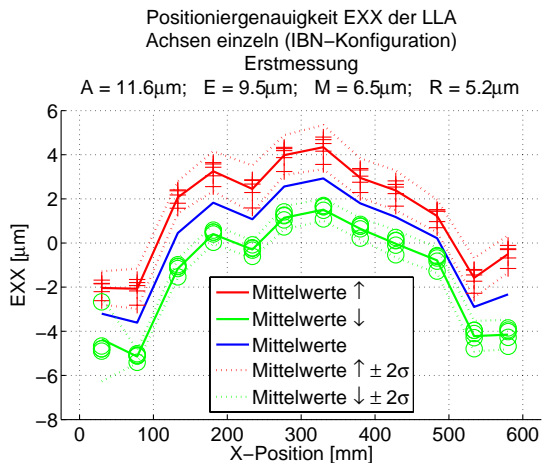
Positioniergenauigkeit EZZ der KLA
 Achsen einzeln (IBN-Konfiguration)
 Wiederholmessung – Werte rechnerisch kompensiert
 A = $5.6\mu\text{m}$; E = $4.9\mu\text{m}$; M = $2.0\mu\text{m}$; R = $4.0\mu\text{m}$



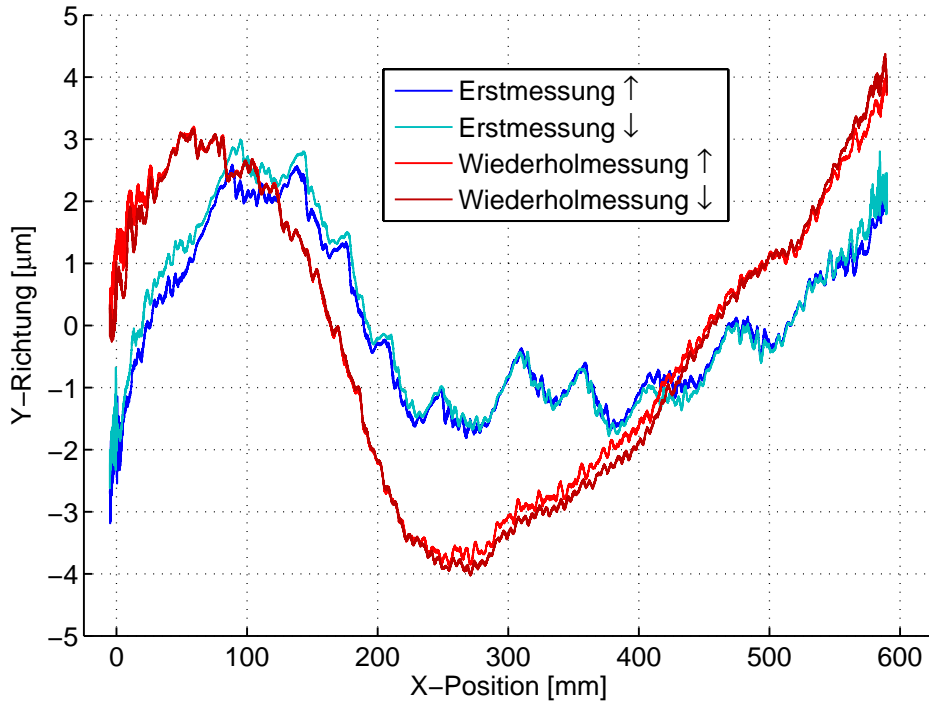




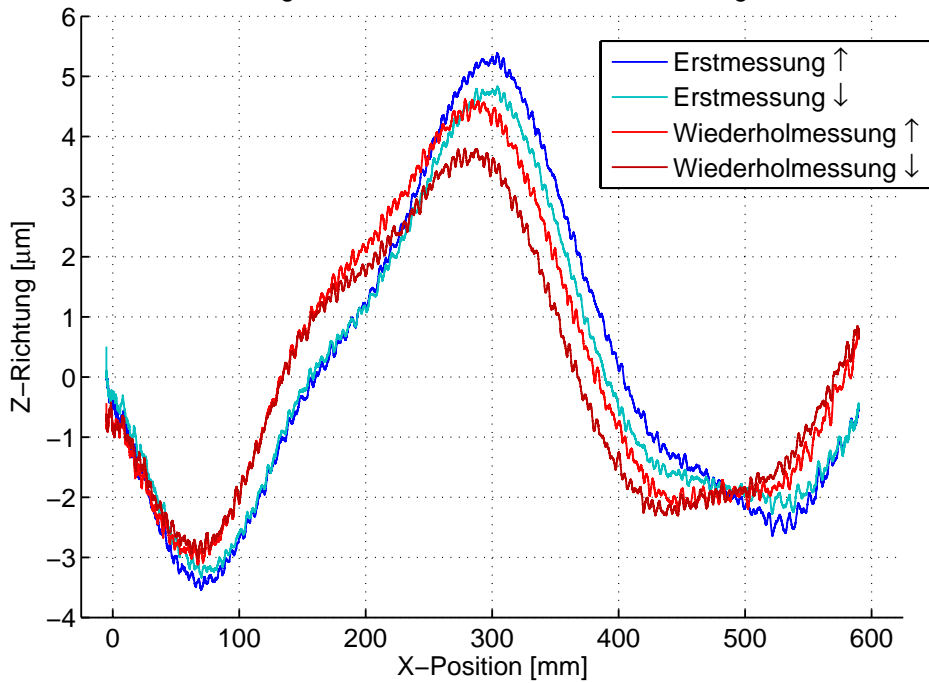
Lange Linearachse – LLA

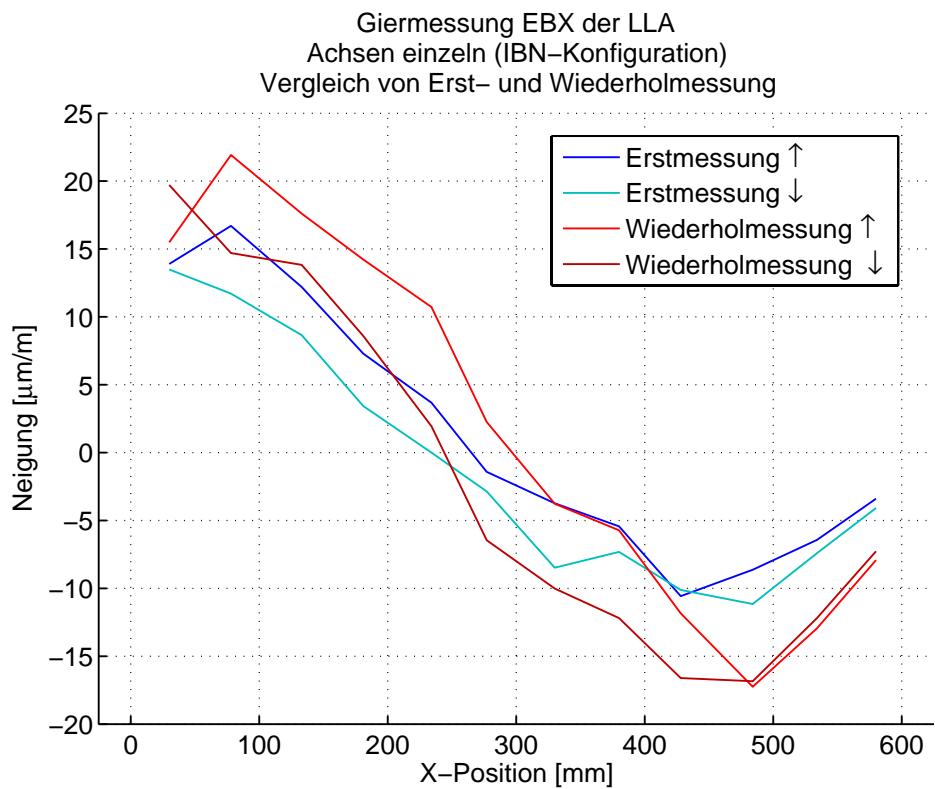
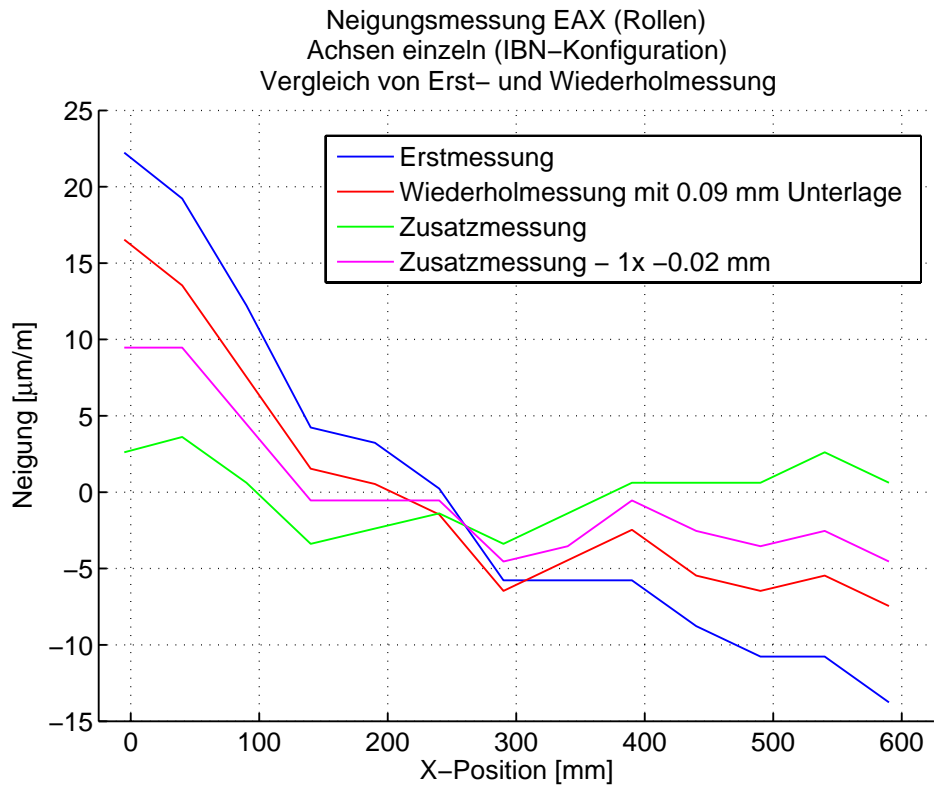


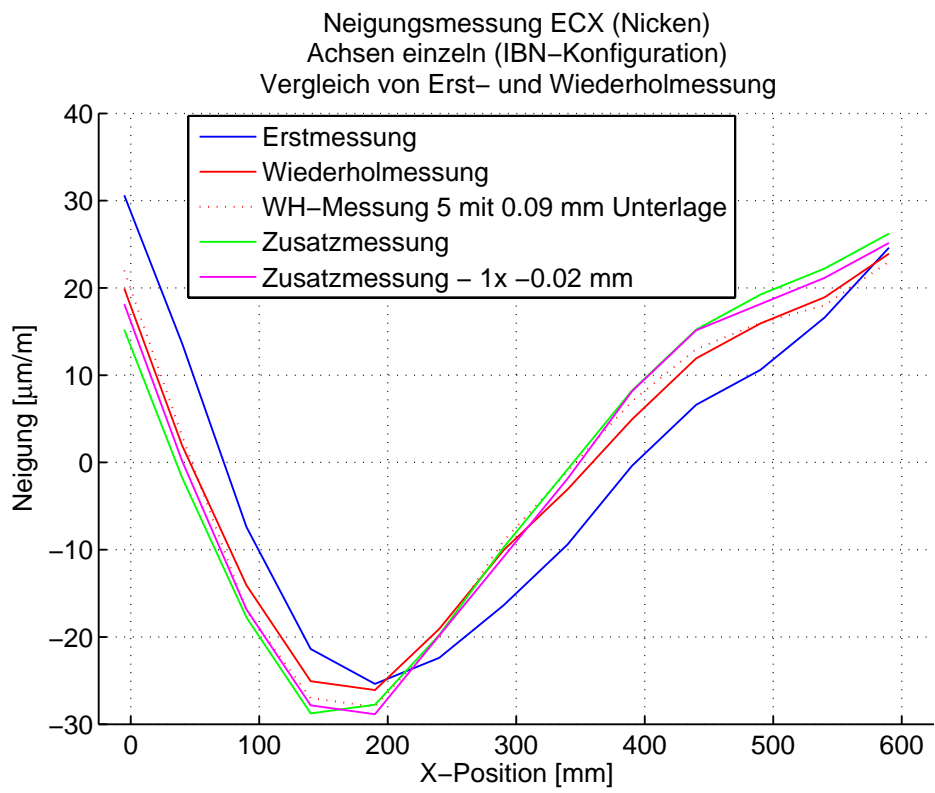
Geradheit EYX der LLA
Achsen einzeln (IBN-Konfiguration)
Vergleich von Erst- und Wiederholmessung



Geradheit EZX der LLA
Achsen einzeln (IBN-Konfiguration)
Vergleich von Erst- und Wiederholmessung







J Geometrische Prüfung verschiedener Konfigurationen

Alle Messungen wurden grundsätzlich ohne steuerungsseitige Kompensation durchgeführt. Ausnahmen sind angegeben.

Auf die Positioniermessungen der kurzen Linearachse wurde rechnerisch eine zulässige lineare, auf den Mittelwerten basierende Kompensation angewendet.

Tabelle J.1: Messwerte der geometrischen Prüfung an der FS-Konfiguration.

	EXZ	EYZ	EZZ	EAZ	EBZ	ECZ ¹
Erst- messung	14.4 μm	6.0 μm	A = 14.9 μm E = 12.9 μm M = 2.4 μm R = 14.0 μm	20.5 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 4.2"	19.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 3.9"	–
Wiederhol- messung	14.6 μm	5.9 μm	A = 15.5 μm E = 15.0 μm M = 2.8 μm R = 14.4 μm	23.5 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 4.8"	22.5 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 4.6"	–
Mittel- wert	14.5 μm	5.9 μm	A = 15.2 μm E = 14.0 μm M = 2.6 μm R = 14.2 μm	22.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 4.5"	20.8 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 4.3"	–
Toleranz ²	10 μm	10 μm	A = 22 μm	60 μrad = 12"	60 μrad = 12"	
	EXX	EYX	EZX	EAX	EBX	ECX ¹
Erst- messung	A = 17.4 μm E = 15.9 μm M = 11.1 μm R = 7.8 μm	7.8 μm	8.3 μm	25.7 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 5.3"	63.5 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 13.1"	–
Wiederhol- messung	A = 16.0 μm E = 15.1 μm M = 11.2 μm R = 4.8 μm	6.4 μm	8.0 μm	43.5 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 9.0"	61.5 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 12.7"	–
Mittel- wert	A = 16.7 μm E = 15.5 μm M = 11.1 μm R = 6.3 μm	7.1 μm	8.2 μm	34.6 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 7.2"	62.5 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 12.9"	–
Toleranz ³	A = 25 μm	15 μm	15 μm	60 μrad = 12"	60 μrad = 12"	

¹ Messung mit vorhandenen Messmitteln nicht mit vertretbarem Aufwand durchführbar

² Toleranzangaben nach ISO 10791-1 bzw. 10791-4 (Positionierung) für Achslänge $Y \leq 500$

³ Toleranzangaben nach ISO 10791-1 bzw. 10791-4 (Positionierung) für Achslänge $500 < Y \leq 800$

Tabelle J.2: Messwerte der geometrischen Prüfung an der KT-Konfiguration.

	EXZ	EYZ	EZZ	EAZ	EBZ ¹	ECZ
Erst- messung ²	6.4 μm	4.1 μm	A = 7.3 μm E = 5.3 μm M = 2.6 μm R = 5.0 μm	67.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 13.8"	–	55.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 11.3"
Wiederhol- messung	3.7 μm	4.9 μm	A = 6.3 μm E = 5.6 μm M = 2.8 μm R = 4.1 μm	33.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 6.8"	–	33.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 6.8"
Mittel- wert	5.0 μm	4.5 μm	A = 6.8 μm E = 5.5 μm M = 2.7 μm R = 4.6 μm	50.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 10.3"	–	44.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 9.1"
Toleranz ³	10 μm	10 μm	A = 22 μm	60 μrad = 12"		60 μrad = 12"
	EXX	EYX	EZX	EAX	EBX	ECX ³
Erst- messung	A = 16.3 μm E = 13.1 μm M = 10.9 μm R = 6.3 μm	7.3 μm	7.3 μm	15.5 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 3.2"	34.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 7.0"	46.5 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 9.6"
Wiederhol- messung	A = 14.0 μm E = 11.3 μm M = 9.7 μm R = 5.2 μm	7.5 μm	7.5 μm	19.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 3.9"	42.2 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 8.7"	49.0 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 10.1"
Mittel- wert	A = 15.1 μm E = 12.2 μm M = 10.3 μm R = 5.8 μm	7.4 μm	7.4 μm	17.3 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 3.6"	38.2 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 7.9"	47.8 $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ = 9.8"
Toleranz ⁴	A = 25 μm	15 μm	15 μm	60 μrad = 12"	60 μrad = 12"	60 μrad = 12"

¹ Messung mit vorhandenen Messmitteln nicht mit vertretbarem Aufwand durchführbar

² Positionierung bei Erstmessung testweise mit aktivierter Spindelsteigungsfehlerkompensation

³ Toleranzangaben nach ISO 10791-1 bzw. 10791-4 (Positionierung) für Achslänge $Y \leq 500$

⁴ Toleranzangaben nach ISO 10791-1 bzw. 10791-4 (Positionierung) für Achslänge $500 < Y \leq 800$

Glossar

ABK	AchsBauKasten ; am IWF der ETH Zürich entwickeltes Modellier- und Simulationstool, das speziell auf die Bedürfnisse im Werkzeugmaschinenbau zugeschnitten ist.
AHP	Analytic Hierarchy Process ; eine mathematische Methode zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen.
AMT	Association for Manufacturing Technology (engl.) = Vereinigung für Fertigungstechnologie, die die Interessen der US-amerikanischen Fertigungsmaschinenhersteller vertritt. Organisiert die → IMTS.
ANSYS	ANalysis SYStem ; Finite-Elemente-Software inklusive Pre- und Postprozessor der Firma <i>Ansys Inc.</i>
AO	Architecture Object ; plattformunabhängiger Funktionsbaustein für offene Steuerungen, der über ein API in die Steuerung integriert wird.
API	Application Programming Interface ; Schnittstelle zur plattformunabhängigen Programmierung von Funktionsbausteinen in offenen Steuerungen.
BAZ	BeArbeitungsZentrum : Werkzeugmaschine mit mehreren, meist 4 oder 5, interpolierenden Achsen sowie Werkzeugwechsler. Eignet sich für Komplettbearbeitung von Werkstücken.
Baud	Symbolrate, eine Einheit aus der Nachrichtentechnik; Einheitenzeichen: Bd = Symbole/s.
BMBF	BundesMinisterium für Bildung und Forschung (Deutschland).
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAT	Computer Aided Testing
CAX	Computer Aided x , zusammenfassender Begriff für alle CA-Werkzeuge.
CNC	Computer Numeric Control (engl.) = Computerbasierte numerische Steuerung; die → NC-Funktionalität wird über einen Computer realisiert. Wird synonym mit → NC verwendet.

Compile-Zyklus	Benutzerfunktion (Maschinenhersteller), die in den NC-Kern eingebunden werden kann. Mächtigste Methode zur Erweiterung des Funktionsumfangs einer NC-Steuerung (<i>Siemens</i>).
Dendrogramm	von griech. δένδρον (dendron) = Baum; Diagramm zur Visualisierung einer Clusteranalyse, bei der Objekte nach der Ähnlichkeit ihrer Merkmalsausprägungen zu Clustern gruppiert werden.
DESINA	DE zentralisierte und Standardisierte IN st All ationstechnik für Werkzeugmaschinen und Produktionssysteme; vom VDW beauftragtes und vom iwv der TU München durchgeführtes Forschungsprojekt. Seit 2005 als internationale Norm ISO 23570 anerkannt.
DML	Dedicated Manufacturing Line (engl.) = Transferstrasse; ein auf ein bestimmtes Werkstück zugeschnittenes Fertigungssystem.
DO	Drive Object ; bei <i>Siemens</i> -Steuerungen verwendete Bezeichnung für Antriebsobjekte (Motoren, Leistungsteile, Umrichter etc.) in der Steuerungskonfiguration.
DSP	Digital Signal Processor (engl.); Integrierter Schaltkreis zur kontinuierlichen digitalen Verarbeitung von Signalen.
EMO	Exposition Mondiale de la Machine Outil . Leitmesse der Metallbearbeitungsbranche, wird im Zweijahresrhythmus vom → VDW organisiert und findet abwechselnd in Hannover und Mailand (früher auch Paris) statt.
ERC/RMS	Engineering Research Center for Reconfigurable Manufacturing Systems an der University of Michigan in Ann Arbor, USA. Institut, das die Arch-Type RMT als Prototyp einer rekonfigurierbaren Werkzeugmaschine entwickelt hat [59, 108].
FB	Funktionsbaustein (<i>Siemens</i>); Codebaustein mit statischen Daten für die PLC.
FC	Funktion (<i>Siemens</i>); Codebaustein ohne statische Daten für die PLC.
FEM	Finite-Elemente-Methode ; numerisches Verfahren zur näherungsweise Lösung von Differentialgleichungen mit Randbedingungen.
FFMS	Focused Flexibility Manufacturing System (engl.) = Fertigungssystem mit gezielt einstellbarer Flexibilität.
FFZ	Flexible Fertigungszelle ; Fertigungssystem, das aus mehreren verketteten CNC-Bearbeitungszentren besteht.
FMS	Flexible Manufacturing System (engl.) = flexibles Fertigungssystem.
FPGA	Field Programmable Gate Array (engl.); Programmierbarer integrierter Schaltkreis, der die anwendungsspezifische Konfiguration von Elektronikhardware ermöglicht.

FSM	F inite S tate M achine (engl.) = Zustandsmaschine, auch endlicher Automat; Verhaltensmodell eines Systems, das nur Zustände, Zustandsübergänge und Aktionen kennt.
HiL	H ardware- i n- t he- L oop; Verfahren mit dem (i.a. elektronische) Hardware-Komponenten in eine Simulationsumgebung eingebunden und im System auf ihre Funktion getestet werden können.
HMI	H uman M achine I nterface (engl.) = Mensch-Maschine-Schnittstelle; Schnittstelle zur Bedienung einer Maschine, wird heute oftmals über Computer realisiert.
HSK	Kegel-Hohlschaft; eine nach DIN 69893 normierte Werkzeugaufnahme in Werkzeugmaschinen.
IBN	I n B etrieb N ahme; im deutschen Sprachraum weit verbreitete Abkürzung.
IMTS	I nternational M anufacturing T echnology S how. Grösste Werkzeugmaschinenausstellung im amerikanischen Raum. Wird von → AMT im Zweijahresrhythmus in Chicago, IL veranstaltet.
I/O	Input/Output, dt. E/A für Eingabe/Ausgabe
IWF	Institut für W erkzeugmaschinen und F ertigung der ETH Zürich.
KGT	K ugel G ewinde T rieb; im deutschen Sprachraum weit verbreitete Abkürzung.
KMU	Kleine und mittelgrosse Unternehmen.
Kontenda	K ontaktlose E nergie- und D atenübertragung für innovative Anwendungen; Forschungsprojekt des Instituts für Automation und Kommunikation e.V. (ifak), Magdeburg.
KSM	K ühl S chmier M ittel; Medium, das zur Kühlung und Verringerung der Reibung zwischen Werkzeug- und Werkstückoberfläche eingesetzt wird.
MATLAB	Software der Firma <i>The MathWorks Inc.</i> zur Lösung mathematischer Probleme. MATLAB ist besonders geeignet für numerische Berechnungen mit Hilfe von Matrizen (MATrix LABoratory).
MD	M achine D atum; bei <i>Siemens</i> -Steuerungen verwendete Bezeichnung für NC-Parameter in der Steuerungskonfiguration.
MECOMAT	M Echatronic C ompiler for M Achine T ool design; Europäisches Forschungsprojekt im 5. Rahmenprogramm.
METEOR 2010	M Ehr T echnologie O rientierte R e konfigurierbare Werkzeugmaschine 2010; vom → BMBF gefördertes Forschungsprojekt unter Leitung des PTW der TU Darmstadt und der MAG Powertrain Ex-Cell-O GmbH.
MIMO	M ultiple I nput M ultiple O utput (engl.); Bezeichnung für ein System mit mehreren Eingängen und mehreren Ausgängen.

Modelica	Objektorientierte, neutrale Beschreibungssprache für physikalische Modelle jeglicher Disziplin.
NC	N umeric C ontrol (engl.) = Numerische Steuerung; Steuerung, die Anweisungen in numerischer Form verarbeitet und daraus analoge Steuersignale generiert. Wird synonym mit → CNC verwendet.
OAC	O pen A rchitecture C ontrol (engl.) = Steuerung mit offener Architektur, d.h. die Steuerungsarchitektur kann über allgemeine Funktionsbausteine angepasst werden.
OB	Organisationsbaustein (<i>Siemens</i>); Schnittstelle zwischen Betriebssystem und Anwenderprogramm in der PLC.Im OB wird die Bearbeitungsreihenfolge des Anwenderprogramms festgelegt.
OMAC	1. O pen M odular A rchitecture C ontroller (engl.); US-amerikanisches Industrieforum zur Definition einer API für → OACs. 2. O rganization for M achine A utomation and C ontrol (engl.) = Organisation für Maschinenautomatisierung und -steuerung; Aus der Nutzergruppe für 1 hervorgegangene Organisation mit heute ca. 500 Mitgliedsfirmen
OSACA	O pen S ystem A rchitecture for C ontrols within A utomation systems; Projektname und Bezeichnung einer offenen Steuerungsarchitektur.
OSEC	O pen S ystem E nvironment for manufacturing C onsortium; Japanisches Konsortium, das eine offene Steuerungsarchitektur mit API ausgearbeitet hat.
PLC	P rogrammable L ogic C ontroller (engl.) = Speicherprogrammierbare Steuerung; frei programmierbare Ablaufsteuerung mit zyklischer Programmabarbeitung. Aus den Werten an den Signaleingängen (z.B. Sensoren) wird ein Eingangsabbild erstellt, dieses wird im Programm verarbeitet und schliesslich wird ein Ausgangsabbild auf die Ausgänge (z.B Aktoren) geschrieben.
proaktiv	eine Situation herbeiführend oder beherrschend, indem man anstatt auf etwas Geschehenes zu reagieren durch differenzierte Vorausplanung und zielgerichtetes Handeln die Entwicklung eines Geschehens selbst bestimmt [Duden].
ProfiBus	P rocess F ield B us; Europäische Feldbusnorm
ProfiBus DP	P rocess F ield B us mit Protokoll DP (dezentrale Peripherie). Zentrale und dezentrale Peripherie werden gleich angesprochen.
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
RekoWeMa	R ekonfigurierbare W erkzeugmaschine; Kurzbezeichnung für die am IWF/inspire der ETH Zürich entwickelte Prototypmaschine.

RMT	R econfigurable M achine T ool (engl.) = rekonfigurierbare Werkzeugmaschine
RMS	R econfigurable M anufacturing S ystem (engl.) = rekonfigurierbares Fertigungssystem
SERCOS	S ERial R ealtime C OMmunication S ystem; Weltweit genormte (IEC 61491 und EN61491) digitale Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Steuerungen und Antrieben. Einsatz zur numerischen Steuerung von Hochleistungsantrieben im Maschinenbau.
Simulink	Software der Firma <i>The MathWorks Inc.</i> zur Modellierung und Simulation verschiedenartiger Systeme.
SIMO	S ingle I nput M ultiple O utput (engl.); Bezeichnung für ein System mit einem einzigen Eingang und mehreren Ausgängen.
SISO	S ingle I nput S ingle O utput (engl.); Bezeichnung für ein System mit genau einem Eingang und einem Ausgang.
SMED	S ingle M inute E xchange of D ie (engl.); Bezeichnung aus Lean Six Sigma für sehr kurze Umrüstzeiten.
SPS	S peicher P rogrammierbare S teuerung; dt. Bezeichnung für → PLC
Taylor-Gleichung	empirische Gleichung zur Bestimmung der Standzeit von Werkzeugen; sie wurde von Frederick Winslow Taylor (1856-1915), Betriebsleiter bei Ford in Detroit erarbeitet.
TCP	T ool C entre P oint (engl.) = Werkzeugmittelpunkt, Werkzeugbezugspunkt; Der Eingriffspunkt des Werkzeuges am Werkstück
UML	U nified M odeling L anguage; standardisierte Sprache zur abstrakten Modellierung von Systemen.
Urlöschen	Vorgang auf einer PLC oder NC, bei der von einem geschützten Speicherbereich ein Grundprogramm bzw. eine Grundkonfiguration auf die Steuerung geladen wird (<i>Siemens</i>). Wird verwendet, um einen definierten Ausgangszustand zu erhalten.
VDI	V erein D eutscher I ngenieur e e.V.
VDW	V erein D eutscher W erkzeugmaschinenfabriken e.V.; Organisator der → EMO.
VERICUT	Software der Firma <i>CGTech</i> zur kinematischen Simulation von Zerspanungsvorgängen auf Basis von ISO-NC-Code. Hauptanwendungsgebiet ist die Überprüfung auf Kollisionen und Fehler.
WZM	W erk Z eug M aschine; im deutschen Sprachraum weit verbreitete Abkürzung.
Zyklus	1. Ein Zyklus in einer → PLC besteht aus drei Bearbeitungsschritten: Erstellen des Eingangsabbildes, Programmdurchlauf, Übertragen des Ausgangsabbildes an den Prozess.
Zykluszeit	Zeit für die einmalige Bearbeitung eines Anwenderprogramms

Literaturverzeichnis

- [1] ABDI, Mohammad Reza ; LABIB, Ashraf W.: *A design strategy for reconfigurable manufacturing systems (RMSs) using analytical hierarchical process (AHP) - a case study*. In: *International Journal of Production Research* 41 (2003), Nr. 10, S. 2273 – 2299. – ISSN 0020-7543 1366-588X.
- [2] ABELE, Eberhard (Hrsg.): *Mehrtechnologie orientierte rekonfigurierbare Werkzeugmaschine – Forschungsprojekt METEOR: Entwicklung und Industrietransfer*. Darmstadt, 2007. – ISBN 978-3-87525-262-0.
- [3] ABELE, Eberhard ; KORFF, Dennis ; WÖRN, Arno: *Mechanische Schnittstellen modularer Werkzeugmaschinen*. In: *wt Werkstattstechnik online* 99 (2009), Nr. 1/2, S. 2 – 9.
- [4] ABELE, Eberhard ; LIEBECK, T. ; WÖRN, Arno: *Measuring Flexibility in Investment Decisions für Manufacturing Systems*. In: *Annals of the CIRP* Bd. 1. CIRP, 2006, S. 433 – 436.
- [5] ABELE, Eberhard ; WÖRN, Arno: *Economic Production with Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS)*. In: WISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK E.V. (WGP) (Hrsg.): *Production Engineering - Research and Development* Bd. XII. Braunschweig : WGP, 2005, S. 189 –192.
- [6] AHUETT, Horacio ; ACA, Joaquin ; MOLINA, Arturo: *A Directed Evolution Modularity Framework for Design of Reconfigurable Machine Tools*. In: LUO, Yuhua (Hrsg.): *Cooperative Design, Visualization, and Engineering - Proceedings of the 2nd International Conference*. Berlin : Springer, 2005 (Lecture Notes in Computer Science 3675), S. 243 – 252.
- [7] ALTINTAS, Y. ; CAO, Y.: *Virtual Design and Optimization of Machine Tool Spindles*. In: *Annals of the CIRP* Bd. 54. CIRP, 379 – 382.
- [8] ALTINTAS, Yusuf ; BRECHER, Christian ; WECK, Manfred ; WITT, Stephan: *Virtual Machine Tool*. In: *Annals of the CIRP* Bd. 54. CIRP, 651 – 674.

-
- [9] AMT, The Association For Manufacturing Technology: *mtconnect.org - Home*. URL: www.mtconnect.org – Stand: 14.10.2008.
- [10] AUTODRILL: *Multispindle Drill Heads for Drilling and Tapping*. URL: <http://www.multispindle-drill-heads.com/> – Stand: 22.06.2010.
- [11] BATHELT, Jens: *Entwicklungsmethodik für SPS-gesteuerte mechatronische Systeme*. Zürich, ETH Zürich, Zentrum für Produktentwicklung, Diss., 2006.
- [12] BAYUS, Barry L.: *Are Product Life Cycles Really Getting shorter?* In: HUSTAD, Thomas P. (Hrsg.): *The Journal of Product Innovation Management* Bd. 11. Elsevier, September 1994, S. 300 – 308.
- [13] BIRLA, Sushil ; FAULKNER, David ; MICHALOSKI, John ; SORENSON, Steve ; WEINERT, George ; YEN, Jerry: *Reconfigurable Machine Controllers using the OMAC API*. In: *Proceedings of the CIRP 1st International Conference on Reconfigurable Manufacturing*. Ann Arbor, 2001.
- [14] BLUMENAU, Jean-Claude ; KOTZ, Thomas: *Wandlungsfähigkeit auf Abruf*. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 100 (2005), Nr. 1-2, S. 42 – 46.
- [15] BOOTHROYD, Geoffrey ; DEWHURST, Peter ; KNIGHT, Winston: *Product design for manufacture and assembly*. New Yorker [etc.] : Dekker, cop, 1994.
- [16] BOSCH REXROTH AG (Hrsg.): *Rexroth IndraDrive Mi Antriebsysteme – Projektierung*, Ausgabe 03, 2008.
- [17] BOSCH REXROTH AG: *Motorintegrierte Antriebe – Rexroth IndraDrive Mi*. URL: http://www.boschrexroth.com/business_units/brc/subwebsites/product_catalogue/de/antriebstechnik_de/indradrive_mi_de/index.jsp – Stand: 14.10.2008.
- [18] BOSCH REXROTH: *SERCOS PakProfile*. URL: www.boschrexroth.com/business_units/brc/en/branchen_en/sif_en/sif_news_en/news_0410_packprofile_en/index.jsp?searchQuery=omac – Stand: 22.10.2008.
- [19] BOUTELLIER, Roman ; GASSMANN, Oliver ; VON ZEDTWITZ, Maximilian: *Managing Global Innovation*. Berlin : Springer, 2000. – ISBN 3-540-66832-2.
- [20] BROCKHAUS-VERLAG (Hrsg.): *Brockhaus - Die Enzyklopädie: in 30 Bänden*. 21. Auflage. Leipzig : F.A. Brockhaus, 2005-07.
- [21] BRUCCOLERI, Manfredi ; AMICO, Michele ; PERRONE, Giovanni: *Distributed intelligent control of exceptions in reconfigurable manufacturing systems*. In: *International Journal of Production Research* 41 (2003), Nr. 7, S. 1393 – 1412. – ISSN 0020-7543 1366-588X.

- [22] BRUCCOLERI, Manfredi ; PASEK, Zbigniew J. ; KOREN, Yoram: *Operation management in reconfigurable manufacturing systems: Reconfiguration for error handling*. In: *International Journal of Production Economics* 100 (2006), S. 87 – 100.
- [23] CANOO ENGINEERING AG: *Deutsche Grammatik, Online Wörterbuch zur Rechtschreibung, Flexion und Wortbildung für die Sprache Deutsch*. URL: www.canoo.net – Stand: 2008.
- [24] CHEN, Li ; XI, Fengfeng ; MACWAN, Ashish: *Optimal Module Selection for Preliminary Design of Reconfigurable Machine Tools*. In: *Transactions of the ASME* 127 (2005), February, Nr. 1, S. 104 – 115.
- [25] DHUPIA, Jaspreet ; POWALKA, Bartosz ; KATZ, Reuven ; ULSOY, A. Galip: *Dynamics of the arch-type reconfigurable machine tool*. In: *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2006), S. 326 – 334.
- [26] DIERSSEN, Stefan: *Systemkopplung zur komponentenorientierten Simulation digitaler Produkte*. Zürich, ETH Zürich, Zentrum für Produktentwicklung, Diss., 2002.
- [27] Norm DIN 323-1: *Normzahlen und Normzahlreihen; Hauptwerte, Genauwerte, Rundwerte*.
- [28] Norm DIN 8580: *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*.
- [29] EMAG (Hrsg.) ; Schwäbische Werkzeugmaschinen GmbH: *Modular und skalierbar: Die Bohrkopfmaschine BM 1250 von SW*, 2005.
- [30] EUROPÄISCHE UNION: *Richtlinie 2005/32/EG des europäischen Parlaments und des Rates (EuP)*. 22.07.2005.
- [31] EUROPÄISCHE UNION: *Richtlinie 2009/125/EG des europäischen Parlaments und des Rates (ErP)*. 31.10.2009.
- [32] EVERSHEIM, Walter (Hrsg.) ; SCHUH, Günther (Hrsg.): *Betriebshütte - Produktion und Management*. Bd. 2. 7. Berlin : Springer, 1996. – ISBN 3-540-59360-8.
- [33] FUNCTIONBAY GMBH: *RecurDyn*. URL: www.functionbay.de – Stand: 29.10.2008.
- [34] GALAN, R. ; RACERO, J. ; EGUIA, I. ; GARCIA, J.M. : *A systematic approach for product families formation in Reconfigurable Manufacturing Systems*. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23 (2007), 489 – 502.
- [35] GERSHENSON, JK ; PRASAD, GJ ; ZHANG, Y: *Product modularity: definitions and benefits*. In: *Journal of Engineering Design* 14 (2003), September, Nr. 3, 295 – 313. – ISSN 0954-4828.

- [36] GIRI, Deepak ; MOON, Yong-Mo: *Error Modeling in a Reconfigurable Machine Tool*. In: *Proceedings of International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE)* ASME, 2005, S. 1001 – 1007.
- [37] HART, Anastasios John ; SLOCUM, Alexander ; WILLOUGHBY, Patrick: *Kinematic coupling interchangeability*. In: *Precision Engineering* 28 (2004).
- [38] HEISEL, Uwe ; MEITZNER, Martin: *Technische Wissensbibliothek zur Rekonfigurierung von Fertigungssystemen*. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 97 (2002), Juli, Nr. 7-8, S. 397 – 399. – ISSN 0947-0085.
- [39] Norm IEC 61131-3: *Speicherprogrammierbare Steuerungen; Teil 3: Programmiersprachen*.
- [40] IFAK, Institut für Automation und Kommunikation e.V.: *Kontenda – Kontaktlose Energie- und Datenübertragung für innovative Anwendungen*. URL: www.kontenda.de – Stand: 14.10.2008.
- [41] INDEX-WERKE GMBH & CO.KG: *INDEX-Werke GmbH & Co. KG – Produkte*. URL: http://www.index-werke.de/de/deutsch/521_DEU_HTML.htm – Stand: 02.08.2008.
- [42] Norm ISO 10791: *Prüfbedingungen für Bearbeitungszentren – Teil 1*.
- [43] Norm ISO 230-2: *Test code for machine tools – Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes*.
- [44] Norm ISO 230-3: *Test code for machine tools – Part 3 : Determination of thermal effects*.
- [45] Norm ISO 230-9: *Test code for machine tools – Part 9: Estimation of measurement uncertainty for machine tool tests according to series ISO 230, basic equations*.
- [46] Norm ISO 23570: *Industrial automation systems and integration - Distributed installation in industrial applications*.
- [47] JANISCH, Christoph: *Hochgeschwindigkeitsverzinkung (HGV) geometrisch komplexer Bauteile*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss., 2007.
- [48] KABELSCHLEPP GMBH: *Kabelschlepp : Robotrax*. URL: <http://www2.kabelschlepp.de/produkte/energiefuehrungen/robotrax/index.html> – Stand: 17.07.2010.

- [49] KATZ, Reuven ; MOON, Yong-Mo: *Vitual Arch Type Reconfigurable Machine Tool Design: Principles and Methodology* / The University of Michigan, NSF ERC for RMS. Ann Arbor, September 2000. – Bericht.
- [50] KATZ, Reuven ; YOOK, John ; KOREN, Yoram: *Control of a Non-Orthogonal Reconfigurable Machine Tool*. In: *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 126 (2004), June, Nr. 2, 397 – 405.
- [51] KINKEL, Steffen ; LAY, Gunter ; MALOCA, Spomenka: *Produktionsverlagerungen ins Ausland und Rückverlagerungen* / Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe, Oktober 2004. – Forschungsbericht.
- [52] KIRCHER, Christian ; MEITZNER, Martin ; HEISEL, Uwe ; WURST, Karl-Heinz: *Wandelbare, zielvariable Bearbeitungssysteme*. In: *Industrie Management* 20 (2004), April, Nr. 2, S. 17 – 20. – ISSN 1434–1980.
- [53] KIRCHER, Christian ; SEYFARTH, Michael ; WURST, Karl-Heinz: *Modellbasiertes Rekonfigurieren von Werkzeugmaschinen*. In: *wt Werkstattstechnik online* 94 (2004), Nr. 5, S. 179 – 183.
- [54] KIRCHER, Christian ; WURST, Karl-Heinz: *Modulkonzept für rekonfigurierbare Bearbeitungs- und Steuerungssysteme*. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 101 (2006), Nr. 6, S. 360 – 365.
- [55] KLOCKE, Fritz (Hrsg.) ; PRITSCHOW, Günter (Hrsg.): *Autonome Produktion*. Berlin : Springer, 2004. – ISBN 3–540–00518–8.
- [56] KOMET GROUP GMBH: *KOMET GROUP – Mechatronic*. URL: <http://www.kometgroup.com/tools-navigation/tools/mechatronic.html> – Stand: 22.06.2010.
- [57] KONO, Daisuke ; LORENZER, Thomas ; WEIKERT, Sascha ; WEGENER, Konrad: *Evaluation of modelling approaches for machine tool design*. In: *Precision Engineering* (2009).
- [58] KOREN, Yoram. *Manufacturing Technologies for Machines of the Future*. Kapitel 19 Reconfigurable Manufacturing Systems. Berlin : Springer, 2003, S. 627 – 665.
- [59] KOREN, Yoram. *Reconfigurable Machine Tools*. S. 525 – 534. In: [55]. 2004, S. 525 – 534.
- [60] KOREN, Yoram ; HEISEL, Uwe ; JOVANE, Francesco ; MORIWAKI, T. ; PRITSCHOW, Günter ; ULSOY, Galip ; VAN BRUSSEL, Hendrik: *Reconfigurable Manufacturing Systems*. In: *Annals of the CIRP* Bd. 48. CIRP, 1999, S. 527 – 540.

- [61] KRUSZEWSKI, Jan: *Application of the Stiff Finite Elements Method for Calculation of Natural Vibration Frequency of Ship Structure*. In: *Communications of the Third World Congress for the Theory of Machines and Mechanisms* Bd. F. Kupari, Yugoslavia, September 1971, S. 147 – 160.
- [62] LANDERS, R.G. ; MIN, B.-K. ; KOREN, Y.: *Reconfigurable Machine Tools*. In: *Annals of the CIRP* Bd. 50. CIRP, 2001, S. 269 – 274.
- [63] LIAN, Feng-Li ; MOYNE, James R. ; TILBURY, Dawn M.: *Implementaiton of Networked Machine Tools in Reconfigurable Manufacturing Systems*. In: *2000 Japan-USA Symposium on Flexible Automation*. Ann Arbor, July 2000.
- [64] LICON MT GMBH & CO. KG: *Licon MT: Produkte*. URL: <http://www.licon.com/produkte.php?page=1> – Stand: 28.06.2010.
- [65] LORENZER, Thomas: *Auswertung des Fragebogens zum Produktionszyklus in Fertigungsunternehmen*. Zürich, Dezember 2007.
- [66] LORENZER, Thomas: *Mehr Flexibilität zu niedrigeren Kosten*. In: *WB Werkstatt + Betrieb* 141 (2008), Nr. 3, S. 16 – 21. – ISSN 0043–2792.
- [67] LORENZER, Thomas ; WEIKERT, Sascha ; BOSSONI, Sergio ; WEGENER, Konrad: *Modeling and evaluation tool for supporting decisions on the design of reconfigurable machine tools*. In: *Journal of Manufacturing Systems* 26 (2008), Nr. 3+4, S. 167 – 177. – ISSN 0278–6125.
- [68] LORENZER, Thomas ; WEIKERT, Sascha ; WEGENER, Konrad: *Decision-making Aid for the Design of Reconfigurable Machine Tools*. In: ELMARAGHY, Hoda A. (Hrsg.) ; ZAEH, Michael F. (Hrsg.) ; REINHART, Gunther (Hrsg.) ; ELMARAGHY, Waguih H. (Hrsg.): *2nd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production*. Toronto, Canada, 2007, S. 720 – 729.
- [69] LORENZER, Thomas ; WEIKERT, Sascha ; WEGENER, Konrad: *Efficient Modelling and Simulation of Reconfigurable Machine Tools Using Predefined Structural Modules*. In: ZAEH, Michael F. (Hrsg.): *3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production*. München : Herbert Utz, 2009, S. 214 – 223.
- [70] LORENZER, Thomas ; WEIKERT, Sascha ; WEGENER, Konrad: *Mechatronic Models for Evaluation of Reconfigurable Machine Tool Designs*. In: *Proceedings of the 12th Mechatronics forum Biennial International Conference*. Zürich, Switzerland, June 2010, S. 245 – 250.

- [71] LUTZ, Peter ; SPERLING, Wolfgang: *OSACA - the vendor neutral Control Architecture*. In: FICHTNER, D. (Hrsg.): *Proceedings of the European Conference on Integration in Manufacturing*. TU Dresden.
- [72] MAG INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS HEADQUARTERS – MARTIN WINTERSTEIN: *MAG – The Global Machine Tool Manufacturer: SPECHT HMC 500*. URL: <http://www.mag-ias.com/mag/produkte-services/fraestechnologie/horizontal-bearbeitung/specht-hmc/specht-hmc-500.html> – Stand: 28.06.2010.
- [73] MAG INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS: *MAG - The Global Machine Tool Manufacturer: Höchste Produktivität auf kleinstem Raum*. URL: <http://www.mag-ias.com/de/home/news/current-news/news-article/article/201/195.html?cHash=fa8ddfdaad> – Stand: 23.09.2008.
- [74] MAGLIE, Pascal: *Ordnungsreduktionsmethoden*. In: WEGENER, Konrad (Hrsg.): *Symposium Simulation von Werkzeugmaschinen*. Zürich, Januar 2008.
- [75] MAGLIE, Pascal: *Integration von ANSYS Workbench und Matlab zur Simulation von Werkzeugmaschinen*. In: *ANSYS Conference & 14. Schweizer Users' Meeting*, 2009.
- [76] MAGLIE, Pascal ; WEIKERT, Sascha ; WEGENER, Konrad ; RUDNYI, Evgenii: *Integration von flexiblen Bauteilen in der gekoppelten Simulation von Werkzeugmaschinen mittels Anwendung von FE-basierten Reduktionsmethoden*. In: VDI-WISSENSFORUM (Hrsg.): *VDI Mechatronik 2009*. Wiesloch bei Heidelberg, Mai 2009.
- [77] MAYR, Josef ; ESS, Markus ; WEIKERT, Sascha ; WEGENER, Konrad: *Calculating thermal location and component errors on machine tools*. In: *Proceedings ASPE Annual Meeting American Society of Precision Engineering*, 2009.
- [78] MAYR, Josef ; ESS, Markus ; WEIKERT, Sascha ; WEGENER, Konrad: *Compensation of Thermal Effects on Machine Tools using a FDEM Simulation Approach*. In: *Proceedings Lamdamap American Society of Precision Engineering*, 2009.
- [79] MEHRABI, M.G. ; ULSOY, A.G. ; KOREN, Y.: *Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing*. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 11 (2000), S. 403 – 419.
- [80] MILBERG, Joachim. *Die agile Produktion*. S. 549 – 563. In: [55]. 2004, S. 549 – 563.
- [81] MOON, Yong-Mo ; KOTA, Sridhar: *Design of Reconfigurable Machine Tools*. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 124 (2002), May, S. 480 – 483.

- [82] NEUGEBAUER, Reimund ; DENKENA, Berend ; WEGENER, Konrad: *Mechatronic Systems for Machine Tools*. In: *Annals of the CIRP* Bd. 56. CIRP, 2007.
- [83] NYHUIS, Peter ; REINHART, Gunther ; ABELE, Eberhard: *Wandlungsfähige Produktionssysteme – Heute die Industrie von morgen gestalten*.
- [84] OHASHI, Kazushi ; SHIN, Kang G.: *Model-based Control for Reconfigurable Manufacturing Systems*. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation* Bd. 1, 553 – 558.
- [85] OMAC: *OMAC / About OMAC*. URL: www.omac.org – Stand: 22.10.2008.
- [86] PARK, H. S. ; ANH, D. B. H. ; JEONG, S. Y. ; CHA, S. K.: *Model driven development of PLC program for an assembly cell*. In: ZAEH, Michael F. (Hrsg.): *3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production*. München : Herbert Utz, 2009, S. 387 – 396.
- [87] PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT, WEB-REDAKTION: *Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)*. URL: <http://www.ptb.de/de/wegweiser/industriekunden/kalibrierung.html> – Stand: 06.07.2010.
- [88] S.A., PIBOMULTI: *PIBOMULTI S.A. Mécanique de précision*. URL: <http://www.pibomulti.com/> – Stand: 22.06.2010.
- [89] POUGET, Philippe M.: *Die echte Modularität*. In: *SMM Schweizer Maschinenmarkt* 100 (1999), Februar, Nr. 8, S. 30 – 32. – ISSN 0036–7397.
- [90] POUGET, Philippe M.: *Ganzheitliches Konzept für rekonfigurierbare Produktionssysteme auf Basis autonomer Produktionsmodule*. Zürich, ETH Zürich, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung, Diss., 2000.
- [91] PRITSCHOW, G. ; KRAMER, C.: *Open System Architecture for Drives*. In: *Annals of the CIRP* Bd. 54. CIRP, 375 – 378.
- [92] PRITSCHOW, G. ; RÖCK, S.: *"Hardware in the Loop" Simulation of Machine Tools*. In: *Annals of the CIRP* Bd. 53. CIRP, 295 – 298.
- [93] PRITSCHOW, Günter ; ALTINTAS, Yusuf ; JOVANE, Francesci ; KOREN, Yoram ; MITSUISHI, Mamoru ; TAKATA, Shozo ; BRUSSEL, Hendrik van ; WECK, Manfred ; YAMAZAKI, Kazuo: *Open Controller Architecture – Past, Present and Future*. In: *Annals of the CIRP* Bd. 50. CIRP, 463 – 470.
- [94] PRITSCHOW, Günter ; BRETSCHNEIDER, Jochen: *A Self-Tuning Controller for Digitally Controlled Electromechanical Servo Drives in Machine Tools*. In: *Annals of the CIRP* Bd. 48. CIRP, 307 – 312.

- [95] RATAZZI-FOERSTER, Birgitta: *Rückverlagerung*. URL: http://www.rkw.de/02_loesung/02_Produktion/K_Pub_Produktion/K_FI_Rueckverlagerung/index.html – Stand: 20.05.2008.
- [96] REFA - VERBAND FÜR ARBEITSSUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V.: *Methodenlehre des Arbeitsstudiums*. Bd. 2, Datenermittlung. 7. Auflage. München : Carl Hanser, 1992.
- [97] REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.): *Lexikon der Betriebsorganisation*. 1. München : Carl Hanser, 1993 (Methodenlehre der Betriebsorganisation). – ISBN 3-446-17523-7.
- [98] REINHART, Gunther: *Methoden der Unternehmensführung*. Vorlesungsskript, TU München. München, 2002.
- [99] REINHART, Gunther ; DÜRRSCHMIDT, Stephan ; HIRSCHBERG, Arnd ; SELKE, Carsten: *Reaktionsfähigkeit für Unternehmen*. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 94 (1999), Nr. 1-2, S. 21 – 24. – ISSN 0947-0085.
- [100] REINHART, Gunther ; HENSEL, Thomas ; LINDWORSKY, Alexander: *Simulation Based PLC-System Design*. In: ZAEH, Michael F. (Hrsg.): *3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production*. München : Herbert Utz, 2009, S. 888 – 898.
- [101] REINHART, Gunther ; LACOUR, Frédéric-Felix: *Physically based Virtual Commissioning of Material Flow Intensive Manufacturing Plants*. In: ZAEH, Michael F. (Hrsg.): *3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production*. München : Herbert Utz, 2009, S. 377 – 386.
- [102] RIBA R., Carles ; PÉREZ R., Roberto ; AHUETT G., Horacio ; SÁNCHEZ A., Jorge L. ; DOMÍNGEZ, María D. ; MOLINA G., Arturo: *Metrics for Evaluating Design of Reconfigurable Machine Tools*. In: LUO, Yuhua (Hrsg.): *Cooperative Design, Visualization, and Engineering - Proceedings of the 3rd International Conference* Bd. 4101. Berlin : Springer, 2006, S. 234 – 241.
- [103] ROMAI ROBERT MAIER GMBH: *ROMAI GmbH Starre Mehrspindelköpfe – Winkelköpfe – Gelenk Mehrspindelköpfe – Stationäre Mehrspindelköpfe – Angetriebene Werkzeuge Schnell-Lauf-Spindel*. URL: <http://www.romai.de> – Stand: 22.06.2010.
- [104] RUDNYI, Evgeny: *Von der FEM- zur Systemsimulation*. In: *Mechatronik* 10 (2008), Nr. 10, 34 – 36.
- [105] SAMTECH GROUP: *Samtech Group*. URL: www.samtech.fr – Stand: 29.10.2008.

-
- [106] SCHUH, Günther ; LÖSCH, Felix ; GOTTSCHALK, Sebastian ; HARRE, Jan ; KAMPKER, Achim: *Gestaltung von Betriebsmitteln für die Serienproduktion*. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 99 (2004), Nr. 5, S. 212 – 217.
- [107] SCHULER AG: *Laseranlage PEDILAS*. URL: http://www.schulergroup.com/major/pool/10_Anlagen_Verfahren/11_Laseranlagen/02_Pedilas/index.html – Stand: 21.12.2009.
- [108] Schutzrecht US 5 943 750 Patent (1999): *Reconfigurable machine tool*.
- [109] Schutzrecht US 6 309 319 Patent (2000): *Reconfigurable power spindle*.
- [110] Schutzrecht US 6 442 815 Patent (2002): *Reconfigurable automatic tool changer*.
- [111] Schutzrecht US 6 569 071 Patent (2002): *Reconfigurable multi-spindle apparatus*.
- [112] SHABAKA, Amr ; ELMARAGHY, Hoda: *Mapping Products Machining Requirements and Machine Tools Structure Characteristics in RMS*. In: ZAEH, Michael F. (Hrsg.) ; REINHART, Gunter (Hrsg.): *1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production*. München : Herbert Utz, 2005, S. 289 – 296.
- [113] SIEDL, Daniel: *Flexible Mehrkörpersimulation zur Simulation der Verfahrbewegungen von Werkzeugmaschinen*. In: WEGENER, Konrad (Hrsg.): *Symposium Simulation von Werkzeugmaschinen*. Zürich, Januar 2008.
- [114] SIEMENS AG: *SINAMICS S120 Funktionshandbuch*, 10 2008.
- [115] SIEMENS AG: *SINUMERIK 840D sl SINAMICS S120 IBN CNC: NCK, PLC, Antrieb*, 01 2008.
- [116] SIEMENS AG (Hrsg.): *SIMATIC Controller Software – Werkzeuge zum Projektieren und Programmieren von SIMATIC Controllern*, 2010.
- [117] SIEMENS AG: *OMAC - Siemens*. URL: www.siemens.de/automation/omac – Stand: 22.10.2008.
- [118] SIEMENS AG: *SINUMERIK 840D sl - Industry Mall - Siemens WW*. URL: <https://eb.automation.siemens.com/goos/catalog/Pages/ProductData.aspx?region=WW&language=de&nodeid=10027421&activetab=order®ionUrl=%2f#activetab=product> – Stand: 23.06.2010.
- [119] SINTESI SCPA: *Orchestra Control Engine*. URL: www.orchestracontrol.com – Stand: 18.12.2009.
- [120] SINTESI SCPA: *Sintesi SCpA | Advanced in Mechatronics*. URL: www.sintesi-scpa.com – Stand: 18.12.2009.

- [121] SLACK, Nigel: *Flexibility as a Manufacturing Objective*. In: *International Journal of Operations & Production Management* 3 (1983), 4 – 13. – ISSN 0144–3577.
- [122] SLOCUM, Alexander: *Kinematic couplings: A review of design principles and applications*. In: *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 50 (2010), April, Nr. 4, 310 – 327.
- [123] SPERLING, Wolfgang ; LUTZ, Peter: *Designing applications for an OSACA control*. In: *Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition*.
- [124] STANIK, Markus ; WOHLFAHRT, Helmut ; GREIF, Josef: *Ein wichtiger Schritt in die Zukunft*. In: *WB Werkstatt + Betrieb* 141 (2008), Nr. 3, S. 30 – 35. – ISSN 0043–2792.
- [125] STARRAGHECKERT HOLDING AG: *STC 1000*. URL: <http://www.starragheckert.com/sh/index.php/de/produkte/5-achs-zentren/stc-1000-1600> – Stand: 28.06.2010.
- [126] STÖCKER, Horst (Hrsg.): *Taschenbuch der Physik*. 4. Thun : Harri Deutsch, 2000. – ISBN 3–8171–1627–6.
- [127] STOEPLER, Guido ; MENZEL, Thomas ; DOUGLAS, Steve: *Hardware-in-the-loop simulation of machine tools and manufacturing systems*. In: *IEE Computing & Control Engineering* 16 (2005), February/March, Nr. 1, 10 – 15. – ISSN 0956–3385.
- [128] STÄUBLI INTERNATIONAL AG: *Multi-Kupplungen*. URL: <http://www.staubli.com/de/connectors/produkte/multi-kupplungen/> – Stand: 14.10.2008.
- [129] SUH, Nam P.: *Complexity – Theory and Applications*. New York : Oxford University Press, 2005. – 300 S.
- [130] TAKEDA, Hitoshi: *Automation ohne Verschwendung*. Augsburg : Moderne Industrie, 1996. – ISBN 3–478–91490–6.
- [131] TOLIO, T. ; TERKAJ, W. ; VALENTE, A.: *Focused Flexibility and Production System Evolution*. In: ELMARAGHY, Hoda A. (Hrsg.) ; ZAEH, Michael F. (Hrsg.) ; REINHART, Gunther (Hrsg.) ; ELMARAGHY, Waguih H. (Hrsg.): *2nd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production*. Toronto, Canada, 2007, S. 17 – 41.
- [132] ULRICH, Peter ; FLURI, Edgar: *Management*. 7. Bern : Paul Haupt, 1995. – ISBN 3–8252–0375–1.

-
- [133] UNITUBE - TECHNOLOGY GMBH: *Unitube - Modulare Werkzeugmaschinen*. URL: <http://www.unitube.de/de/mwzm.html> – Stand: 02.09.2008.
- [134] VAN BRUSSEL, H. ; SYMENS, Wim: *A mechatronic compiler for machine tool design*. In: WEGENER, Konrad (Hrsg.): *CIRP-Kolloquium Schweiz*. Zürich, November 2005.
- [135] VDI-Richtlinie 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme – Design methodology for mechatronic systems*.
- [136] VDI-Richtlinie 3321: *Schnittwertoptimierung – Grundlagen und Anwendung*.
- [137] VDI-Richtlinie 3423: *Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen – Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung*.
- [138] VDI-Richtlinie 3633: *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Begriffsdefinitionen*.
- [139] VDI/DGQ-Richtlinie 3441: *Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen – Grundlagen*.
- [140] VDW (D. HAGEMANN): *DESINA*. URL: www.desina.de – Stand: 09.10.2008.
- [141] VIBRANT TECHNOLOGY, INC.: *Vibrant Technology, Inc. – ME'scope*. URL: <http://www.vibetech.com/go.cfm/en-us/content/mescope> – Stand: 29.06.2010.
- [142] WARNECKE, Hans-Jürgen: *Einführung in die Fertigungstechnik*. Stuttgart : B.G. Teubner, 1990. – ISBN 3-519-06323-9.
- [143] WEGENER, Konrad ; HORA, Pavel ; KNAPP, Wolfgang ; KUSTER, Friedrich ; LORENZER, Thomas: *Fertigungstechnik*. Vorlesungsskript, ETH Zürich. Zürich, 2008.
- [144] WEIKERT, Sascha: *Beitrag zur Analyse des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen*. Zürich, ETH Zürich, Dissertation, 2000.
- [145] WEIKERT, Sascha ; BOSSONI, Sergio ; WEGENER, Konrad: *Evaluation of Machine Tool Concepts Under Friction Influences*. In: *ASPE Proceedings*. Dallas, Texas, Oktober 2007.
- [146] WESTKÄMPER, E ; ZAHN, E. ; BALVE, P. ; TILEBEIN, M.: *Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen*. In: *wt Werkstattstechnik online* 90 (2000), Nr. 1/2, S. 22 – 26.
- [147] WIENDAHL, H.-P.: *Wandlungsfähigkeit - Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik*. In: *wt Werkstattstechnik online* 92 (2002), Nr. 4, S. 122 – 127.

- [148] WOLF, Horst-Henning: *Vertriebs- und Einkaufsingenieurwesen*. Vorlesung (TU München), 2003.
- [149] WULFSBERG, Jens: *Machine Tool Design for a Higher Changeability*. In: ZAEH, Michael F. (Hrsg.): *3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production*. München : Herbert Utz, 2009, S. 204 – 213.
- [150] WURST, Karl-Heinz ; HEISEL, Uwe ; KIRCHER, Christian: *(Re)konfigurierbare Werkzeugmaschinen – notwendige Grundlage für eine flexible Produktion*. In: *wt Werkstattstechnik online* 96 (2006), Nr. 5, S. 257 – 265.
- [151] WURST, Karl-Heinz ; SCHMITZ, Stefan ; LECHLER, Armin: *Integrierte mechatronische Module für rekonfigurierbare Bearbeitungssysteme*. In: ZHAW, IMS Institut für Mechatronische S. (Hrsg.): *Internationales Forum Mechatronik - Tagungsband*. Winterthur, 2007, S. 68 – 87. – ISBN: 978-3-033-01192-2.
- [152] ZAEH, Michael F. ; MOELLER, Niklas ; VOGL, Wolfgang: *Symbiosis of Changeable and Virtual Production - The Emperor's New Clothes or Key Factor for Future Success?* In: ZAEH, Michael F. (Hrsg.) ; REINHART, Gunther (Hrsg.): *1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production*. München : Herbert Utz, 2005, S. 3 – 10.
- [153] ZAEH, Michael F. ; OERTLI, Thomas: *Finite Element Modelling of Ball Screw Feed Drive Systems*. In: *Annals of the CIRP* Bd. 53. CIRP, 289 – 293.
- [154] ZAEH, Michael F. ; POERNBACHER, Clemens: *A Model-Based Method to Develop PLC Software for Machine Tools*. In: *Annals of the CIRP* Bd. 54. CIRP, 371 – 374.
- [155] ZIRN, Oliver: *Machine Tool Analysis – Modelling, Simulation and Control of Machine Tool Manipulators*. Zürich, ETH Zürich, Habilitation, Oktober 2007.
- [156] ZIRN, Oliver ; WEGENER, Konrad: *Modellbildung und Antriebsinbetriebnahme von Werkzeugmaschinen*. Kursunterlagen, ETH Zürich. Zürich, 2009.
- [157] ZIRN, Oliver ; WEIKERT, Sascha: *Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme*. Berlin : Springer, 2006. – ISBN 978-3-540-25817-9.

Lebenslauf

Name Thomas Siegfried LORENZER
Dipl.-Ing. Univ. Ingénieur ECP
geboren am 15. Februar 1978 in München, Deutschland
verheiratet, 1 Kind

Staatsangehörigkeit deutsch, französisch

09/1988 – 06/1997 Dom-Gymnasium Freising, allgemeine Hochschulreife (Abitur)
11/1998 – 09/2000 Vordiplomstudium Maschinenwesen an der TU München
09/2000 – 01/2005 Doppeldiplomstudium Generalingenieurwesen an der Ecole Centrale Paris und Maschinenwesen an der TU München mit Vertiefung Produktionsmanagement und Mechatronik;
Abschluss: Ingénieur ECP und Dipl.-Ing. Univ.
02/2005 – 01/2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der inspire AG für mechatronische Produktionssysteme und Fertigungstechnik in Zürich
02/2010 – 07/2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (IWF) der ETH Zürich
seit 08/2010 Manufacturing Engineer bei der Institut Straumann AG in Basel