

**Verfügbarkeitssteigerung von
Werkzeugmaschinen durch Einsatz
mechatronischer Sensorlösungen**

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Grades

D O K T O R - I N G E N I E U R

vorgelegt von
Frank Pitter

Erlangen - 2000

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

Tag der Einreichung: 21. September 2000

Tag der Promotion: 12. Januar 2001

Dekan: Prof. Dr.-Ing H. Meerkamm

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann

Prof. Dr.-Ing. W. Bühler

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

Tag der Einreichung: 21. September 2000
Tag der Promotion: 12. Januar 2001
Dekan: Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
Prof. Dr.-Ing. W. Bühler

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Pitter, Frank:

Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz
mechatronischer Sensorlösungen / Frank Pitter. Hrsg. von
Klaus Feldmann. - Bamberg : Meisenbach, 2000
(Fertigungstechnik - Erlangen; Nr.: 108)
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 2000)
ISBN 3-????? ISSN ????

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

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

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

©Meisenbach Verlag Bamberg 2000

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

Vorwort

„Angesichts von Hindernissen mag die kürzeste Linie zwischen zwei Punkten die krumme sein.“

Berthold Brecht: Leben des Galilei, 1938/39

„Aber dennoch für möglich müssen wir es halten, daß uns die Forschung und die Erfahrung, die sich an Erfahrung reiht, jenem großem Augenblick näher bringt, wo der erste frei fliegende Mensch, ... , sich mit Hilfe von Flügeln von der Erde erhebt ...“

Otto Lilienthal: Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst, 1889

Unkonventionelles Denken, Ausdauer und Überzeugung sind wichtige Eigenschaften, um gesetzte Ziele zu erreichen. Die Motivation hierfür hängt sehr vom Umfeld und von Vorbildern ab. Das nötige Umfeld erfuhr ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter des Lehrstuhls FAPS, danke ich für die großzügige Förderung bei der Durchführung meiner Arbeit, die wertvollen Anregungen und vor allen Dingen für den Freiraum, den er mir bei der Bearbeitung der wissenschaftlichen Problemstellungen aus dem Bereich der Werkzeugmaschinen zuteil werden ließ.

Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Bühler danke ich für die Übernahme des Koreferates, die aufgeschlossenen Diskussionen und fachlichen Anregungen.

Diese Dissertation beruht auf mehreren Kooperationsprojekten im Umfeld der Werkzeugmaschinenindustrie. Mein Dank gilt besonders den beteiligten Firmen der bayerischen Forschungsverbände FORMIKROSYS I & II, die durch anwendungsbezogene Aufgabenstellungen und fachliche Diskussionen dazu beigetragen haben, die Relevanz dieser Arbeit für die Anwendung sicherzustellen.

Insbesondere danken möchte ich den Herren Dr. Jochen Thomas, Ulrich Schlag und Thomas Drischel, die als Mitarbeiter der Fraunhofer Gesellschaft für integrierte Schaltungen, technologische Arbeitsfelder dieser Dissertation bearbeiteten.

Weiterhin danke ich meinen Kollegen für die ungezählten fachlichen Diskussionen, und vor allen Dingen den Kollegen aus der Gruppe für Handhabungs- und Montagetechnik für das freundschaftliche Arbeitsverhältnis und die Entlastung, die mir in den schwierigen Phasen zuteil wurde. Allen Freunden, Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften danke ich für ihr großes Engagement, mit dem sie mir bei der täglichen Arbeit und bei der Realisierung von Ideen geholfen haben. Hier sind insbesondere Frau Dipl.-Ing. Gordana Vuckovic und Frau Dipl.-Ing. Dobrinka Veljancic zu nennen, die mir gewissenhaft und unermüdlich zur Seite standen.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Familie. Sie hat durch ihre fortwährende Unterstützung und Rücksichtnahme den erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit möglich gemacht.

Frank Pitter

Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage – Bessere Technologien für Überwachungssysteme.....	1
1.2	Zielsetzung	4
1.3	Die Arbeitsgebiete im Überblick.....	7
2	Situationsanalyse moderner Werkzeugmaschinen und Steuerungen	9
2.1	Die wirtschaftliche Situation der deutschen Maschinenhersteller.....	9
2.1.1	Strukturwandel im Werkzeugmaschinenbau	9
2.1.2	Zulieferstruktur und Abhängigkeiten im Werkzeugmaschinenbau	10
2.1.3	Weitere Anwendungsfelder durch Substitution von Fertigungsverfahren.....	11
2.2	Potenziale moderner Werkzeugmaschinen und Steuerungen	13
2.2.1	Hochfrequenzbearbeitung	13
2.2.2	Hochdynamische Antriebstechnik.....	14
2.2.3	Vorteile der offenen Steuerungstechnik.....	16
2.3	Diskussion von Einflüssen auf Prozess und Maschine	17
2.3.1	Lagerarten für Maschinenspindeln	17
2.3.2	Diskussion und Aufbau moderner Maschinenspindeln.....	18
2.3.3	Werkzeuge für die Drehbearbeitung.....	20
2.3.4	Moderne Schneidstoffe für die Trockenbearbeitung und Minimalmengenschmierung.....	22
2.3.5	Schwingungsverhalten von Werkzeugmaschinen	24
3	Neue Potenziale durch die Mechatronik und Mikrosystemtechnik.....	27
3.1	Abgrenzung der Begriffe	27
3.1.1	Mechatronik	27
3.1.2	Mikrosystemtechnik	30
3.2	Produktion mechatronischer Baugruppen	31
3.2.1	Funktionale Gehäuse aus alternativen Werkstoffen.....	31
3.2.2	Bauelemente und Substrate	33

3.2.3	Maschinen und Systeme	34
3.2.4	Prozesskette für die Produktion mechatronischer Baugruppen	35
3.3	Maßnahmen zur schnellen Technologieeinführung.....	36
3.4	Entwicklung eines signalverstärkten Vibrationsmessmoduls.....	37
3.4.1	Beschreibung der Modulkomponenten	37
3.4.2	Spezifikation des Vibrationssensors in Mikrosystemtechnik.....	39
3.4.3	Herstellungssequenz des Vibrationssensors	42
3.4.4	Aufbau des integrierten Verstärkers	44
3.4.5	Funktionstest des Sensormoduls.....	45
4	Analyse des Problemfelds Prozess- und Maschinenüberwachung.....	48
4.1	Ziele der Prozessüberwachung	48
4.1.1	Abschätzung des wirtschaftlichen Nutzens.....	48
4.1.2	Technische Gesichtspunkte.....	49
4.2	Anforderungen an ein Prozeßüberwachungssystem.....	52
4.2.1	Prozessüberwachung für spanende Werkzeugmaschinen.....	52
4.2.2	Randbedingungen einer effektiven Datenerfassung.....	54
4.2.3	Methoden für die Signalauswertung	57
4.2.4	Beispiele für eine Kollisions-, Bruch- und Verschleißerkennung.....	60
4.3	Diskussion von Überwachungssystemen	63
4.3.1	Systeme zur Schwingungsüberwachung	63
4.3.2	Defizite konventioneller Überwachungssysteme	65
4.3.3	Praxiserfahrungen mit Überwachungssystemen	65
4.3.4	Anforderungen an neue Überwachungssysteme.....	67
4.3.5	Aktuelle Entwicklungsaufgaben und -probleme	67
5	Alternative Methoden zur Signalerfassung und –auswertung	69
5.1	Grundlagen der Sensorik	69
5.1.1	Der Sensorbegriff.....	69
5.1.2	Ausgangssignale	70
5.1.3	Schnittstellen	70
5.1.4	Daten- und Signalverarbeitungsgeräte	71
5.2	Bewertung von Sensoren für die Produktion	74
5.2.1	Sensoren für die Produktionstechnik.....	74
5.2.2	Funktionen von Sensoren in Werkzeugmaschinen	74
5.2.3	Entwicklungstrend in der Sensorik.....	76

5.2.4	Sensoren zur Kraftmessung	79
5.2.5	Piezoresistive Sensoren	81
5.2.6	Piezoelektrische Sensoren	82
5.3	Eigenschaften der Kraftmessung mit DMS	84
5.3.1	Verfahren zur Applikation von DMS.....	84
5.3.2	Aufbau einer Wheatstoneschen Brückenschaltung.....	85
5.3.3	Besonderheiten der 3D-Kraftmessung	87
5.3.4	Kalibrierung eines Kraftmesssystems mit DMS.....	90
6	Analyse von Schwingungssignalen.....	93
6.1	Vergleich verbreiteter Signalauswerteverfahren.....	93
6.1.1	Amplitudenüberwachung	93
6.1.2	Spektralanalyse	93
6.1.3	Stochastische Verfahren.....	93
6.1.4	Autokorrelation.....	94
6.1.5	Cepstrumanalyse.....	94
6.1.6	Hüllkurvenanalyse	95
6.1.7	Schwingungen im Drehprozess	96
6.2	Darstellung von Schwingungen im Zeit- und Frequenzbereich	97
6.3	Spektralanalyse mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT)	99
6.3.1	Grundlagen.....	99
6.3.2	Abtastung und das Abtasttheorem	100
6.3.3	Fensterfunktion und deren Einfluss auf das Spektrum	101
7	Entwicklung eines multisensoriellen Überwachungssystems für das Drehen. 106	106
7.1	Aufbau und Struktur des Werkzeugüberwachungssystems.....	106
7.2	Beschreibung der Komponenten der Sensorplatte.....	107
7.3	Drahtlose Daten- und Energieübertragung.....	108
7.4	Signalauswertung und Maschinenregelung.....	110
7.5	Varianten zur Sensorintegration	111
7.5.1	Prozessdatenerfassung mit piezoelektrischen Sensoren	111
7.5.2	Prozessdatenerfassung mit piezoresistiven Sensoren	113
8	Charakterisierung einer hydraulisch vorspannbaren Spindellagerung als Stellglied eines Regelkreises	115
8.1	Konzeption einer Prozessregelung über die Lagervorspannung.....	115
8.1.1	Motivation für die Eigenfrequenzregelung	115

8.1.2	Struktur des verwendeten Regelkreises	115
8.1.3	Einfluss der Lagervorspannung auf die Spindeleigenschaften	116
8.2	Integration des hydraulisch einstellbaren Lagers in die Drehmaschinenspindel.....	120
8.2.1	Anpassung der Versuchsumgebung.....	120
8.2.2	Das hydraulisch vorspannbare Lager und dessen Charakteristik.....	121
8.2.3	Realisierung der Lagerschmierung und des Vorspanndrucks .	124
8.2.4	Kräfteeinwirkung auf die Spindel	126
8.3	Messaufbau für die Versuchsmaschine	127
8.3.1	Temperatur- und Geometriemessung.....	127
8.3.2	Messaufbau für die Steifigkeitsmessung	128
8.3.3	Messung und Auswertung von Frequenzen	129
8.3.4	Datenerfassung	131
8.3.5	Auswahl der Sensorpositionen	131
8.3.6	Datenauswertung.....	133
8.4	Ermittelte Eigenschaften der Maschinenspindel.....	133
8.4.1	Temperatureigenschaften.....	133
8.4.2	Frequenzverhalten der Drehmaschine.....	135
8.4.3	Geometrieigenschaften.....	142
8.4.4	Oberflächenqualität in Abhängigkeit von der Lagervorspannung.....	142
8.4.5	Steifigkeit der Spindel.....	143
9	Zusammenfassung	145
	Literatur	147
	Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen	157

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage – Bessere Technologien für Überwachungssysteme

Die Hersteller von Werkzeugmaschinen konnten sich in den letzten Jahren wieder sehr gut im internationalen Markt positionieren. Die Verringerung der Fertigungstiefe zur Kosteneinsparung war hierfür ausschlaggebend. Hersteller von Maschinenkomponenten erhielten dadurch einen höheren Stellenwert. Innovationen der Komponentenhersteller waren daher auch die treibende Kraft der Branche. Beispielhaft seien hier Hochfrequenzspindeln oder offene Steuerungskonzepte mit digitaler Antriebstechnik erwähnt [74].

Der Anteil der Mikroelektronik in Werkzeugmaschinen ist in jüngster Zeit deutlich gestiegen, eine Trendwende dieser Zunahme ist nicht in Sicht. Fortschritte in der Mechatronik können weitere innovative Entwicklungen in Werkzeugmaschinen fördern. Die Mechatronik ist gekennzeichnet durch eine Verbindung von mechanischen und elektronischen Elementen, gekoppelt mit Informationsverarbeitung und Aktorik zu einer miniaturisierten Komponente. Mit dieser Technologie ist es möglich, speziell auf Maschinenkomponenten und deren Anforderungen zugeschnittene elektronische Baugruppen zu erzeugen [105].

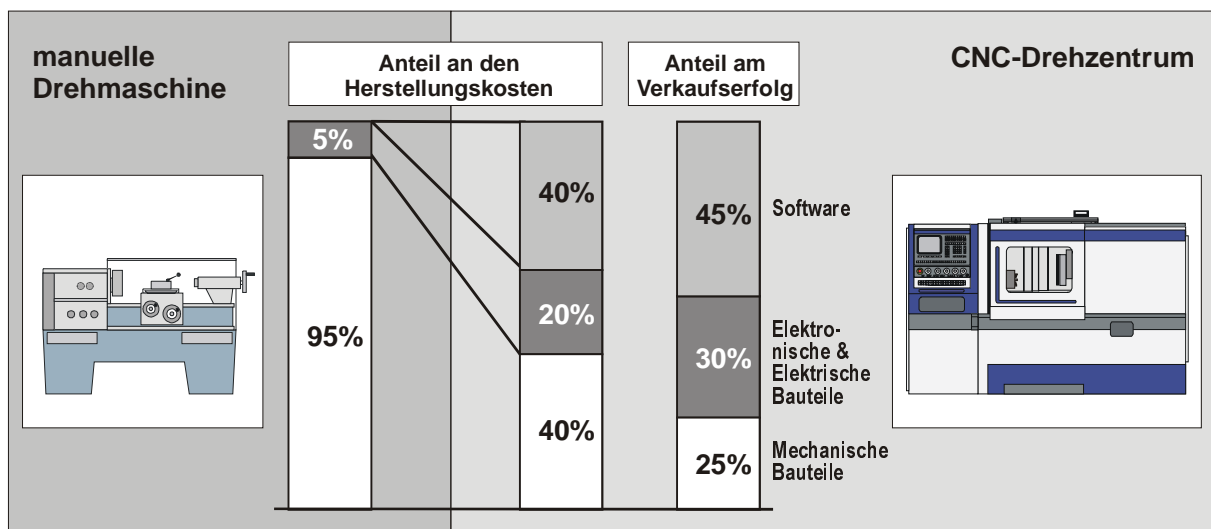


Bild 1: Tendenz zum Ersatz mechanischer Bauteile durch Elektronik und Software (nach [11][113])

Die Entwicklung der Werkzeugmaschinen ist durch einen starken Wandel von mechanischen zu elektronischen und informationstechnischen Funktionsträgern gekennzeichnet. Untersuchungen zeigen, dass der Mechanikanteil an den Maschinenkosten in den letzten 30 Jahren auf etwa 40% gefallen ist. Demgegenüber ist der Elektrik- und Elektronikanteil auf 20% und der Softwareanteil sogar auf 40% gestiegen (Bild 1) [113].

Ein weiterer interessanter Aspekt des Bildes ist die Verteilung der Bereiche Mechanik, Elektronik und Software für den Verkaufserfolg. Hier wird deutlich, dass sich der

Anteil der Software im Vergleich zu den Herstellungskosten weiter vergrößert hat. Dies bedeutet, dass in Werkzeugmaschinen die Bedienungsfläche und eigene Softwareapplikationen starke Verkaufsargumente sein können.

In der spanenden Fertigung liegt das Problem in dem schwer zu überwachenden Prozess, der ohne Aufsicht keine gleichbleibende Werkstückqualität zulässt. Das Erkennen von unbrauchbaren Rohteilen, Werkzeugbruch, Kollisionen und zu hohem Verschleiß der Werkzeuge ist hier eine Voraussetzung. Störungen verursachen schnell hohe Kosten durch stillstehende oder beschädigte Maschinen, zerstörte Werkzeuge oder unbrauchbare Werkstücke.

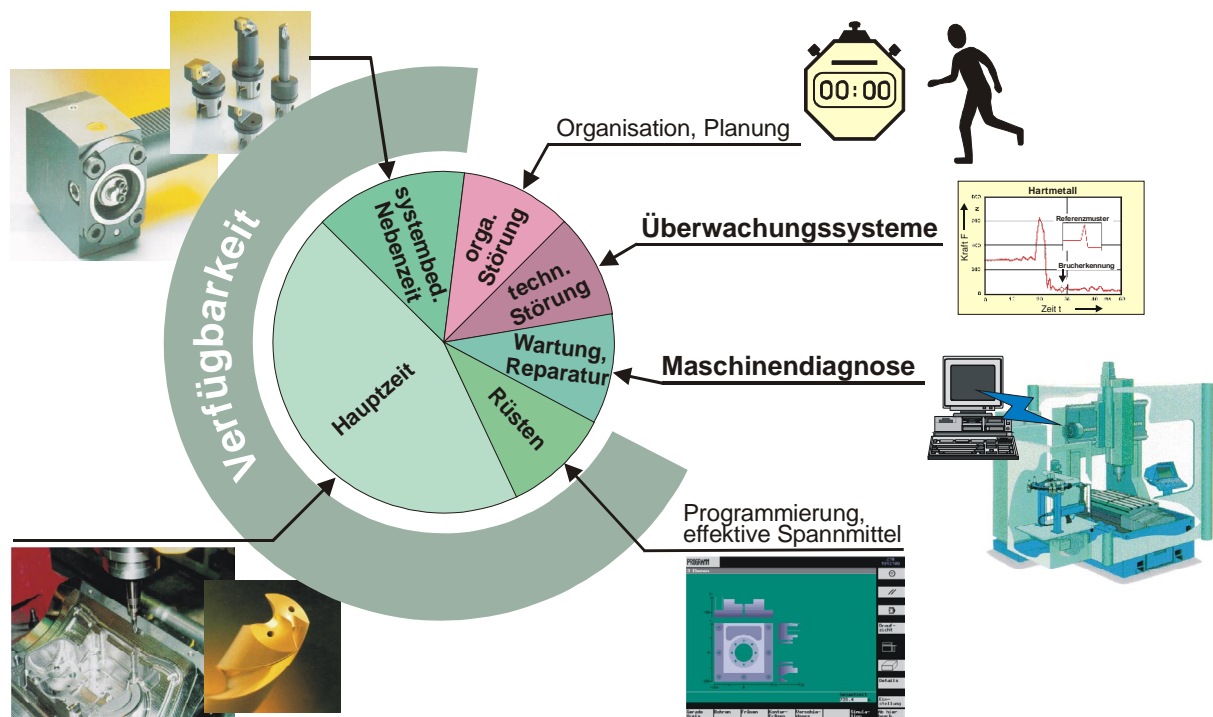


Bild 2: Potenziale zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Die Nachfrage nach Systemen zur Prozess- und Maschinenüberwachung in der spanenden Fertigung steigt. Der Grund dafür ist die Zunahme der Wirtschaftlichkeit und die Steigerung der Verfügbarkeit, die von der Einführung derartiger Systeme erwartet werden. Die zu beobachtende Zurückhaltung der potentiellen Anwender beruht auf zwei Motiven: Zum einen sind die erhältlichen kommerziellen Systeme sehr betreuungsintensiv und werden daher meist in der Massenfertigung eingesetzt. Die Anpassung des Überwachungssystems an spezielle Prozessparameter fällt hier nicht im gleichen Maße ins Gewicht, wie bei geringeren Stückzahlen. Ein schlecht parametrisiertes System kann häufig Fehlalarme auslösen und die Fertigungsanlage grundlos stillsetzen. Zum anderen besteht ein ungedeckter Bedarf an kostengünstigen Sensoren, die den Überwachungsaufgaben und Einbauverhältnissen angepasst sind. In dieser Arbeit vorgestellte Entwicklungen eröffnen erweiterte Möglichkeiten für die Überwachung und Diagnose von Werkzeugmaschinen.

Um Fertigteile mit einer hohen Maßgenauigkeit, einer guten Oberfläche und einem geringen Ausschussanteil herstellen zu können, genügt es nicht nur den Prozess zu

betrachten. Die Genauigkeit der Maschine hat einen ebenso hohen Stellenwert für die Werkstückqualität. Alle Toleranzen, Spiele der Lagerungen und die Wärmedehnung der Maschinenkomponenten sind von Bedeutung. Die Fertigungsgenauigkeit einer Werkzeugmaschine wird durch unterschiedliche Störgrößen beeinflusst. Neben den thermischen Verformungen, dem Verschleiß des Werkzeugs und der Maschine treten als hauptsächliche Störeinflüsse mechanische Verformungen der Maschine auf. Diese statischen Verformungen werden im Wesentlichen durch Gewichtskräfte und den Konstantanteil der Zerspankräfte verursacht. Statische Verformungen wirken sich als konstante Fertigungsfehler aus und können somit relativ leicht kompensiert werden. Im Gegensatz dazu, versteht man unter dynamischer Belastung die auf die Maschine einwirkenden, sich zeitlich verändernden äußere oder innere Kräfte, die periodisch Wechselverformungen an der Maschine hervorrufen. Von besonderer Bedeutung sind dabei Schwingungen der Maschine, die eine Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück verursachen und somit die Fertigungsqualität beeinflussen [64].

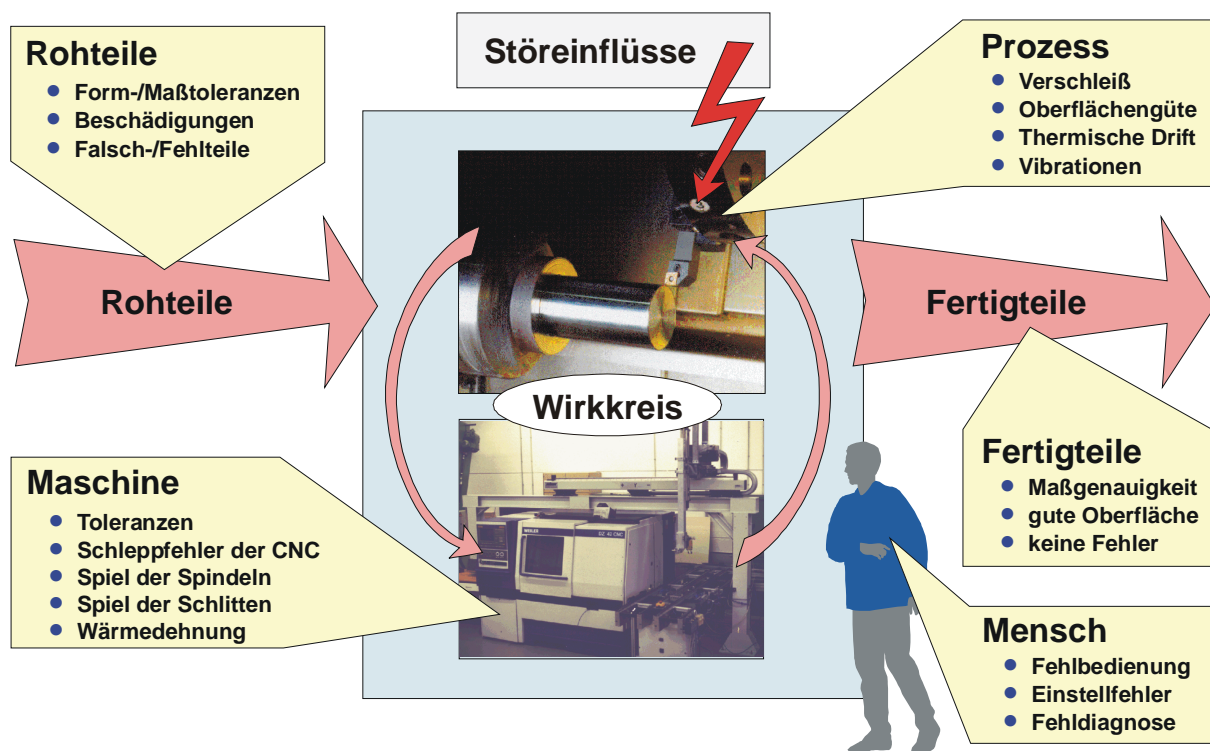


Bild 3: Einflussgrößen auf das System Drehmaschine

Generell ist bei Werkzeugmaschinen ein offener Schwingkreis zwischen Prozess und Maschine zu berücksichtigen. Die wichtigsten Einflüsse sind in Bild 3 wiedergegeben. Aufgrund der komplexen Abhängigkeiten zwischen Prozess und Maschinenkomponenten sowie der vielfältigen Möglichkeiten an Störeinflüssen für dieses System existieren zur Zeit nur sehr spezialisierte Überwachungseinrichtungen für Werkzeugmaschinen. Der erfahrene Maschinenbediener wird auch in Zukunft nur schwer zu ersetzen sein.

1.2 Zielsetzung

Die treibende Kraft der technischen Veränderungen ist bei Werkzeugmaschinen die Mikroelektronik, bei der sich das Preis-Leistungs-Verhältnis und die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten wie in keiner anderen Branche so extrem verbessert hat [69]. Ein allgemeiner Trend für viele Produkte geht in die Richtung einer stetigen Verringerung der Baugröße von Produkten und deren Preise (Bild 4). Deutlich schnellere Fortschritte werden nur durch den Einsatz neuer Technologien erreicht. Für eine Branche wie den Werkzeugmaschinenbau ist dies vor allem die Verwendung moderner Antriebs- und Steuerungsprodukte sowie innovativer Überwachungseinrichtungen. Die Möglichkeiten dieser Neuerungen sind noch lange nicht ausgeschöpft. Mit dem Einsatz von Industrierechnern als Plattform für die Antriebssteuerung und -regelung ist dieser Bereich dem gleichen stetigen Wandel unterworfen wie der von PCs. Die Produktions- und Materialkosten einer Technologie bestimmen gleichzeitig eine kostenoptimale Bauteilgröße. Auch hier ist aus wirtschaftlichen Aspekten eine neue Technologie für eine fortschreitende Miniaturisierung erforderlich (Kap. 3.1.2).

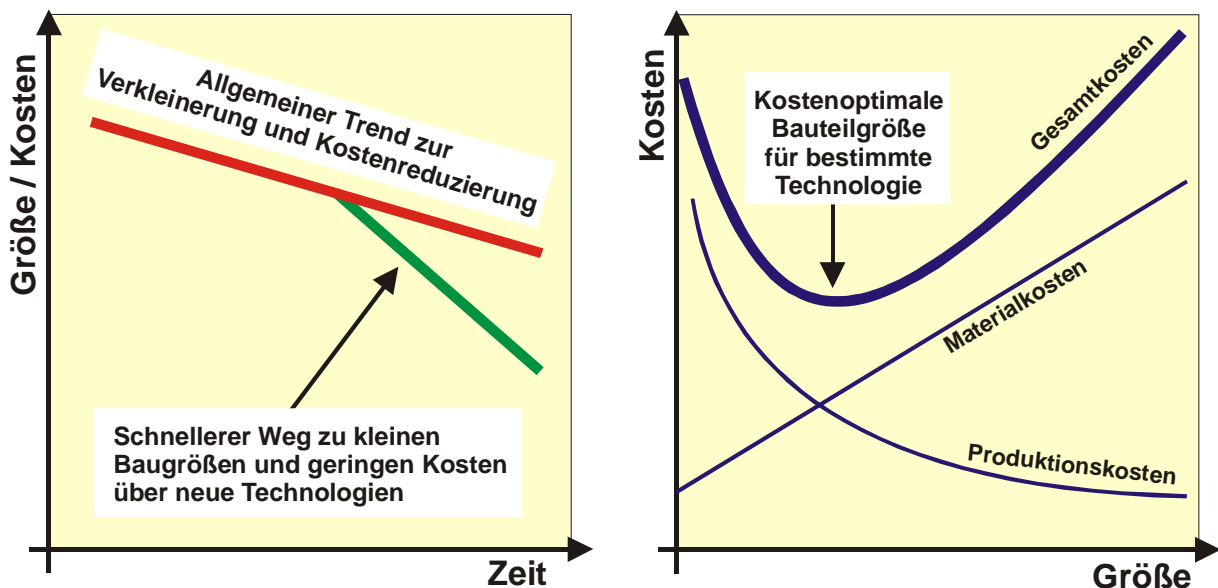


Bild 4: Die Technologiewahl ist der bestimmende Faktor für die Baugröße und die Herstellungskosten

Dem Zunehmenden Anteil an Software in elektronischen oder mechanischen Systemen wird in jüngster Zeit durch die Mechatronik Rechnung getragen. Es sind damit sehr kompakte Bauformen für komplexe Systeme realisierbar, die bei Werkzeugmaschinen vor allem bei innovativen Sensorlösungen zum Einsatz kommen. Eine Komponente der Mechatronik kann die Mikrosystemtechnik sein. Hier spricht man von, mit spezialisierten Verfahren mikrostrukturierten Elementen. Mikrosysteme können gleichzeitig an mehreren Maschinenkomponenten das Systemverhalten messen und so über eine multisensorielle Datenauswertung sichere Interpretationen zulassen, die Fehlalarme ausschließen. Eine Beobachtung der Trendkurve ermöglicht eine frühzeitige Erkennung von schadhafte Baugruppen. In Bild 4 ist der allgemeine Trend aufgezeigt, die Baugröße von Produkten und deren Preis stetig zu verringern. Eine deutliche Änderung zugunsten niedrigerer Kosten und kleiner Baugrößen ist

aber nur dann möglich, wenn auf neue Technologien gesetzt wird. Die Mikrosystemtechnik und Mechatronik ist ein Schritt in diese Richtung.

Ein Sensorsystem besteht grundsätzlich aus drei Funktionsblöcken: Sensor, Signalaufbereitung und Verarbeitungselektronik.

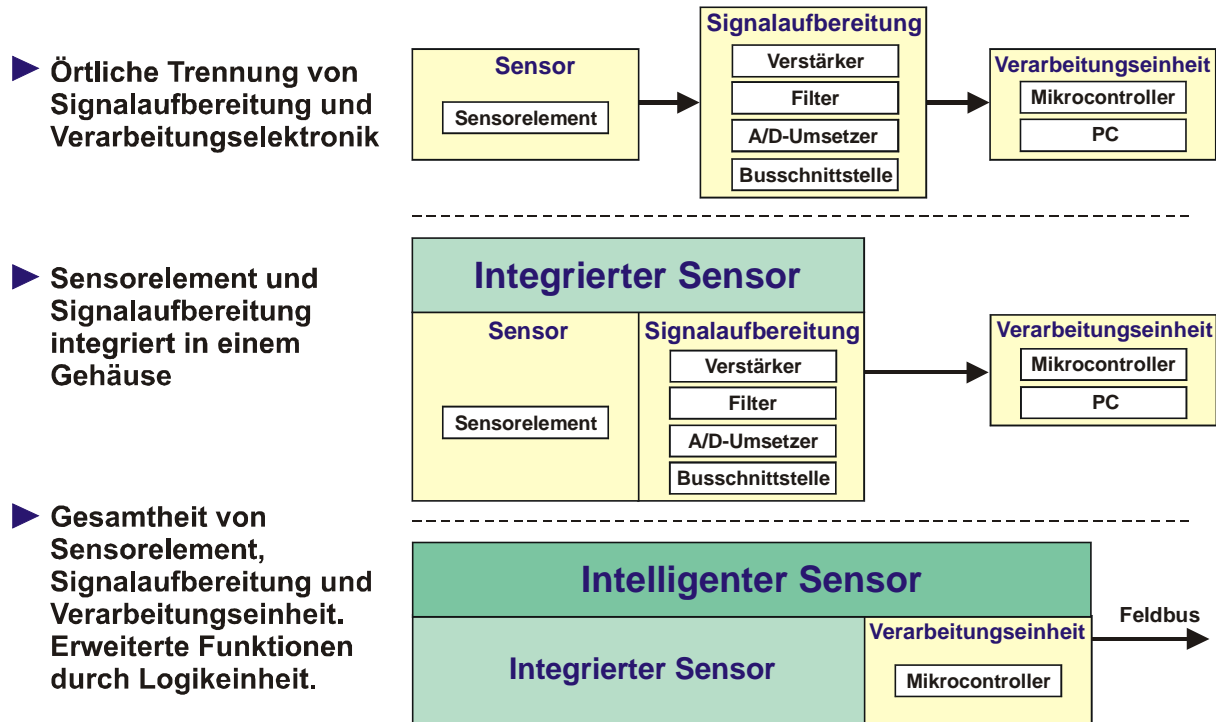


Bild 5: Einordnung von Sensorsystemen unterschiedlicher Komplexität

Der *Sensor* bzw. das *Sensorelement* erfasst eine physikalische Messgröße und wandelt diese in ein elektrisches Signal um. Innerhalb der *Aufbereitungselektronik* werden die erhaltenen elektrischen Messsignale für die Übertragung bzw. Verarbeitung aufbereitet. Dies kann beispielsweise ein Verstärker sein, der das Messsignal auf einen erforderlichen Wert bringt oder ein Filter, mit dessen Hilfe das Sensorsignal von unerwünschten Umgebungseinflüssen geschützt wird. Weiterhin ist es oft notwendig, die analogen Signale vor der Übertragung zur Datenverarbeitung in ein digitales Signalformat umzusetzen. Daraus folgt, dass die Art der Signalaufbereitung zum einen von den elektrischen Ausgangsdaten des Sensors abhängig ist und zum anderen davon, wie das Ausgangssignal ausgegeben werden soll. Die Aufgabe der *Datenverarbeitungskomponente* liegt in der Auswertung und Weiterverarbeitung der aufbereiteten Signale, z.B. Überwachung eines bestimmten Temperaturbereiches. In Abhängigkeit vom Umfang der örtlichen Integration der drei genannten Funktionsblöcke wird zwischen konventionellen, integrierten und intelligenten Sensoren unterschieden (Bild 5).

Konventionell Konventionelle Sensoren bestehen ausschließlich aus dem Sensorelement (z.B. Dehnungsmessstreifen, Thermowiderstand, etc.), das örtlich von der Signalaufbereitung und Verarbeitungselektronik getrennt ist.

Integriert Bei integrierten Sensoren bzw. Sensorsystemen ist neben dem eigentlichen Sensorelement auch die Signalaufbereitung im Sensorgehäuse angebracht. Durch diese Integration werden Sensoreigenschaften wie Präzision und Störuneempfindlichkeit wesentlich verbessert. Dieses Sensorsystem liefert als Ausgangssignal die Sensordaten in einem bestimmten Datenformat. Die Busanbindung fällt ebenfalls unter diese Kategorie.

Intelligent Ein intelligenter Sensor bzw. Sensorsystem wird definiert als die Gesamtheit von Sensor, Signalaufbereitung und -Verarbeitungseinheit [6]. Aufgrund einer integrierten Logikeinheit sind diese Sensorsysteme sowohl kalibrierbar als auch programmierbar und damit in der Lage, eine Reihe der Verarbeitungsaufgaben zu übernehmen. Damit werden die zentralen Datenverarbeitungsgeräte entlastet bzw. die Dezentralisierung der automatisierten Prozesse unterstützt.

Zur Erfüllung von Überwachungs- und Regelungsaufgaben in Werkzeugmaschinen werden heute konventionelle Sensoren eingesetzt. Diese werden mit der Maschinensteuerung direkt verdrahtet, was einen hohen Verkabelungsaufwand, hohe Installations- und Anpassungskosten für die Software zur Folge hat. Diese Probleme können zukünftig durch Verwendung integrierter oder intelligenter Sensoren verringert werden.

Voraussetzung für eine umfassende Überwachung mit vernetzten intelligenten Sensoren:

- ▶ Systeme mit autonomer Kompetenz (Datenauswertung, Kommunikation)
- ▶ Miniaturisierung der Bauform
- ▶ Kostengünstige Sensoren

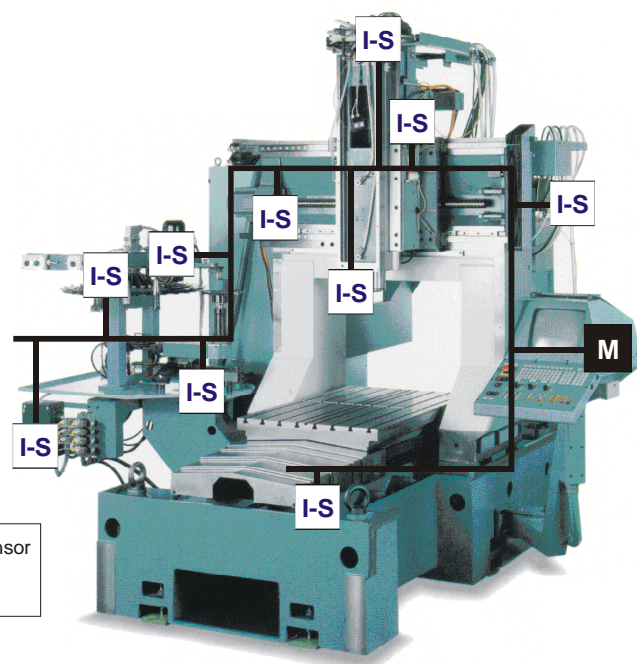
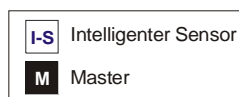


Bild 6: Maschinenüberwachung mit vernetzten intelligenten Sensoren

Bild 6 zeigt ein Beispiel für die Maschinenüberwachung mit vernetzten intelligenten Sensoren. Die Voraussetzung hierfür ist die Miniaturisierung der Bauform und geringe Herstellungskosten. Die in dieser Arbeit angesprochenen Sensorentwicklungen beziehen sich auf integrierte Sensoren. Die Sensordaten werden vor Ort aufbereitet aber extern in der Maschinensteuerung ausgewertet.

1.3 Die Arbeitsgebiete im Überblick

Diese Dissertation beinhaltet Vorschläge, wie über den Einsatz mechatronischer Systeme die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Werkzeugmaschinen erhöht werden kann. Es wurden beispielhaft zwei Sensorlösungen realisiert, die den Spanprozess auf dem Werkzeug und in der Maschinenspindel überwachen, sowie bei der Schadensfrüherkennung Verwendung finden. Es wurde der Beweis erbracht, dass die Mechatronik ein kostengünstiger Weg zur Maschinenüberwachung ist und als Lösung für eine umfassende Sensorintegration in Werkzeugmaschinen die Zukunft der Branche noch erheblich beeinflussen wird.

Zur Einführung in diese Thematik wird eine **Situationsanalyse moderner Werkzeugmaschinen und Steuerungen** wiedergegeben, die die wirtschaftliche Situation der deutschen Maschinenhersteller beleuchtet und einen Überblick über die neuesten Entwicklungen und Trends für Prozess und Maschine gibt.

Weiterhin werden die **neuen Potenziale durch die Mechatronik und Mikrosystemtechnik** beschrieben, die den allgemeinen Trend zu einem zunehmenden Anteil von Elektronik und Software unterstützen. Es wird an dieser Stelle großer Wert auf eine Begriffsdefinition und die Unterschiede zwischen Mechatronik und Mikrosystemtechnik gelegt. In der Literatur ist bislang noch keine klare Abgrenzung zu finden. Ein Schwerpunkt dieses Kapitels ist die Entwicklung eines signalverstärkten Vibrationsmessmoduls, die im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter stattgefunden hat. Das Messmodul ist so konzipiert, dass dessen Abmaß klein genug ist, um nahe dem zu beobachtenden Prozess angebracht werden zu können und robust genug, um den Gegebenheiten in einer Werkzeugmaschine standzuhalten, gleichzeitig ist es kostengünstig in der Anschaffung.

Die **Analyse des Problemfeldes der Prozess- und Maschinenüberwachung** beschreibt die Ziele und Anforderungen moderner Überwachungssysteme und deren Auswertestrategien für die erfassten Messgrößen. Eine abschließende Diskussion bestehender Systeme und allgemeiner Defizite soll an zukünftige Entwicklungsaufgaben heranzuführen.

In diesem Zusammenhang ist die Sensortechnologie von entscheidender Bedeutung für die Einsatzmöglichkeiten in Werkzeugmaschinen und letztendlich auch für deren Verbreitung. In diesem Kapitel **werden alternative Methoden zur Signalerfassung und –auswertung** vorgestellt. Neben den Grundlagen werden spezielle Einsatzmöglichkeiten von Sensoren für die Produktionstechnik behandelt. Dem Trend hin zu intelligenten busfähigen Sensoren wird besonders Rechnung getragen.

Im Rahmen dieser Dissertation werden zwei mechatronische Systeme (Bild 7) vorgestellt, die ein gesamtheitliches Überwachungskonzept für Werkzeugmaschinen ermöglichen. Die parallele Verwendung von intelligenten Maschinenkomponenten an zwei wesentlich qualitätsentscheidenden Positionen, dem Werkzeug und der Werkstückaufnahme, soll beispielhaft die Potenziale des Einsatzes von mechatronischen Systemen in Werkzeugmaschinen beleuchten. Zum einen wurde ein **multisensorielles Überwachungssystem für das Drehen** realisiert. Kern dieser Entwicklung war die Integration von Sensoren zur 3D-Kraft-, Vibrations- und Temperaturmessung, kombiniert mit einer Signalvorverarbeitung direkt auf dem Drehmeißel. Ein

zusätzlich entwickeltes Telemetriesystem ist nötig, um die Funktionstüchtigkeit des rotierenden Werkzeugträgers nicht zu beeinträchtigen.

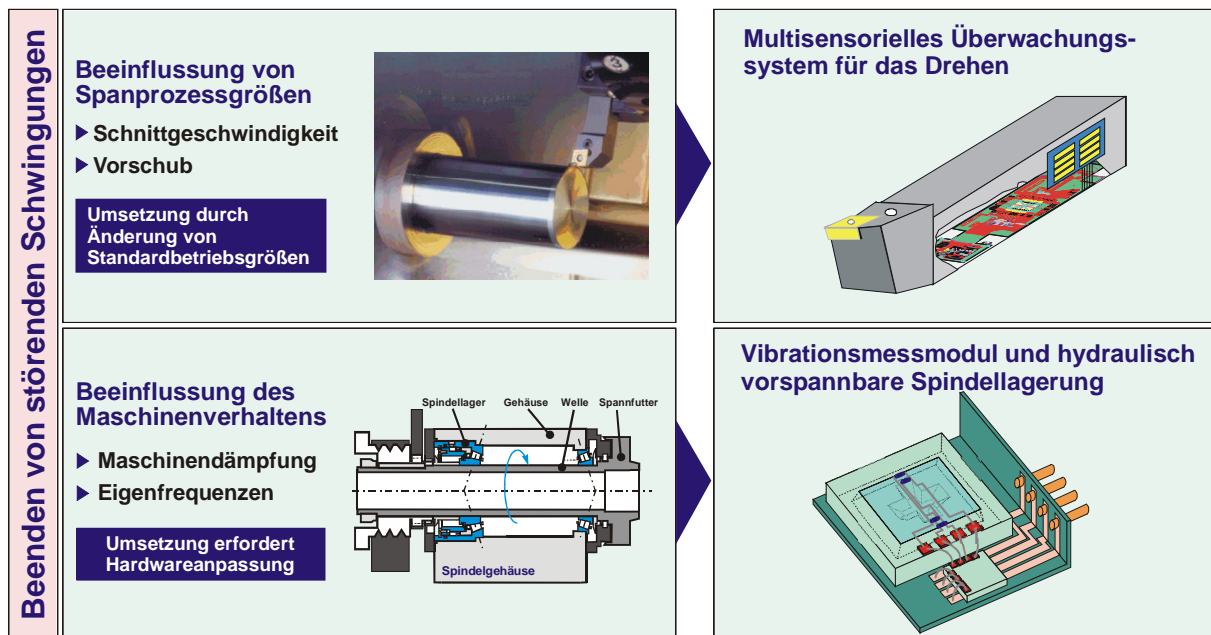


Bild 7: Realisierte mechatronische Baugruppen zum Beenden störender Schwingungen

Die Messung von Vibrationen über Beschleunigungssensoren ist ein für viele Anwendungen universelles Mittel zur Erkennung von unzulässigen Prozessgrößen und zum frühzeitigen Versagen von Maschinenkomponenten. Je nach Aufgabenstellung ist eine unterschiedliche **Analyse von Schwingungssignalen** nötig. Hier werden unterschiedliche Verfahren vorgestellt, wobei die Fast-Fourier-Transformation im Mittelpunkt steht.

Zum anderen wurde mit der Integration eines in Kapitel 3 vorgestellten Sensormoduls in eine Spindellagerung ein System zum Beenden störender Schwingungen aufgebaut. Die Sensordaten werden hinsichtlich der Erkennung einer Überbeanspruchung des Systems, beispielsweise bei einer Kollision, der längerfristigen Beobachtung zur Schadensfrüherkennung oder der Ermittlung kritischer Frequenzbereiche analysiert. Unter **Verwendung eines hydraulisch vorspannbaren Spindellagers als neuartiges Stellglied eines Regelkreises** wurde ein Prozessregelkreis aufgebaut, der über eine Änderung der hydraulischen Lagervorspannung der Maschinenspindel das Erkennen und Verlassen eines kritischen Schwingungsbereiches ermöglicht und damit Werkstück, Werkzeug und Maschine schützt. Das hier verwendete Vibrationsmessmodul hat neben seinen geringen Abmessungen einen großen Preisvorteil, da die Mechatronik kostengünstige Produkte zulässt.

2 Situationsanalyse moderner Werkzeugmaschinen und Steuerungen

2.1 Die wirtschaftliche Situation der deutschen Maschinenhersteller

2.1.1 Strukturwandel im Werkzeugmaschinenbau

Die Internationalisierung der Märkte, kürzere Innovationszyklen und der Trend zu kundenspezifischen Lösungen führen zu einer Verschärfung der Konkurrenzsituation zwischen den Unternehmen. In der produzierenden Industrie ist ein Trend zu höheren qualitativen Anforderungen an die Produkte, einer höheren Variantenvielfalt und Produktkomplexität gegeben. Von Seite des Gesetzgebers ergeben sich, durch das neue Produkthaftungsgesetz, zusätzliche Anforderungen an die Produktionsprozesse, die sich in einer Dokumentationspflicht äußern. Im Werkzeugmaschinenbau schlagen sich die genannten Aspekte in Form einer höheren Flexibilität und Komplexität der Systeme nieder [48].

Ein Aspekt darf nicht zuletzt außer Acht gelassen werden: die Summe des Spanvolumens nimmt nach Aussagen von Maschinenherstellern kontinuierlich ab. Gründe sind unter anderem geschickte Kombinationen von Halbzeugen nahe der Endkontur und der Zerspanung, die die abschließende Bearbeitung übernimmt. Die Folge ist eine Steigerung des Teileausstoßes jeder Maschine aufgrund kürzerer Durchlaufzeiten. Dies hat aber einen entscheidenden Einfluss auf die Anzahl der auf dem Markt benötigten Maschinen und deren technischer Ausstattung. Die Maschinenhersteller verfolgen daher das Ziel Maschinen zu entwickeln und anzubieten, die in Produktbereiche vorstoßen können, die vorher dem Schleifen und dem Erodieren vorbehalten waren.

Der hier im Vordergrund stehende Zerspanungsprozess wird zunehmend komplizierter, was in der steigenden Komplexität der Werkstückgeometrien, Werkstoffe und den engeren Oberflächentoleranzen begründet ist. Der zunehmende Kostendruck ist unter anderem dafür verantwortlich, dass viele Firmen diesen Entwicklungen nicht standhalten können. Die Entwicklung und der Einsatz von innovativen Fertigungskonzepten sowie die gezielte Anwendung von Know How in neuen Technologien bei Maschinen, Werkstoffen und Werkzeugen ist eine wichtige Grundlage zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit der industriellen Produktion. Der Werkzeugmaschinenbau hat als wichtigster Ausrüster der Produktion, einen großen Anteil an der wirtschaftlichen und effizienten Fertigung vieler Produkte [140]. Entwicklungen im Bereich der Werkzeuge sind, besonders im kurzfristigen Rahmen, für den Anwender, im Gegensatz zu maschinenbaulichen Fortschritten, von größerer Bedeutung. Dies ist darin begründet, dass ein neues Werkzeug auf den meisten Maschinen einsetzbar ist, und somit Innovationen in diesem Bereich schnell einer breiten Masse von Anwendern zugänglich werden.

Die Produktion im Werkzeugmaschinenbau war vor einigen Jahren durch eine größere Fertigungstiefe gekennzeichnet. Die Maschinenhersteller hatten viele benötigte Komponenten (Werkzeugwechsler, Spindeln, elektrischen Einbauten, Getrieben, Verkleidungen, etc.) in eigener Fertigung hergestellt. Es entwickelte sich eine neue

Zulieferstruktur, die dazu geführt hat, dass viele Innovationen für die Maschinen von außen zugekauft werden. Die Umstellung der Fertigung auf eine geringere Fertigungstiefe war ein Schritt von ausschlaggebender Bedeutung. Der Aufgabenbereich des Maschinenherstellers liegt jetzt hauptsächlich in der Montage der einzelnen Komponenten. Die Qualität der Maschine wird größtenteils durch die Präzision der Montagetätigkeiten beeinflusst und ist neben einer individuellen Gestaltung der Maschinenbedienung ein wichtiges Verkaufsargument. Die Reduktion der Fertigungstiefe ermöglicht dem Maschinenhersteller, Kosten zu sparen und die Flexibilität und Reaktionsgeschwindigkeit für den Markt zu steigern.

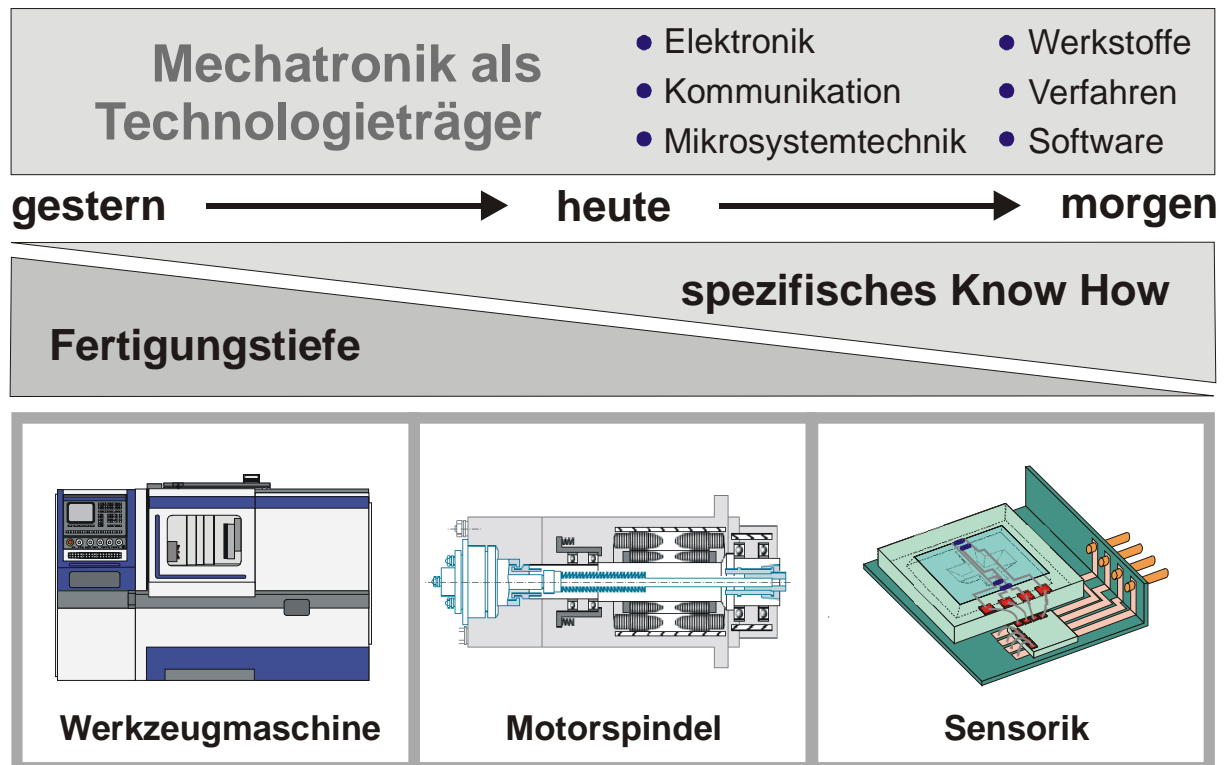


Bild 8: Innovative Maschinen durch Mechatronik

Das Innovationspotential der Maschinenkomponentenhersteller hat aber auch ihre Einschränkung. Es ist zu erwarten, dass in Zukunft die Innovation bei den Maschinenkomponenten die Integration mechatronischer Einbauten sein wird (Bild 8) [17]. Diese Entwicklung steht aber erst am Anfang und beschränkt sich heute hauptsächlich auf den Bereich der Sensorsysteme. Auf diese Weise kann durch den Einsatz von intelligenten Maschinenkomponenten eine höhere Verfügbarkeit der Werkzeugmaschine erreicht werden. Die Innovationen der Werkzeugmaschinenbranche werden daher zunehmend im miniaturisierten Bereich liegen.

2.1.2 Zulieferstruktur und Abhängigkeiten im Werkzeugmaschinenbau

Die Steuerung selbst stellt die Schlüsselkomponente einer modernen Werkzeugmaschine dar. Sie bestimmt durch ihre Leistungsfähigkeit in hohem Maße die Funktionsfähigkeit einer Maschine. Neue Maschinenkonzepte, neue Potenziale in der Antriebstechnik und Sensorik oder neue Fertigungsprozesse erfordern die Erweiterung und Anpassung der Funktionalitäten der eingesetzten Steuerungssysteme. Aus

diesem Grunde wird die Offenheit und Flexibilität von Steuerungen immer wichtiger. Derzeit ist der Maschinenhersteller allerdings mit einem heterogenen Steuerungsmarkt konfrontiert. Die Steuerungsstruktur, die Kommunikationsmechanismen und die gewählten Schnittstellen stellen meistens herstellerspezifische Lösungen dar, was eine Wahl einer Maschinensteuerung für den Anwender erschwert [108]. Aus dem Blickwinkel der Kosten für den Einkauf ist die Festlegung an einen einzigen Steuerungsanbieter sinnvoll. Kunden- und marktspezifische Anforderungen können aber dann nicht in vollem Umfang erfüllt werden, was zu einer schlechteren Wettbewerbsfähigkeit des Maschinenherstellers führt. Bei Bindung an mehrere Steuerungsanbieter müssen andererseits die Maschinen und Softwarekomponenten mit großem Aufwand an unterschiedliche Steuerungssysteme angepasst werden.

Damit ein Maschinenhersteller eine möglichst große Zahl an Kunden ansprechen kann, bietet er in der Regel verschiedene Maschinensteuerungen zur Wahl an. Der Anwender versucht, aufgrund der Verwendung bestehender NC-Programme, der Ausbildung, der Wartung und nicht zuletzt der Akzeptanz der Maschinenbediener gegenüber einer unbekanntenen Steuerung, eine heterogene Steuerungsstruktur in der Fertigung zu vermeiden.

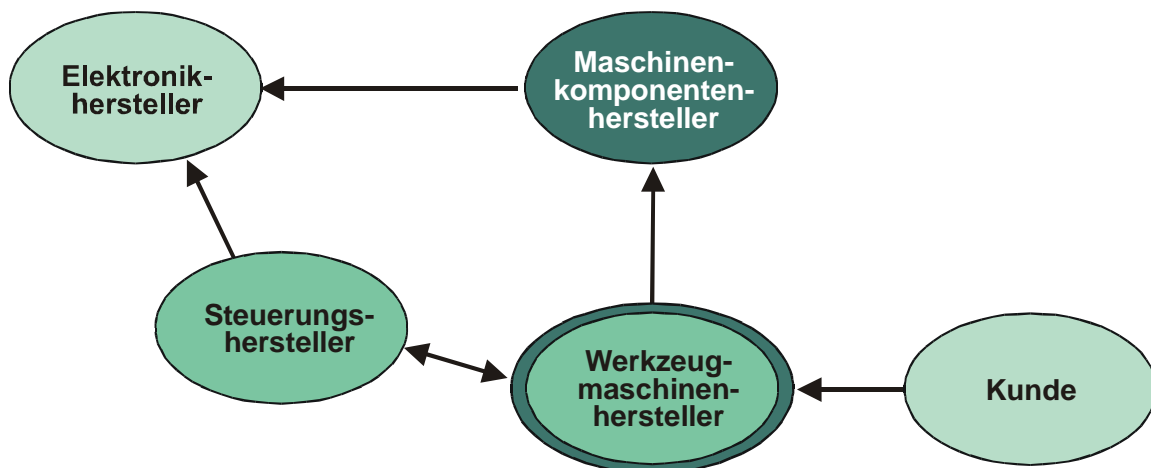


Bild 9: Abhängigkeiten im Werkzeugmaschinenbau

Der Komponentenhersteller befindet sich in einer schwierigen Situation, da er einerseits gänzlich von den Maschinenherstellern und andererseits von den Steuerungsherstellern abhängig ist (Bild 9). Er muss sich sowohl bei der Herstellung seiner Produkte als auch bei der Planung innovativer Verbesserungen an den in den Werkzeugmaschinen verwendeten Steuerungen orientieren.

2.1.3 Weitere Anwendungsfelder durch Substitution von Fertigungsverfahren

Wie auch andere Branchen sucht die Werkzeugmaschinenindustrie permanent nach Möglichkeiten für neue Absatzmärkte. Die Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide steht in technologischer Konkurrenz zu anderen abtragenden Verfahren, wie dem Schleifen und Erodieren, oder formgebenden Verfahren, wie dem Gießen von Metallen oder Kunststoffen. Allen Verfahren ist gemeinsam, dass Werkstücke möglichst schnell und billig, sowie mit wenig Arbeitsgängen fertiggestellt werden sollen.

Das Fräsen entwickelt sich zunehmend zu einem vielseitigen Fertigungsverfahren. Das Hobeln, bzw. Stoßen wurde bereits von der Fräsbearbeitung verdrängt, die Hochfrequenzbearbeitung und die Bearbeitung gehärteter Materialien eröffnet Potenziale, die bislang dem Schleifen und Erodieren vorbehalten waren [51].

Rohteile für die Massenfertigung werden häufig im Gießverfahren hergestellt oder geschmiedet und durch eine anschließende spanende Bearbeitung an die Endkontur angepasst. Um Material einzusparen, wird versucht ein möglichst geringes Aufmaß auf die Endkontur aufzuschlagen. Der Begriff des „Near Net Shape“ wird in diesem Zusammenhang gebraucht. Dies unterstützt die Aussage, dass die Gesamtheit des zerspanten Volumens abnimmt.

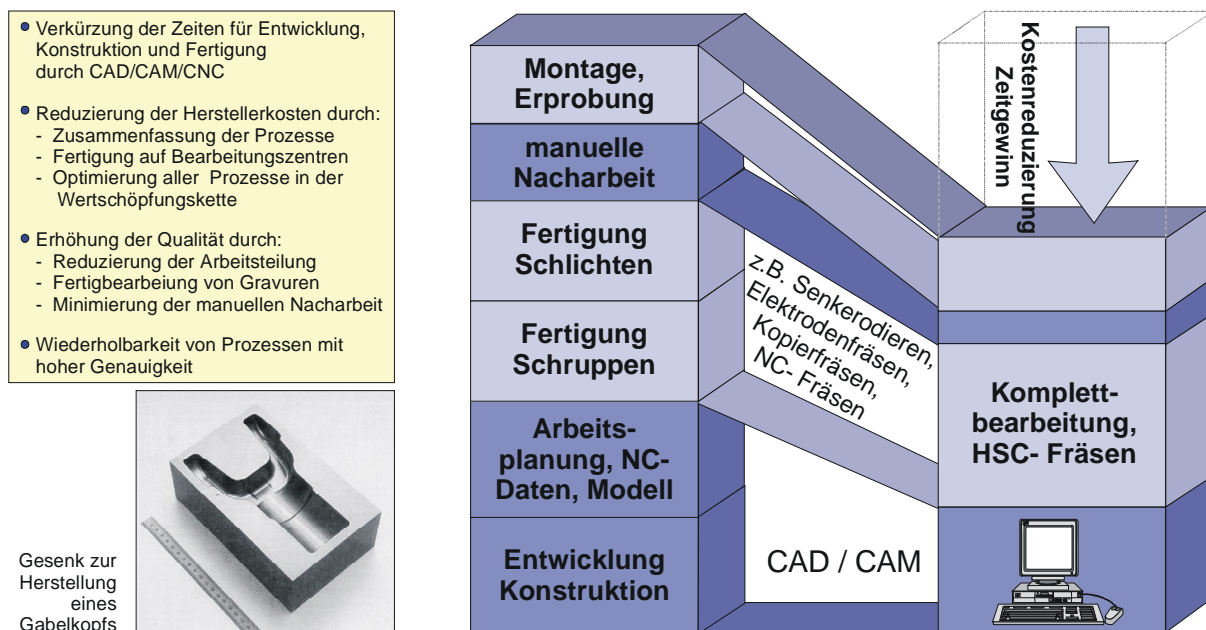


Bild 10: Kostenreduzierung im Schmiedegesenkbau durch den Einsatz der HSC-Technologie [21]

Der Werkzeug- und Formenbau ist durch einen sehr großen Anteil an Freiformflächen gekennzeichnet, die entweder konkav oder konvex gekrümmt sind. Konventionelle Werkzeugmaschinen besitzen den Nachteil, dass die Genauigkeit unzureichend ist oder dass sie eine zu geringe maximale Geschwindigkeit aufweisen [94]. Die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung kann diese Nachteile kompensieren und kommt daher in erster Linie im Werkzeug- und Formenbau zum Einsatz. Neben einer kürzeren Bearbeitungszeit steht die Bearbeitung gehärteter Stähle und die Verbesserung der Oberfläche im Vordergrund. Die Gestaltung von Freiformflächen erfordert sehr enge Abstände der Werkzeugbahnen, um eine möglichst geringe Rautiefe zu erzielen. Die bereits angesprochene Hochgeschwindigkeitsbearbeitung erlaubt die Bearbeitung auch gehärteter Stähle und tritt hier erfolgreich in Konkurrenz zum Erodieren (siehe Kapitel 2.2.1). Das HSC-Fräsen ist erst durch die rasante Entwicklung der Schneidstofftechnologie und genaue Erkenntnisse des Wirkprozesses zwischen Werkzeug und Werkstück möglich geworden. Hinzu kommt die konsequente Anwendung von CAD/CAM sowie die Verwendung extrem dynamischer Steuerungen mit gut regelbaren Antrieben. Die Zusammenführung von bisher arbeitsteilig ausge-

fürten Bearbeitungsprozessen auf dafür geeigneten Bearbeitungszentren ermöglicht jetzt alle Teilprozesse der Fertigung im CAM-Prozess aufeinander abgestimmt zu optimieren [21].

Ferner gewinnen die Potenziale zur Verfahrenssubstitution immer mehr an Bedeutung. Der Schmiedegesenkbau ist ein Bereich des Formenbaus mit einem extrem hohen Rationalisierungspotential. Über 70 % der Gesenke können heute, ausgehend vom vergüteten Stahlblock, auf Bearbeitungszentren im automatischen Ablauf einsatzfertig bearbeitet werden (Bild 10). Die HSC-Technologie schließt dabei die Lücke in der Fertigungstechnik. Gravuren und Kerne werden auf die geforderte Oberflächenqualität hin fertiggefräst, wodurch die manuelle Nacharbeit minimiert wird.

2.2 Potenziale moderner Werkzeugmaschinen und Steuerungen

2.2.1 Hochfrequenzbearbeitung

In den letzten Jahren wurden für viele Bereiche der spanenden Fertigung neue, innovative Werkzeuge und Werkzeugsysteme vorgestellt. Aufgrund verbesserter Werkstoffe und optimierten Werkzeugdesigns werden heute Schneidstoffe angeboten, die Schnittgeschwindigkeiten bis zu 10.000 m/min ermöglichen. Die hohen Drehfrequenzen und Leistungen der Motorspindeln in Kombination mit den modernen, leistungsfähigen Schneidstoffen erlauben die Bearbeitung mit hohen Schnittgeschwindigkeiten. Diese Entwicklungen haben eine deutliche Reduzierung der Bearbeitungszeit pro Werkstück zur Folge und senken daher die Herstellkosten. Eine Verkürzung der Produktionszeiten lässt sich bei vielen Fertigungsaufgaben durch Anwendung der Technologie der Hochgeschwindigkeitszerspanung erzielen. Die hier gegebenen Potenziale basieren auf den in folgendem Bild zusammengestellten technologischen und kinematischen Randbedingungen des Prozesses [131]



Bild 11: Randbedingungen und Potenziale der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung [130]

Früher wurden die Vorteile dieser Technologie ausschließlich in verkürzten Hauptzeiten gesehen. Derzeit gewinnen die erhöhte Flexibilität durch den Einsatz von Standardwerkzeugen in Verbindung mit einem reduzierten Werkzeuginvestment sowie Potenziale zur Verfahrenssubstitution an Bedeutung [131].

Die höhere Schnittgeschwindigkeit führt bei gleicher Zerspanleistung zu einer abnehmenden Spandicke (geringere Spanungsquerschnitte), wodurch die Zerspankräfte sinken. Das erlaubt die spanende Herstellung dünnwandiger Bauteile, die z. B. im Flugzeugbau benötigt werden [138]. Aufgrund dieser Potenziale hat sich die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung in vielen Bereichen der Fertigungstechnologie erfolgreich durchgesetzt [115].

Die Umsetzbarkeit der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung ist in großem Maße von der Leistungsfähigkeit der Werkzeugmaschine abhängig. Hier sind zum Einen die Bearbeitungsspindeln mit einer hoher Drehzahl (bis zu 40.000 U/min bei Spindeln mit automatischem Werkzeugwechsel) und zum Anderen die Maschinenachsen mit einer hohen Dynamik (2 g Beschleunigung, 120 m/min Vorschub) erforderlich [91].

Diese Anforderungen bewirken erweiterte Kriterien für die Auslegung von Werkzeugmaschinen. Das Maschinenbett muss extrem steif ausgelegt sein, bei gleichzeitigem gewichtsreduzierten Aufbau der bewegten Komponenten. Auf diese Weise wird ein hohes Beschleunigungspotential der Achsen erreicht [131].

Die mit der HSC-Bearbeitung verbundenen hohen Vorschübe, Geschwindigkeiten und Drehzahlen im Extrembereich machen neben der Prozessüberwachung eine Überwachung der hochwertigen Maschinenkomponenten wie beispielsweise der Motorspindeln über zusätzliche Sensorik notwendig. Die damit verbundenen Schnittstellen und Montageprobleme wurden erkannt und in vielen Bereichen wird an Lösungen gearbeitet.

Hochdynamische Maschinen ermöglichen eine Verringerung der Anzahl der Werkzeuge. Durch die Anwendung des Hochgeschwindigkeitszirkularfräsens können beispielsweise Bohrungen mit unterschiedlichen Durchmessern durch ein einziges Werkzeug hergestellt werden. Auf diese Weise kann einerseits schneller auf Änderungen bezüglich der geforderten Durchmesser reagiert werden, andererseits reduziert sich dadurch die Zahl der Werkzeugwechsel und damit der Werkzeuge. Hier werden allerdings neue Anforderungen an die Bearbeitungsmaschine hinsichtlich der Bahn Genauigkeit bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten gestellt [16].

2.2.2 Hochdynamische Antriebstechnik

Neue Entwicklungen in Rahmen der HSC-Bearbeitung verfolgen den Trend des Ersatzes mechanischer Bauteile durch elektrische bzw. elektronische Komponente und Informationstechnik. Dabei handelt sich in erster Linie um Linearmotoren, Hochfrequenzspindeln und Hexapoden.

In jüngster Zeit wurden Hexapod-Werkzeugmaschinen vorgestellt, die für die Zerspanung einige Einsatzvorteile bieten:

- günstige Anstellung des Werkzeugs an das zu bearbeitende Werkstück und

- Realisierung höherer Bahngeschwindigkeiten bei der Freiformflächenbearbeitung.

Geringe bewegte Massen für hohe Dynamiken, hohe Steifigkeit sowie einfache Baugruppen und eine vergleichsweise große Zahl von Gleichteilen machen Gelenkstab-Kinematiken für verschiedene Anwendungsfälle interessant. Maschinen in den Bereichen der Simulator- und der Robotertechnik bewiesen bereits ihre Praxistauglichkeit, Konstruktionen im Bereich des Werkzeugmaschinenbaus und der Messtechnik stehen am Anfang ihrer industriellen Anwendung [39].

Bei der Hexapod-Kinematik werden prinzipiell zwei Plattformen durch sechs Antriebseinheiten verbunden. Durch eine Auslenkung dieser Antriebszylinder unabhängig voneinander (paralleler Antrieb), lässt sich eine Plattform in einem bestimmten Bereich frei im Raum bewegen. Der Vorteil der auf Basis der Hexapod-Kinematik aufgebauten Werkzeugmaschinen liegt in der geringen bewegten Massen bei gleichzeitig hoher Dynamik. Mit Hilfe dieser Kinematik kann das Fräs Werkzeug immer senkrecht zur bearbeiteten Fläche bewegt werden, was speziell im Formenbau zu glatten gleichmäßigen Oberflächen führt.

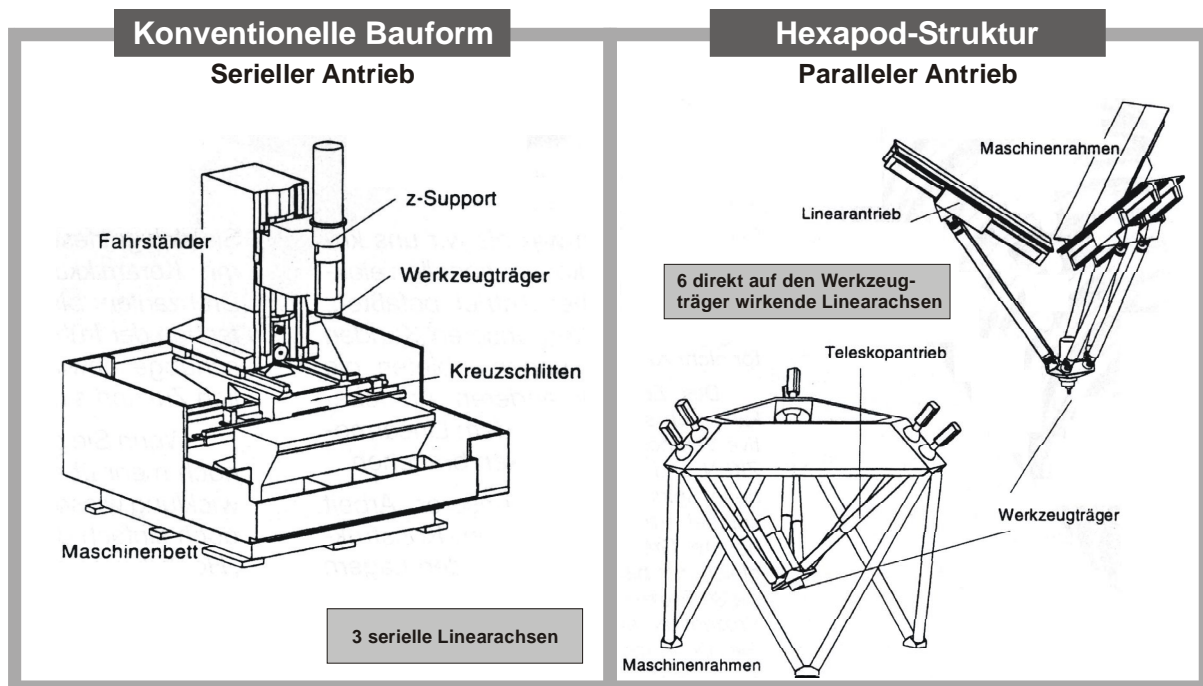
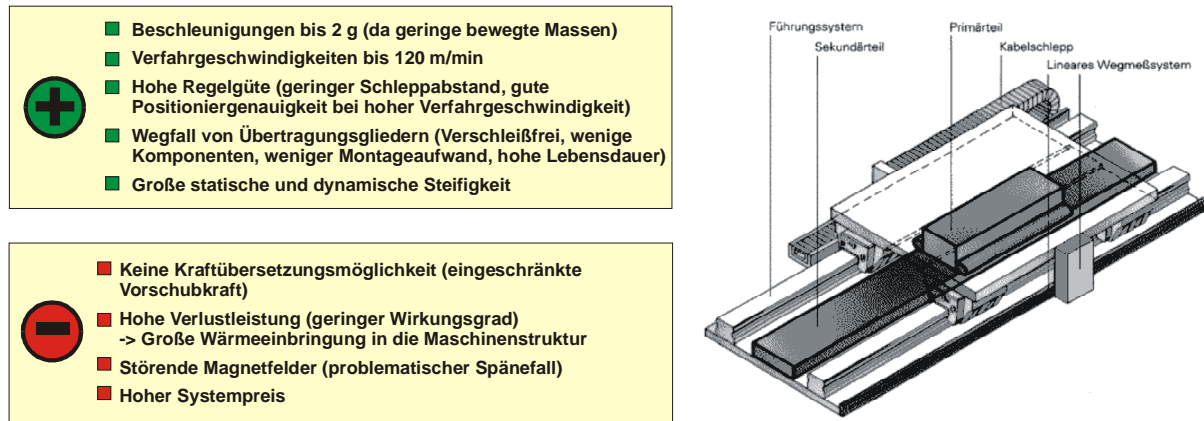


Bild 12: Beschreibung serieller und paralleler Antriebe für Werkzeugmaschinen [90]

In Bild 12 ist zu erkennen, dass zum Antrieb hexapoder Parallelantriebe Linearmotoren eingesetzt werden können. Linearmotoren erzeugen eine translatorische Bewegung direkt aus der Umsetzung elektrischer Energie in eine mechanische Vorschubbewegung. Im Gegensatz zu herkömmlichen Vorschubantrieben bedarf es keiner Übertragungselemente, wie z.B. Kugelrollspindeln, Zahnstangen oder Kupplungen, welche die ursprüngliche Drehbewegung in eine lineare Bewegung umsetzen.

Infolgedessen bietet ein Linearmotor (Bild 13) die Vorteile einer einfachen Maschinenkonstruktion, hoher Dynamik, Maximalgeschwindigkeit und Spielfreiheit sowie Reibungs- und Verschleißfreiheit im Antrieb [3]. Mittlerweile bieten viele Maschinen-

hersteller für Nischenanwendungen auch konventionelle Bearbeitungszentren mit Linearmotoren an. Bislang ist nicht zu erkennen, welchen Stellenwert Linearantriebe neben den Antrieben mit Kugelrollspindeln erhalten werden.



- Beschleunigungen bis 2 g (da geringe bewegte Massen)
- Verfahrgeschwindigkeiten bis 120 m/min
- Hohe Regelgüte (geringer Schleppabstand, gute Positioniergenauigkeit bei hoher Verfahrgeschwindigkeit)
- Wegfall von Übertragungsgliedern (Verschleißfrei, wenige Komponenten, weniger Montageaufwand, hohe Lebensdauer)
- Große statische und dynamische Steifigkeit

- Keine Kraftübersetzungsmöglichkeit (eingeschränkte Vorschubkraft)
- Hohe Verlustleistung (geringer Wirkungsgrad) -> Große Wärmeeinbringung in die Maschinenstruktur
- Störende Magnetfelder (problematischer Spänefall)
- Hoher Systempreis

Bild 13: Linearantriebe für hochdynamische Werkzeugmaschinen [4]

2.2.3 Vorteile der offenen Steuerungstechnik

Software ist in jüngster Zeit im Bereich der Werkzeugmaschinen die Grundlage industrieller Wettbewerbsfähigkeit geworden. Gerade bei numerischen oder speicherprogrammierbaren Steuerungen werden die mechanischen Bauteile zunehmend durch maschinennahe Elektronik- und Softwareanteile ersetzt [113]. Die Steuerung und Koordination der Abläufe findet über Softwarefunktionen statt.

Eine hohe Erweiterbarkeit und Austauschbarkeit der Hardware, Offenheit der Software sowie günstige Einkaufspreise der PC-Systeme sind die Gründe eines zunehmenden Einsatzes auch im industriellen Bereich (Industrie-PC). Die Verwendung eines PC mit einem Standardbetriebssystem wie MS-Windows für die Gestaltung der Benutzungsoberflächen ist heute gängige Praxis. Zahlreiche preiswerte Softwarewerkzeuge unterstützen den Anwender in der Gestaltung der Benutzeroberfläche und der Erstellung neuer Anwendungen [103]. Damit kann beispielsweise ein Maschinenhersteller ohne Hilfe des Steuerungsherstellers eigene Ideen bei der Gestaltung der Benutzungsoberfläche verwirklichen und dem Bedarf des Hauses entsprechend anpassen [41]. Die einfachen Eingriffsmöglichkeiten haben jedoch erhöhte Forderungen im Bereich der Sicherheit und der Zuverlässigkeit der Steuerungssysteme zur Folge. Die Garantieforderung ist hier meist noch ein ungelöstes Problem.

Vorteile offener Werkzeugmaschinensteuerungen:

- Grafische Unterstützung bei der Programmierung
- Weniger Bedienerfehler durch übersichtliches Arbeiten
- MS-Windows als Betriebssystem
- Nutzung von Standardhardware
- Oberflächen mit Standardsoftware veränderbar (z. B. Visual-Basic)
- Netzwerkfähigkeit

Hier erweist sich die heterogene Steuerungslandschaft als besonders problematisch, da jede Steuerung eine andere Hardwareplattform und daher eine eigenständige Software besitzt.

Einer Weg zur Lösung der Softwareschnittstelleproblematik ist die Orientierung an Ergebnissen des Verbundprojekts OSACA und HÜMNOS. OSACA (Open System Architecture for Controls within Automation System) bietet zum einen die Kommunikationsplattform und zum anderen ein grundlegendes Referenzmodell für eine offene herstellerübergreifende Steuerungsarchitektur an [34][45]. Die OSACA-Spezifikation bildet eine Basis aller Automatisierungssysteme und erlaubt dem Anwender, zusätzliche Softwaremodule zu erstellen, die einheitlich auf steuerungsinterne Daten zugreifen können [137].

Der Einsatz der PC-basierten Systeme im Steuerungsbereich ist aufgrund der fehlenden Echtzeitfähigkeitseigenschaften des MS-Windows-Betriebssystems beschränkt. Die garantierten, kurzen Reaktionszeiten sind wesentliche Voraussetzungen für ein Steuerungssystem, die von einem PC aber nur durch bestimmte Echtzeitfähigkeitserweiterungen erfüllt werden können. Entweder es gibt eine hardwaremäßig getrennte Lösung zwischen dem echtzeitfähigen NC-Kern und dem Bedienbereich mit dem interruptgesteuerten Windows-Betriebssystem oder es wird ein echtzeitfähiges Betriebssystem eingesetzt. MS-Windows kann dabei parallel „im Hintergrund“ laufen und für die Bedienung verwendet werden.

2.3 Diskussion von Einflüssen auf Prozess und Maschine

2.3.1 Lagerarten für Maschinenspindeln

Verfügbare Lagerarten werden in zwei Klassen eingeteilt. Erstens in die Klasse berührende Lager, wie Gleit- und Wälzlager und zweitens in berührungslose, wie magnetische und pneumatische Lager. Magnetische und pneumatische Lager eignen sich für sehr hohe Drehzahlen bis zu 180.000 U/min, sind aber sehr aufwendig zu realisieren. Solche Lagerungen werden nur in hochgenauen Sondermaschinen, wie zum Schleifen von optischen Linsen eingesetzt. Die Wälzlager sind wartungsarm und in der Praxis mit einer großen Variantenvielfalt vertreten. Deshalb werden diese bevorzugt in Werkzeugmaschinen eingesetzt [50].

Wälzlager sind genormte Maschinenelemente, die in zahlreichen Bauarten, Größen und Genauigkeitsklassen zur Verfügung stehen [86]. Wälzlager lassen sich zum einen nach der Hauptbelastungsrichtung in Radial- und Axiallager unterscheiden. In einem Käfig laufende Wälzkörper wälzen sich am Außen- und Innenring ab. Am Innenring befindet sich die zu lagernde Achse oder Welle und am Außenring die Aufnahme der Lagerung. Kugeln sind universell eingesetzte Wälzkörper. Mit Kugellagern lässt sich ein sehr weites Spektrum von Lagerungsfällen abdecken. Bei höheren radialen Lasten oder zum Ausgleich von axialen Verschiebungen eignen sich Zylinderrollenlager. Da Zylinderrollenlager keine axialen Kräfte aufnehmen können, werden bei derartigen Belastungen Kegelrollenlager eingesetzt. Tonnenlager bieten die Möglichkeit, Winkelabweichungen der zu lagernden Welle oder Achse zur Aufnahmebohrung in geringem Umfang auszugleichen. Ist der Bauraum für die Lagerung sehr beengt, kann man auf niedrig bauende Nadellager zurückgreifen.

In den letzten Jahren sind einige Innovationen in der Lagertechnik entwickelt worden. So kommen neue Werkstoffe zum Gebrauch, wie beispielsweise der Einsatz von Keramikugeln aus Siliziumnitrid. Dadurch ergibt sich unter anderem ein besseres Verschleißverhalten, höhere statische und dynamische Steifigkeit sowie eine Reduzierung der Reibung. Neben dem Einsatz neuer Werkstoffe sind auch neuartige Lagerkonstruktionen entwickelt worden. Dazu gehören hydraulisch einstellbare Lager, bei denen die Lagervorspannung veränderlich ist, die in verschiedenen Ausführungen wie Kugel- oder Kegelrollenlagern existieren [79][76].

Gleitlager sind wegen ihrer großen, dämpfend wirkenden Trag- und Schmierfläche sehr unempfindlich gegen Stöße und lassen unbegrenzt hohe Drehzahlen zu. Ihre Geräuscentwicklung ist wesentlich geringer als bei Wälzlagern. Der wesentliche Nachteil der Gleitlager ist der trockene Anlauf und das damit verbundene hohe Anlaufmoment und der hohe Aufwand für die Schmierung [3].

Wälzlager bieten je nach Bauart einen fast reibungslosen Lauf: das Anlaufmoment ist nur unwesentlich höher als das Betriebsmoment. Sie sind besonders bei Lebensdauerfettsschmierung wartungsarm und benötigen keine Einlaufzeit. Ihre große genormte Variantenvielfalt erlaubt eine einfache Austauschbarkeit und Neubeschaffung. Als Nachteil von Wälzlagern sind der begrenzte Drehzahlbereich und die Geräuscentwicklung zu nennen. Sie sind empfindlich gegen Schmutz und daher meist mit hohem Aufwand abzudichten [29]. Ebenso sind sie im Stillstand und bei kleiner Drehzahl empfindlich gegen Stöße [107]. Trotz aller Für und Wieder werden gegenwärtig in 90 Prozent aller Werkzeugmaschinen Wälzlager als Spindellagerungen eingesetzt [24].

2.3.2 Diskussion und Aufbau moderner Maschinenspindeln

Das entscheidende Bauteil einer Werkzeugmaschine ist die Spindel. Dabei handelt sich um eine beidseitig gelagerte Welle, mit deren Hilfe ein Werkzeug oder Werkstück in Rotationsbewegung versetzt werden kann [23]. Bei sehr hohen Drehzahlen der Arbeitsspindel stoßen die indirekten Antriebe an ihre Grenzen. Die hier üblichen Übertragungsglieder wie Riemen oder Zahnräder sind bei hohen Drehfrequenzen nicht mehr in die Lage die notwendigen Momente auf die Spindel zu übertragen, bzw. erreichen die Grenze ihrer Belastbarkeit [130].

Zu diesem Zweck werden Direktantriebe eingesetzt, d. h. die Spindeln werden konstruktiv als Motorspindeln ausgeführt. Hier ist der elektrische Motor (asynchroner Drehstrommotor) in die Spindel bzw. in den Spindelkasten und der Welle integriert. Hierzu ist der Rotor oder Läufer zwischen den Lagern auf die Welle aufgeschraubt. Der Stator befindet sich im Spindelkasten. Durch diese Bauweise lässt sich der Antrieb sehr kompakt ausführen [23]. In Bild 14 ist ein Schnitt durch eine Motorspindel dargestellt.

Mit wachsendem Einsatz der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung werden die Anforderungen an die Spindelsysteme immer höher. Von der Drehzahlerhöhung sind alle Komponenten des Spindel systems betroffen, wobei unter dem Begriff "Spindel system" nicht nur die eigentliche Spindel, sondern das Gesamtsystem aus Welle, Lagerung, Antrieb, Werkzeug- und Werkstückspanneinheit verstanden wird. Das Spindel system bestimmt durch seine Eigenschaften ganz wesentlich die Arbeitsgenauigkeit einer spanenden Werkzeugmaschine [23][61]. Die ideale Spindel muss in erster

Linie die Lage ihrer Drehachse relativ zu einem festem Koordinatensystem beibehalten, unabhängig von den auftretenden Belastungsgrößen, wie Drehzahl, Zerspankraft, Schwingungen oder thermischen Einflüssen [61].

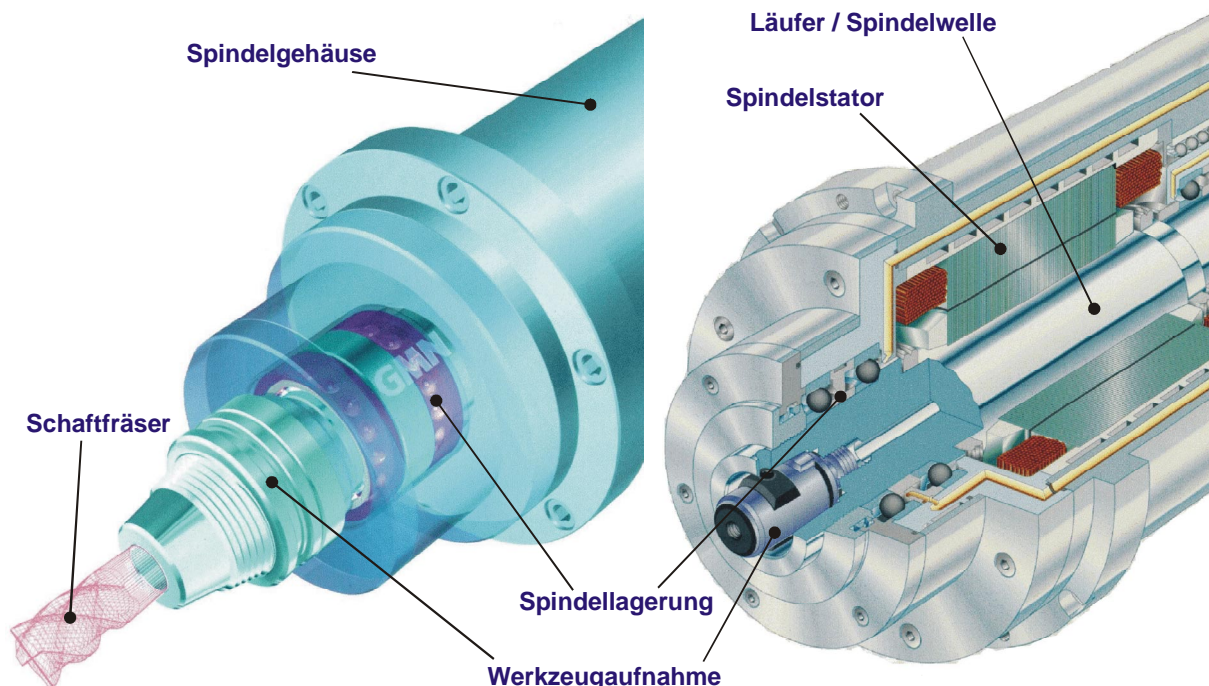


Bild 14: Aufbau einer Hochfrequenzspindel [79][77]

In Abhängigkeit von statischen, dynamischen, geometrischen und thermischen Spindeleigenschaften sowie den Eigenschaften in Zusammenhang mit auftretenden Lasten (Drehzahl, Zerspankräfte) ändert die Spindel ständig ihre Lage im Raum (Bild 15). Die dabei entstehenden Abweichungen der Spindelrotation von ihrer idealen Drehbewegung bzw. die Bewegungsfehler der Spindel haben einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der gefertigten Werkstücke [61].

Bei der Präzision der Werkzeugmaschinen besteht noch ein großes Entwicklungspotential. Ein Mangel an Genauigkeit wird vor allem durch Temperaturfehler verursacht, die bei Erwärmung der Umgebung, der Lager (Achsführungen, Spindellagerung), dem Werkzeugrevolver, der elektrischen Komponenten, sowie durch den Zerspanprozess auftreten [114]. Ein besonders großes Problem ist die Erwärmung der Spindellagerung und des Werkstücks und der damit verbundenen Ausdehnung des gesamten Spindelstocks.

Die gängige Ausführung des Spindelstocks bei Schrägbetmmaschinen ist in Form eines „Galgens“, um der Bettbahnabdeckung, die in den Bereich des Spindelstocks ragt, Platz zu bieten. Wie in der oberen Skizze ersichtlich, wandert die Spindel und damit das Werkstück aufgrund der unsymmetrischen Bauweise in die Werkzeugrichtung. Diese Lageänderung des Spindelstocks wirkt sich doppelt auf den Werkstückdurchmesser aus.

Weiterhin ist die Erwärmung durch die Reibung in der Spindellagerung stark abhängig von der Drehzahl und den Schnittparametern. Durch den Versatz der Drehspindel-

del kann zum einen die Formgenauigkeit eines Werkstücks nicht mehr eingehalten werden, zum anderen können beim Abstechen Probleme auftreten, die bis zum Bruch des Einstechstahls führen, wenn die Drehmitte außerhalb der Werkzeugwirkebene liegt.

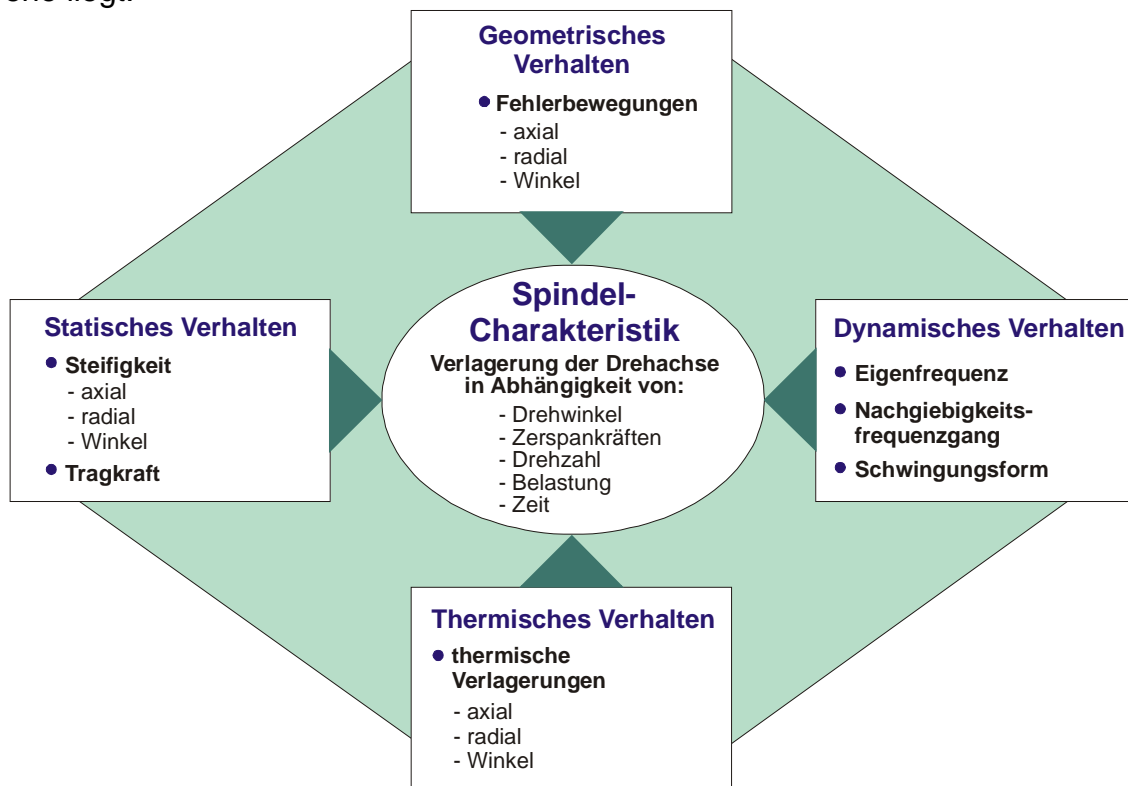


Bild 15: Einflüsse auf das Spindelverhalten [61]

Aufgrund der angesprochenen Problematik wird der Temperatur der Maschinenkomponenten eine besondere Beachtung geschenkt. Motorspindeln müssen gekühlt werden und werden durch Sensoren auf ihre Betriebsgrenzen hin kontrolliert. Die Temperaturüberwachung an anderen Stellen einer Werkzeugmaschine, beispielsweise direkt auf dem Werkzeug ist sinnvoll, wurde aber hauptsächlich im Laborbetrieb realisiert (siehe Kapitel 7).

Die Mechatronik, die das zentrale Thema dieser Dissertation ist, kann eine Problemlösung darstellen, um dezentrale, mit integrierter Elektronik zur Datenauswertung ausgestattete Temperatursensoren herzustellen. Eine umfassende Überwachung scheidet bislang an den Sensorkosten und dem Verkabelungs- und Auswerteaufwand.

2.3.3 Werkzeuge für die Drehbearbeitung

Die Drehbearbeitung gehört zum Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden, wobei die Schneidenanzahl, die Form der Schneidkeile und ihre Lage zum Werkstück bekannt und beschreibbar ist. Das Drehwerkzeug ist fest in den Werkzeugrevolver eingespannt und führt während der Bearbeitung nur translatorische Bewegungen aus. Die eingesetzten Werkzeuge sind in zwei Gruppen zu teilen:

- Konventionelle Werkzeuge
- Modulare Werkzeugsysteme

Für die verschiedenen Bearbeitungsarten, die auf einer Drehmaschine ausführbar sind, wird unterschiedliches Drehwerkzeug benötigt. Das Drehwerkzeug besteht aus der Wendeschneidplatte, Drehmeißel und dem Werkzeughalter. Die Wendeschneidplatten sind in ihrer Geometrie den Bearbeitungsmöglichkeiten angepasst und erfordern damit verschiedene Drehmeißelausführungen. Zusätzlich werden für verschiedene Revolveraufnahmen der Drehmaschine Werkzeughalter mit einem Schaftdurchmesser von 20 mm für kleine Maschinen, bis 60 mm für große Maschinen benötigt. In Abhängigkeit von der Lage des Revolvers in Bezug auf die Schneide werden linke und rechte Ausführungen des Werkzeughalters erforderlich. Aus diesen Erkenntnissen ist auf eine große Vielfalt von Drehwerkzeugen zu schließen, die für die Fertigung benötigt werden. Die nach DIN69880 hergestellten Werkzeughalter sind einsatzgehärtet mit einer Oberflächenhärte von 58-60HRc. Nach dem Einspannen des Drehmeißels in den Werkzeughalter ist es erforderlich, eine Werkzeugkorrektur durchzuführen, um der Drehmaschine die genaue Position der Schneidplattenspitze zu vermitteln. Bedingt durch kleinere Serien, eine größere Produktvielfalt und kürzere Lebensdauer der Produkte ist häufig ein Werkzeugwechsel und eine Maschinenumrüstungen nötig, was zur Verringerung der effektiven Schnittzeit führt. Mit dem Einsatz von **modularen Werkzeugsystemen** wird die Einrichtzeit verringert, da die Möglichkeit des Schneidplattenaustauschs und der Vermessung des Werkzeugs außerhalb der Maschine besteht und diese schnell mit einer hohen Präzision in den Halter eingesetzt werden können. Ein modulares Werkzeugsystem besteht aus einer Spanneinheit und dem Schneidkopf. Die Umrüstung der Maschine von konventionellen Werkzeugen zu modularen Werkzeugsystemen benötigt keinen zusätzlichen Umbau, da die Spanneinheit den standardisierten Revolveraufnahmen angepasst ist.



Bild 16: Vergleich der Maschinenzeiten für verschiedene Spannsysteme [81]

Die Konstruktion der KM-Werkzeuge basiert auf einem 1:10 Kurzkegelschaft, der selbstzentrierend ist und somit das Einsetzen als auch das Entnehmen des Werkzeugs erleichtert. Die eingespannten Werkzeuge haben gleichzeitig Kegel- und Flächenkontakt. Der Kontakt wird bei KM-Werkzeugsystemen durch eine elastische Verformung in Form einer Dehnung des Außenkegels realisiert, wenn der größere Innenkegel beim Spannen zurückgezogen wird. Der KM-Spannmechanismus ist im Kegelschaft der KM-Einheit eingebaut und arbeitet mit zwei im Winkel zueinander stehenden Bohrungen, sogenannten Kugelbahnen. Mit Einsatz des endgültigen Wertes des Drehmomentes auf den Spannmechanismus wird das Ende der Schneideinheit sicher zwischen der Spannkugel und dem Innendurchmesser der Spanneinheit gespannt. Die Wiederholgenauigkeit bei Werkzeugsystemen in axialer und radialer Richtung beträgt $2,5 \mu\text{m}$ [81].

Die Anwendung von konventionellen Werkzeugen bei der Drehbearbeitung verursacht hohe Maschinenstillstandszeiten, da für jeden Werkzeugwechsel ein Maschinenstop erforderlich ist. Eine Erhöhung der effektiven Schnittzeit der Maschine ist unter anderem über die Verkürzung der Einrichtzeit möglich. Durch das Schnellwechselsystem bei modularen Werkzeugsystemen wird die Einrichtzeit verringert und damit die effektive Schnittzeit erhöht. Die Beschaffungskosten der Werkzeugsysteme sind im Vergleich mit konventionellen Werkzeugen höher, allerdings amortisiert sich dieser Betrag in relativ kurzer Zeit durch die effektivere Produktion. Eine Darstellung einer Spanneinheit eines Schnellwechsel-Werkzeugsystems ist in Bild 16 (links) zu erkennen.

2.3.4 Moderne Schneidstoffe für die Trockenbearbeitung und Minimalmengenschmierung

Die Entwicklung der Fertigungstechnik ist gekennzeichnet durch ein permanentes Streben nach steigender Fertigungsqualität bei gleichzeitig erhöhter Produktivität. Auf dem Gebiet der spanenden Fertigung ist die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung ein Weg zur Verwirklichung beider Ziele [130]. Bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (HSC - High Speed Cutting) werden Schnittgeschwindigkeiten erreicht, die um den Faktor 5 bis 10 über der konventionellen Spanbearbeitung liegen [16]. Die erzielbaren Geschwindigkeitswerte hängen von den zu zerspanenden Werkstoffen und von der Bearbeitungsart ab [47].

Für die Werkzeuge ergeben sich infolge der gesteigerten Geschwindigkeiten erhöhte thermische und dynamische Belastungen, die bei konventionellen Schneidstoffen bereits zum Versagen führen. Für die Anwendung der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung sind leistungsfähige Schneidstoffe notwendig, die bei hohen Schnittgeschwindigkeiten eine hohe Standzeit und Zuverlässigkeit bieten. Aufgrund verbesserter Werkstoffe und neuer Beschichtungstechnologien sowie optimierten Werkzeugdesigns werden heute Schneidstoffe angeboten, die Schnittgeschwindigkeiten bis zu 10.000 m/min ermöglichen (Bild 17). Die Schneidstoffe werden für jeden Spanprozess optimal bezüglich ihrer Verschleißfestigkeit und Zähigkeit angeboten. Die große Spannweite der Materialkennwerte von Schneidstoffen zwischen der Schrapp- und Schlichtbearbeitung sowie unterschiedlicher Werkstoffe ist ein Grund für die Vielfalt, wie sie in Bild 17 dargestellt ist.

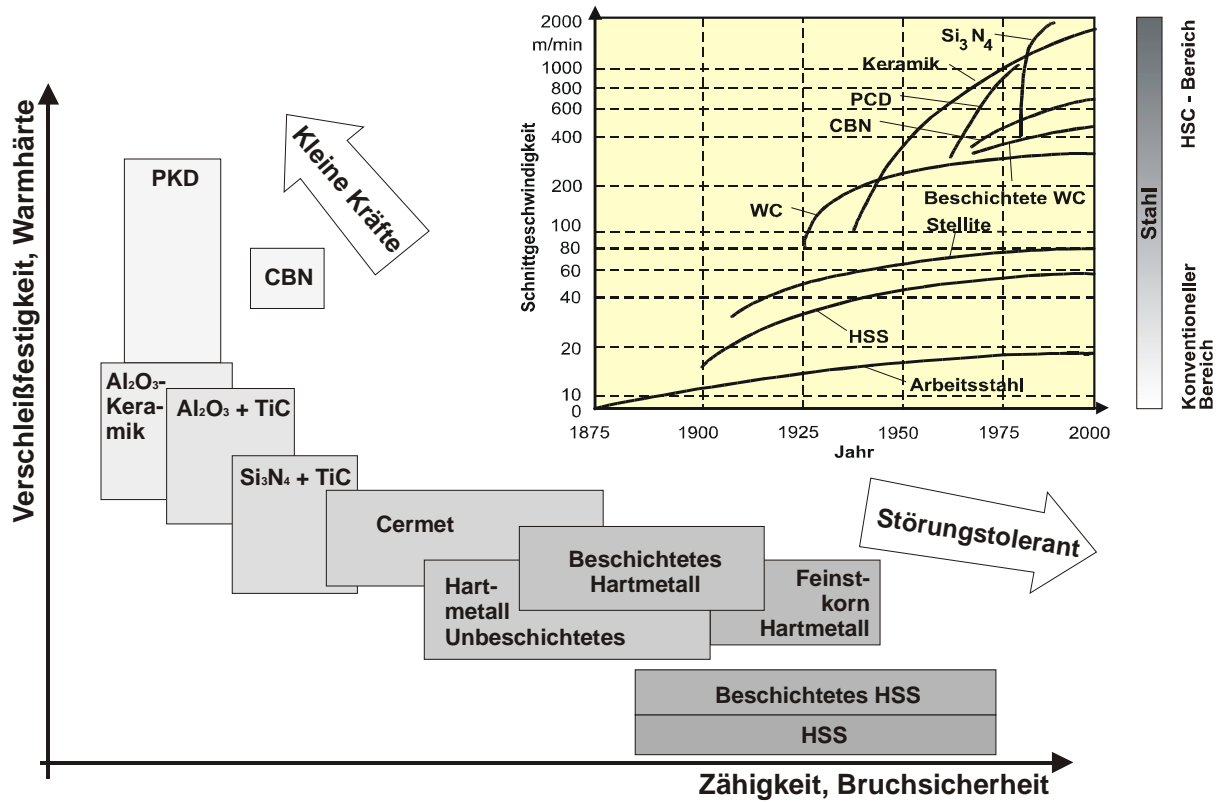


Bild 17: Einordnung von Schneidstoffen [43]

Die Trockenbearbeitung ist in den vergangenen Jahren, aufgrund ökonomischer und ökologischer Gesichtspunkte in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Bei den Anwendern wurde das Bewusstsein für die Kosten geweckt, die mit dem Einsatz, der Aufbereitung und Entsorgung von Kühlschmiermitteln einhergehen.

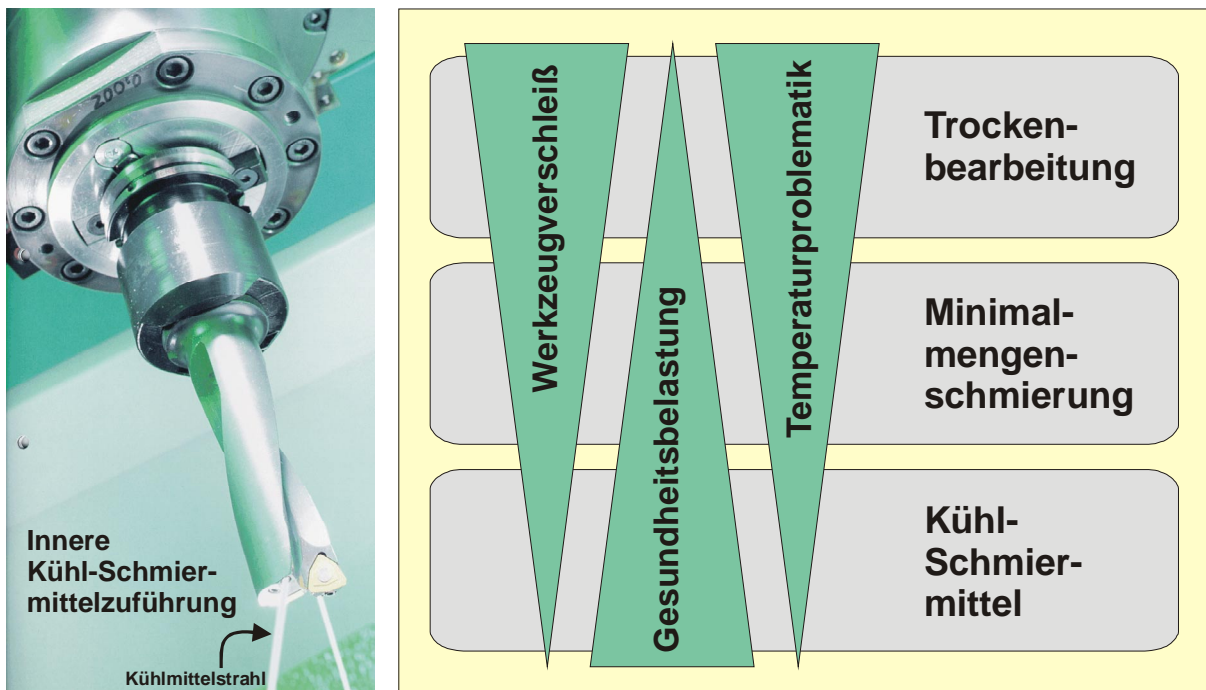


Bild 18: Kühl- und Schmierverfahren im Vergleich [71]

Die Trockenbearbeitung hat aber technologische Nachteile im Verschleißverhalten und in der Späneabfuhr sowie im schwer kontrollierbaren Dehnungsverhalten von Werkzeug und Werkstück bei Temperaturerhöhung durch Prozesswärme. Als Zwischenlösung hat sich die Minimalmengenschmierung etabliert. Hier wird Pressluft auf die Spanstelle geblasen, was zu einer hervorragenden Späneabfuhr führt und zusätzlich geringfügig die Wirkstelle kühlt. Der große Vorteil macht sich erst bei einer geringen Beimengung von Öl in den Luftstrom bemerkbar. Das Verschleißverhalten erreicht aufgrund der Schmierwirkung ähnliche Kennwerte wie beim Einsatz von Kühlschmiermitteln. Das Temperaturproblem bleibt aber weiterhin bestehen und verhindert noch die allgemeine Durchsetzung dieses Verfahrens.

Das Bohren ist eine problematische spanende Bearbeitung. Die Eingriffszone befindet sich am Grund einer Bohrung und kann daher schlecht gekühlt und geschmiert werden. Bei maximaler Bohrtiefe hat der Bohrer aufgrund der Temperaturdehnung seinen größten Durchmesser. Die Bohrung besitzt demnach eine leicht konische Form. Beim Herausfahren aus der Bohrung beschädigt der Bohrer die hergestellte Oberfläche. Im schlimmsten Fall bricht der Bohrer. Die innere Kühlmittelzufuhr ist eine Problemlösung: die Schneide wird in der Wirkzone gekühlt und die Späne werden aus der Bohrung herausgespült. Die Bohrungen der inneren Kühlmittelzuführung im Werkzeug können auch für die Minimalmengenschmierung verwendet werden, indem das Öl-Luft-Gemisch darin befördert wird.

2.3.5 Schwingungsverhalten von Werkzeugmaschinen

Werkzeugmaschinen sind schwingungsfähige Systeme. Wenn auf eine Maschine kurzzeitig eine Kraft einwirkt, so wird die Maschine dadurch verformt und schwingt nach der Kraftanregung in einer Schwingungsform aus, die sich aus einer Überlagerung aller Eigenfrequenzen zusammensetzt. Die stets vorhandene Dämpfung bewirkt, dass die freien Schwingungen abklingen. Die Dämpfungskräfte sind für die höheren Frequenzen im Allgemeinen größer als für die tieferen, so dass von den freien abklingenden Schwingungen meist nur diejenigen mit tiefen Eigenfrequenzen als Störungen in Erscheinung treten [64]. Schwingungen können auf sehr unterschiedliche Weise klassifiziert werden, z. B. nach ihren Eigenschaften, der Anzahl der Freiheitsgrade oder nach ihrem Entstehungsmechanismus (Tabelle 1).

In der gewöhnlichen Zerspanungstheorie wird hauptsächlich der statische, schwingungsfreie Zerspanvorgang, d. h. die Spanabhebung unter schwingungsfreien Umständen behandelt. Jedoch ist auch der stabile statische Zerspanvorgang niemals frei von Schwingungserscheinungen. So führen beispielsweise Werkstoffinhomogenitäten (hartes Korn) oder schwankende Spanungsdicken (Kommaspäne) zu zeitlich veränderlichen Schnittkräften. Aber auch Stöße durch die Zahneintritte mehrschneidiger Werkzeuge erzeugen dynamische Effekte in Form von Maschinenschwingungen [141].

Auch Maschinen und Maschinenbauteile sind sowohl elastische als auch mit Masse behaftete Gebilde und stellen damit schwingungsfähige Systeme dar. Wenn zeitveränderliche Kräfte und Fußpunktbewegungen angreifen, stellen sich Maschinenschwingungen ein. Besonders nachteilig sind sogenannte Resonanzerscheinungen, bei denen eine Eigenfrequenzanregung mit der Eigenfrequenz der Maschinenstruktur übereinstimmt und damit zu einer Verstärkung der Schwingungsamplituden führt

[3]. Dieses Eigenschwingungsverhalten ist durch seine Eigenfrequenz, die Abklingfaktoren und den Eigenvektor bestimmt.

Die Tabelle 1 zeigt die Unterteilung der Schwingungen nach den Entstehungsmechanismen.

Schwingungstyp	Beispiele	Ursache, Anregung	Frequenz	Bewegungsgleichung
Freie Schwingungen, Eigenschwingungen	Punktpendel, Stimmgabel, Klaviersaite	einmaliger Anstoß von außen	Eigenfrequenz ν	homogen $\ddot{x} + \nu^2 x = 0$
Erzwungene Schwingungen	Fundamenterschütterung, Fahrzeuge auf unebener Bahn	äußere Kräfte oder Momente, meist periodisch wirkend	Erreger-/Kreisfrequenz ω	inhomogen $\ddot{x} + \nu^2 x = f(\omega t)$
Selbsterregte Schwingungen	Uhr, Klingel, Streich- und Blasinstrumente, Tragflügelklappen	Selbststeuerung über nichtperiodisch wirkende Energiequelle	etwa Eigenfrequenz ν	nichtlinear $\ddot{x} + f(x, \dot{x}) = 0$
Parametererregte Schwingungen	Kolbenmotoren, Luftschrauben, Zahnradgetriebe, Kreuzgelenke	periodisch veränderliche Parameter	Teile oder Vielfache der Parameterfrequenz ω_p	periodische Koeffizienten $\ddot{x} + p(t)x = 0$

Tabelle 1: Klassifizierung von Schwingungen [134]

Neben den Eigenfrequenzen sind auch die sogenannten selbsterregten Schwingungen von großer Bedeutung für das dynamische Verhalten der Werkzeugmaschine. Bei diesen selbsterregten Schwingungen werden die Kräfte, welche die Schwingung erregen und erhalten von der Schwingung selbst erzeugt.

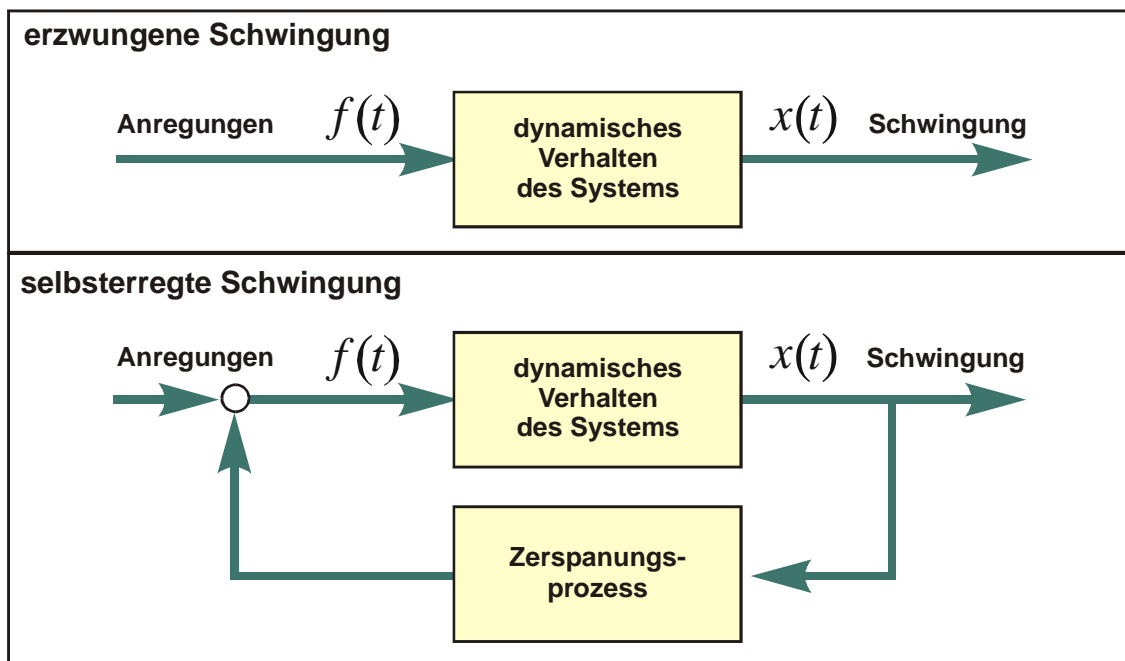


Bild 19: Prinzip von erzwungenen und selbsterregten Schwingungen [129]

Bei einer Werkzeugmaschine werden diese durch eine Störkraft hervorgerufen. Aufgrund der Nachgiebigkeit der Maschine reagiert sie auf die Störung mit Wechselverformung zwischen Werkzeug und Werkstück, die über den Zerspanprozess zeitlich veränderliche Zerspankräfte erzeugen. Diese schwankenden Zerspankräfte bewirken eine erneute Anregung der Maschine. Das Bild 19 zeigt das Prinzip von erzwungenen und selbsterregten Schwingungen an Werkzeugmaschinen, bzw. einer einmaligen Anregung und dem Zerspanprozess.

Zwei wichtige Mechanismen, die zur Entstehung der selbsterregten Schwingungen führen sind unter anderem:

Regenerativeffekt Hier wird durch eine einmalige Störung eine abklingende Eigenschwingung erzeugt, die sich auf der Oberfläche des Werkstücks abbildet. Durch das wiederholte Einschneiden in die wellige Oberfläche kann sich die Schwingung unter bestimmten Bedingungen aufschaukeln. Notwendige Voraussetzung für die Entstehung dieses Rattermechanismus ist das wiederholte Einschneiden eines Werkzeugs in die von ihm verursachte Welligkeit der Werkstückoberfläche oder das Einschneiden einer Schneide eines mehrschneidigen Werkzeugs in die von der vorausgehenden Schneide erzeugten Welligkeit [141].

Fallende Schnittkraft-Schnittgeschwindigkeitskennlinie Das Prinzip entspricht dem Stick-Slip-Phänomen, bei dem der Reibkoeffizient bei zunehmender Verfahrensgeschwindigkeit abnimmt. Entsprechend ergibt eine mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit abnehmende Kraftcharakteristik eine negative Dämpfung, die schließlich zur Instabilität führt. Die für das Rattern ursächliche Eigenschwingungsform muss an der Zerspanstelle eine Komponente der Eigenschwingungsrichtung in Richtung der Schnittkraft aufweisen [141].

Die erzwungenen Schwingungen werden durch äußere Störungen verursacht und in ihrem Zeitverhalten bestimmt [3]. Diese Schwingungen entstehen durch Einwirkung von dynamischen Kräften oder Verschiebungen auf Werkzeugmaschinenengestelle und sind bei den Werkzeugmaschinen von geringer Bedeutung.

3 Neue Potenziale durch die Mechatronik und Mikrosystemtechnik

3.1 Abgrenzung der Begriffe

3.1.1 Mechatronik

In der Literatur und im Sprachgebrauch herrscht ein Mangel an einer klaren Abgrenzung zwischen den Begriffen der „Mechatronik“ und der „Mikrosystemtechnik“. Die Mechatronik ist im Vergleich zur Mikrosystemtechnik ein „junger“ Begriff. Die Attribute, die jetzt und wie es auch in Bild 20 dargestellt ist, der Mechatronik zugesprochen werden, waren vorher mit der Mikrosystemtechnik verknüpft. Die Mikrosystemtechnik hatte aber zwei grundsätzliche Problemfelder zu lösen, das der Integration mit dem Problemfeld Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) und das der Technologie mit dem Problemfeld der funktionalen Mikrostrukturierung.

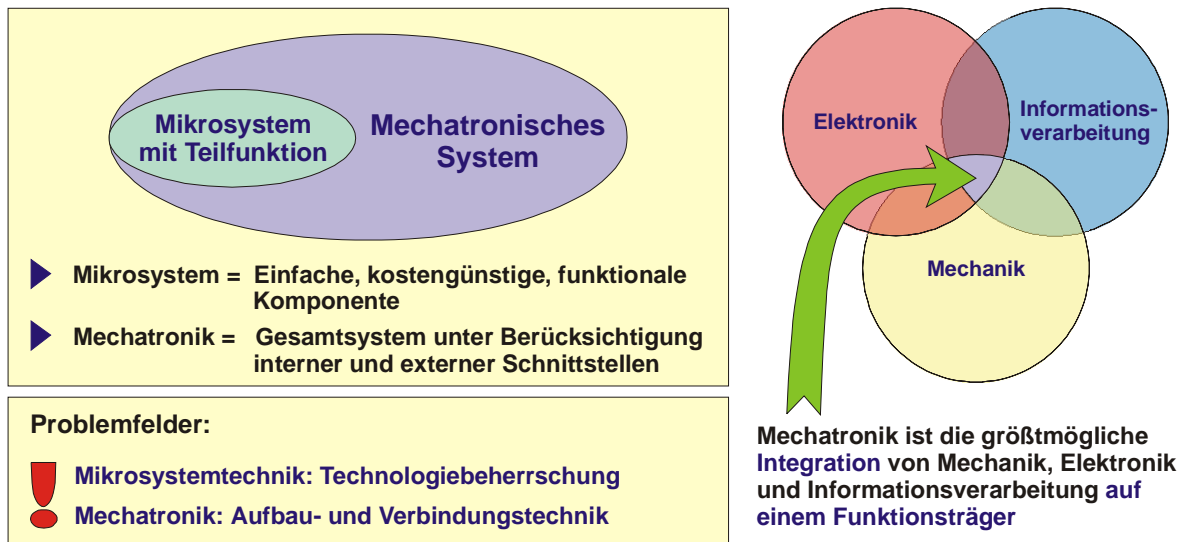


Bild 20: Abgrenzung von Mechatronik und Mikrosystemtechnik

Die Literatur (Beispiel [62]) zum Thema Mikrosysteme hat als Hauptaugenmerk meist technologische Lösungen (miniaturisierte Zahnräder, Mikropumpen, etc.), weniger das Gesamtsystem mit der Integration von Software und der AVT. Da hierfür teilweise andere Fachkenntnisse nötig sind, konnte die Mechatronik ein fachliches Aufgabengebiet der Mikrosystemtechnik übernehmen. Bild 20 zeigt letztendlich die für diese Dissertation verwendete Begriffsdefinition: Ein Mikrosystem bezeichnet eine einfache, kostengünstige, funktionale Komponente, während die Mechatronik das Gesamtsystem unter Berücksichtigung der internen und externen Schnittstellen betrachtet. Der Umkehrschluss dieser Aussage bedeutet aber auch, dass in einem mechatronischen System nicht zwingend Mikrosystemtechnik eingesetzt werden muss. Dies alleine rechtfertigt, dass die Mechatronik eine eigenständige Disziplin wurde. Auf die Mikrosystemtechnik wird im folgenden Kapitel ausführlich eingegangen.

Mechatronische Systeme zeichnen sich durch eine intensive Integration elektronischer und informationstechnischer Funktionen auf einem mechanischen Funktions-träger aus. Mechatronik ist somit eine neue Querschnittsdisziplin, die auf die größtmögliche Integration von Mechanik, Elektronik und Informationstechnik zur Schaffung intelligent gesteuerter und geregelter Geräte und Maschinen ausgerichtet ist. Gerade in der ganzheitlichen Betrachtung des Maschinenbaus und der Elektrotechnik als zwei wichtigen Säulen der Wirtschaft einerseits und der modernen Informationstechnik andererseits bestehen die wesentlichen Potenziale dieser Technologie. Die Kombination unterschiedlicher Funktionen aus den Bereichen Mechanik, Elektronik und Software in integrierten Produktionsstrukturen wird damit zu einer Schlüsseltechnologie für alle Branchen. Mechatronische Systeme weisen einen weit höheren Integrationsgrad als klassische Produkte auf. Dieser geht in der Regel soweit, dass die mechanische, elektronische oder informationstechnische Teilfunktion ohne den jeweils anderen Part nicht arbeitsfähig ist und die Gesamtfunktion nur durch das ideale Zusammenwirken der Teilfunktionen realisiert werden kann [82].

Dies hat beachtliche Folgen auf die Entwicklung und die Produktion derartiger Systeme. Der hohe Integrationsgrad muss bereits in der Produktplanung und nachfolgend von der Entwicklung über die Produktionsplanung bis zur Produktion intensiv berücksichtigt werden. Dies kann nur durch interdisziplinäres Arbeiten zwischen der mechanischen Fertigungstechnologie, Elektronikfertigung und Informationsverarbeitung und Softwareentwicklung erreicht werden.

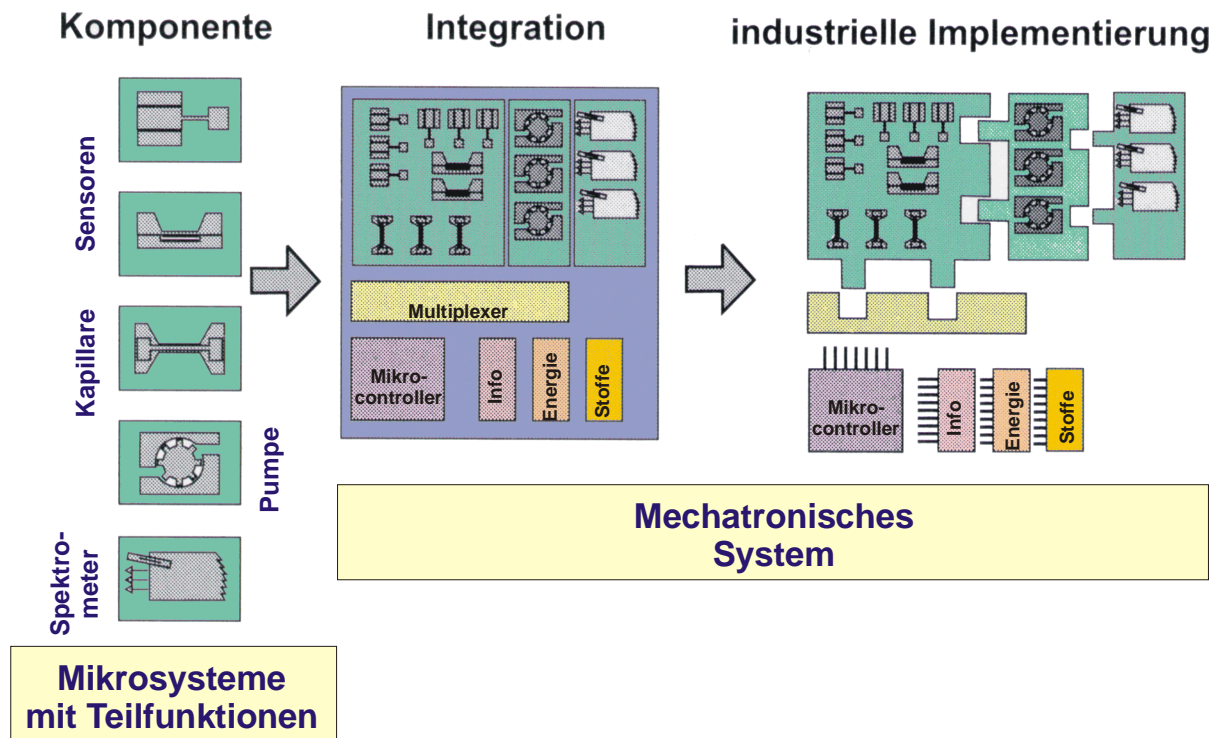


Bild 21: Aufbau eines mechatronischen Systems am Beispiel eines Mikrospektrometers mit Mikrosystemen [62]

Im vorangehenden Bild soll anhand eines Beispiels der typische Aufbau eines mechatronischen Systems mit Mikrosystemen für Teilfunktionen erläutert werden. Dies entsteht durch die Integration der einzelnen Bauelemente oder Mikrosysteme auf

einem mechanischen Funktionsträger. Das Beispiel des Mikrospektrometers in Bild 21 zeigt, wie Pumpen, Sensoren und Kapillaren, die unterschiedliche Mikrosysteme darstellen, über definierte Schnittstellen und eine Steuereinheit zu einem Gesamtsystem integriert werden [62]. Dazu müssen die internen und externen Schnittstellen berücksichtigt werden, wobei zwischen informationstechnischen, energetischen und Stoffschnittstellen (Gasen, Flüssigkeiten) zu unterscheiden ist. Die Regelung, bzw. Steuerung der Teilfunktionen (z. B. Pumpe) erfolgt über integrierte Mikrocontroller, die über entsprechende Software verfügen (Bild 22).

Die Aufbau- und Verbindungstechnik erweist sich als das größte Problemfeld der Mechatronik. Die in der mechanischen Montage und Elektronikproduktion eingesetzten Produktionsanlagen stoßen bezüglich der technologischen Möglichkeiten der Positionierung und Kontaktierung der Baugruppen an ihre Grenzen. Eine grundlegende Überarbeitung bzw. Neukonzipierung der Produktionsanlagen ist notwendig, in der eine Kombination der Disziplinen Mechanik und Elektronik berücksichtigt wird. Weiterhin erfordern die aus verschiedener Materialien bestehenden Baugruppen der mechatronischen Systeme eine heterogene Verbindungstechnikstruktur.

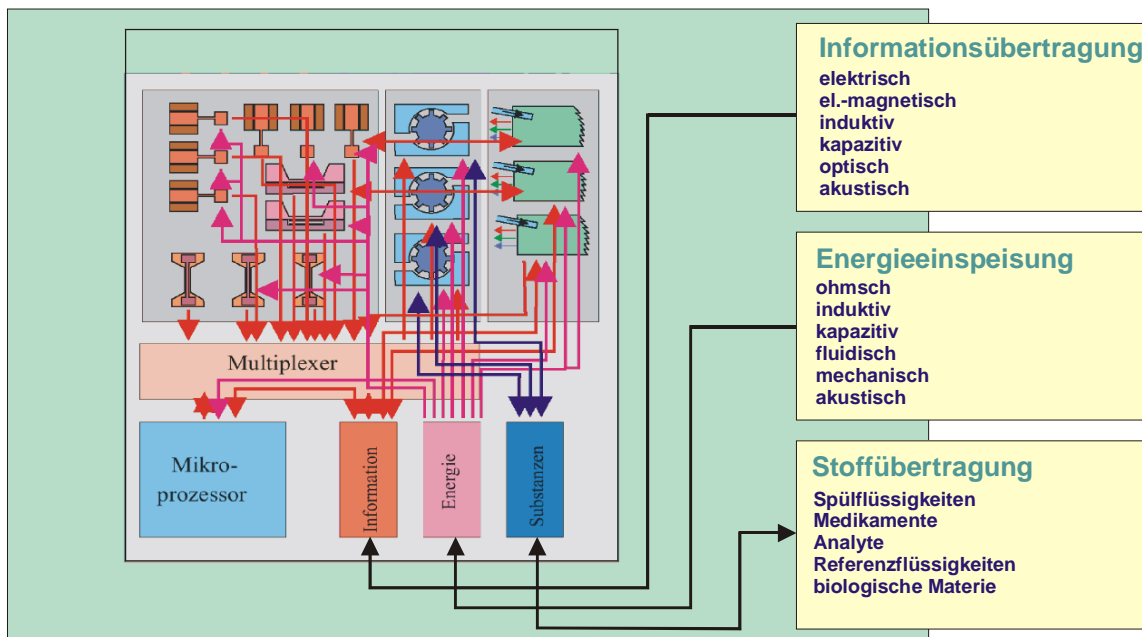


Bild 22: Schnittstellen mechatronischer Baugruppen [62]

Die Mechatronik bietet sich an, neue angepasste Sensoren für Werkzeugmaschinen aufzubauen. Bislang sind solche innovativen Sensorsysteme der Automobilindustrie und der Medizintechnik vorbehalten. Im Gegensatz zu den genannten Bereichen müssen Sensoren bei Werkzeugmaschinen, auch bei geringen Stückzahlen, kostengünstig sein. Die Möglichkeiten des Sensoreinsatzes in Maschinenkomponenten sind sehr vielfältig und werden heute bereits im Rahmen der Möglichkeiten verwendet. Als großes Problem erweist sich die Ankopplung der gewonnenen Daten in eine Maschinensteuerung und der kostengünstigen Integration der miniaturisierten Baugruppen in die Maschinenkomponenten.

Neben den wirtschaftlichen Hemmnissen zeigen sich Defizite, vor allem auch in der Firmenstruktur der Maschinenkomponentenhersteller. Wie bereits angedeutet wurde,

ist für die Arbeit an mechatronischen Baugruppen ein übergreifendes Wissen aus den Bereichen Mechanik, Elektronik und Informationsverarbeitung notwendig. Diese Wissensbasis muss in den Unternehmen meist erst geschaffen werden.

Diese Dissertation soll Wege aufzeigen, um mechatronische Baugruppen herstellen zu können. Letztendlich muss eine neue Branche wachsen, die als Dienstleister zur Herstellung der innovativen Maschinenkomponenten auftritt, da sich die Installation der Produktionstechnik nur bei einer großen Stückzahl rechnet und spezielles Expertenwissen gefragt ist.

3.1.2 Mikrosystemtechnik

Die Komponente, die die mechanische, elektrische oder elektronische Teilfunktion in der Mechatronik übernimmt, ist oft ein Produkt der Mikrosystemtechnik [12]. Diese Technik übernimmt die für die Mikroelektronik entwickelten Technologien zur wirtschaftliche Massenherstellung, ergänzt sie um mikromechanische und optische Komponenten und hat somit einfache, kostengünstige und funktionale Bauteile als Ergebnis. Mikrosysteme entstehen aus verschiedenen Materialien (Metalle, Kunststoffe, Keramiken, Gläser, neue sensitive Materialien) durch die Verwendung unterschiedlicher Technologien in der Mikrostrukturierung wie Lasermikrobearbeitung oder Aufbautechniken. Dabei zeigt sich gerade die Beherrschung dieser Technologien als Hauptproblem [85].

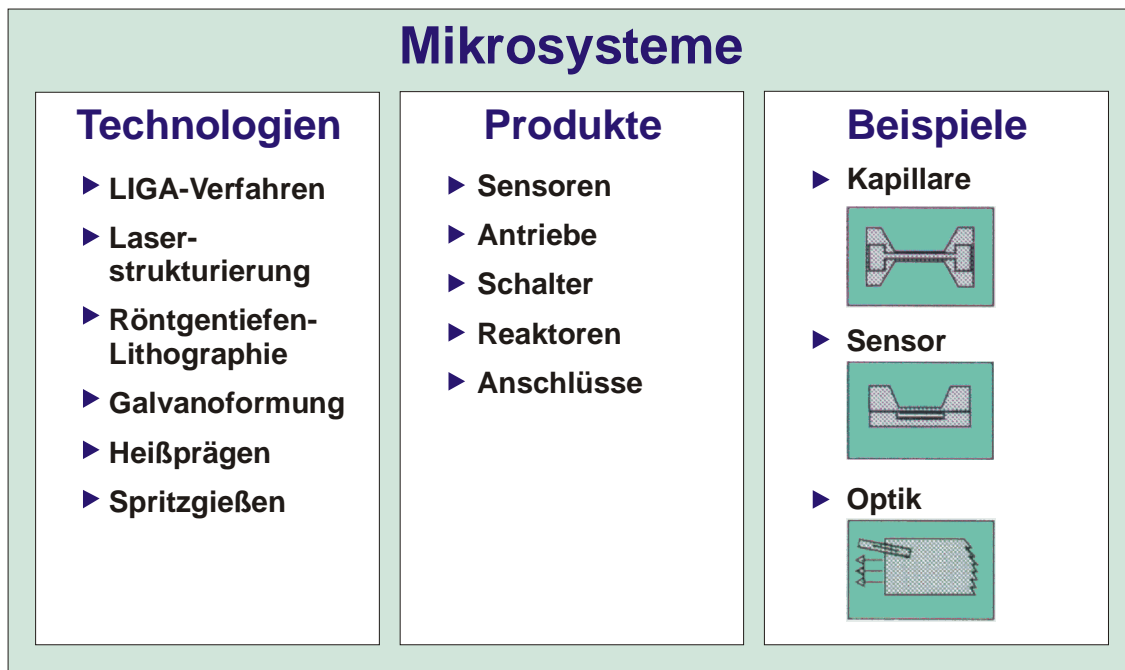


Bild 23: Technologien und typische Anwendungen von Mikrosystemen [62]

Produkte der Mikrosystemtechnik können Sensoren, Antriebe, Schalter und Anschlüsse, aber auch chemische Reaktoren sein. Sehr häufig werden miniaturisierte mechanische Elemente wie Mikrozahnräder etc. gezeigt. Die Mikrosystemtechnik ist aber kein Weg, um miniaturisierte Maschinen herzustellen. Neben der Frage ob hierfür Anwendungen vorhanden sind, zeigt folgendes Bild einen Faktor, der hier eine entscheidende Rolle spielt [63].

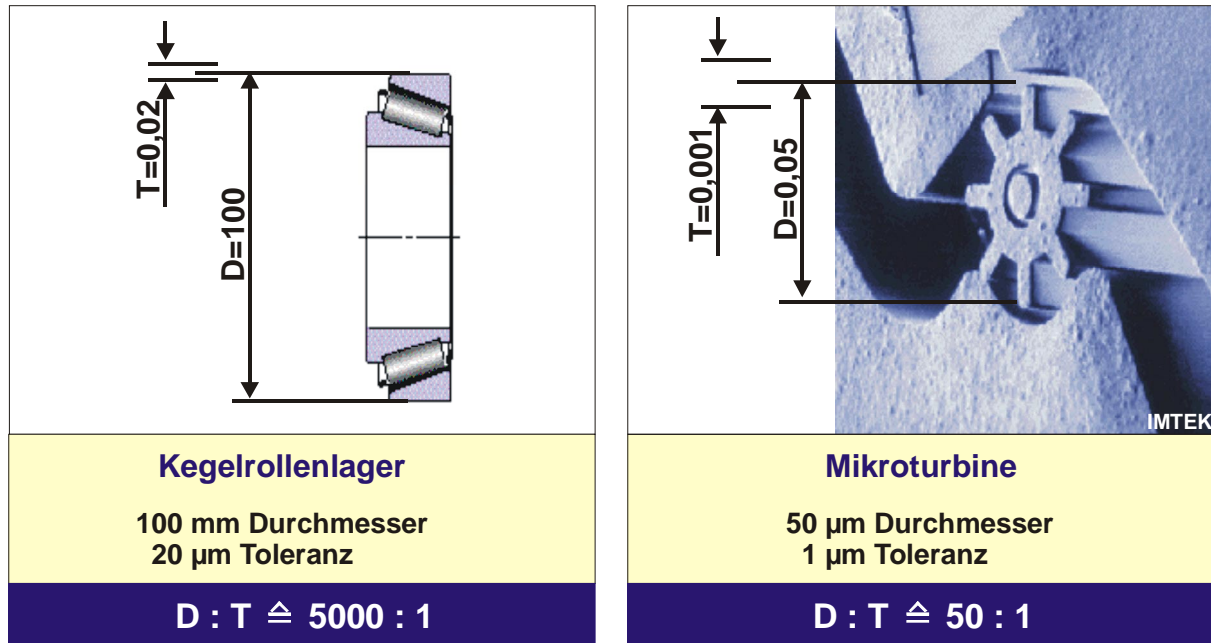


Bild 24: Größenverhältnisse in der makro- und mikroskopischen Welt [63]

Die dargestellte Mikropumpe, wie auch Mikrozahlräder sind zwar sehr klein, aber verglichen mit den Toleranzen des Fertigungsprozesses relativ ungenaue mechanische Gebilde. Im Beispiel ist die relative Genauigkeit von Mikrosystemen 100-fach schlechter als die von präzisen makroskopischen Gebilden, wie einem Wälzlager. Nicht zuletzt ist eine Bearbeitung funktionaler Flächen, wie durch Härten oder Schleifen (Beispiel: Lagerringe) bis heute nicht möglich. Das Fehlen dieser Technologien verhindert eine akzeptable Lebensdauer der mechanischen Mikrosysteme. Die Zukunft von Mikrosystemen liegt in der Massenfertigung. Das Prinzip funktioniert ähnlich wie die Strukturierung von Siliziumwafern. In einem Fertigungsprozess wird eine große Anzahl von Bauteilen gleichzeitig und kostengünstig hergestellt. Mikrosysteme können aber mit einer größeren Vielfalt von Materialien und Verfahren gefertigt werden.

3.2 Produktion mechatronischer Baugruppen

3.2.1 Funktionale Gehäuse aus alternativen Werkstoffen

In der Zielsetzung dieser Dissertation wurde der prinzipielle Aufbau eines integrierten oder intelligenten Sensorsystems für Werkzeugmaschinen beschrieben (Bild 5). Bei der Produktion dieser Baugruppen ist die Teilezuführung der Sensoren und Auswerteelektronik neben der Beherrschung der Fertigungsprozesse ein besonderes Problem. Für die Integration von mechatronischen Baugruppen in Maschinenkomponenten müssen in erster Linie die Platzverhältnisse berücksichtigt werden, um diese Sensorsysteme in der Nähe des Wirkortes platzieren zu können, ohne die Funktion der Maschinenkomponente zu stören oder die Integration zu aufwendig zu gestalten. Die Gehäuse müssen so gestaltet sein, dass alle Randbedingungen erfüllt werden. Dies bildet einen Schwerpunkt in diesem Kapitel.

Oft ist es problematisch, Sensorsysteme, Stecker und Kabel einzubauen ohne vorher spezielle Aufnahmen am Gehäuse der Maschinenkomponente vorzusehen. Zum einen ist die zusätzliche Bearbeitung kostenintensiv, zum anderen wird die Montage meist manuell durchgeführt. Bei der gleichzeitigen Erfassung verschiedener Signale (z. B. Temperaturen und Schwingungen) wird der Aufwand für die Sensorintegration mehrfach durchgeführt. Durch Integration in eine einzige Baugruppe können Kosten und Zeit gespart werden. Weniger elektrische Schnittstellen verringern zusätzlich die Ausfallwahrscheinlichkeit der Baugruppe. Ziel soll es sein, alle elektromechanischen Funktionen in ein Gehäuse zu integrieren, das gleichzeitig so an der Maschinenkomponente befestigt ist, dass eine Montage ohne größeren Aufwand möglich ist und die Funktion der Baugruppe nicht beeinträchtigt wird. Das Gehäuse kann beispielsweise die Form einer Abdeckung haben, die an die äußere Kontur der Maschinenkomponente angepasst ist. Hier bietet sich Kunststoff als das am variabelsten formbare Material an.

Eine mechatronische Baugruppe integriert elektronische Bauelemente und elektromechanische Bauteile, die beispielsweise Steckvorrichtungen beinhalten. Bisher ist es üblich, solche Bauteile auf planaren Leiterplatten zu befestigen. Die Kombination von planarer Leiterplatte und frei gestaltetem Gehäuse erweist sich meist als problematisch und nicht sinnvoll, da die Vorteile einer freien Gehäuseform mit den Randbedingungen der planaren Leiterplatte zunichte gemacht werden. Entwicklungen der letzten Jahre im Bereich alternativer Schaltungsträger haben Möglichkeiten aufgezeigt, elektromechanische Bauteile direkt in die Oberfläche von Kunststoffgehäusen zu integrieren.

Die Leiterbahnen zur Kontaktierung dieser Bauteile sind integraler Bestandteil des Gehäusematerials. Bei Räumlichen Elektronischen Baugruppen (3-D MID¹) handelt es sich um fast beliebig geformte Spritzgussteile, bei denen die Oberfläche gleichzeitig als Schaltungs- und Bauteilträger verwendet wird. Sie können außerdem schirmende oder sendende Flächen bilden (Bild 25) [55][60][102]. Die sehr wirtschaftlich herzustellenden Spritzgussformteile sind dabei meistens gleichzeitig Gehäuse oder Chassis mit integrierten mechanischen Trage-, Funktions- und Montageelementen. Leichter zu bearbeiten sind Zwischenlösungen, wie flexible Schaltungsträger, die mit konventionellen Verfahren bearbeitet und erst danach geformt werden. Problematisch ist die Anwendung gängiger Produktionstechniken für elektromechanische Baugruppen. Die Zugänglichkeit an die Fügestellen macht eine grundlegende Überarbeitung der Produktionsanlagen nötig wie sie in der mechanischen Montage und Elektronikproduktion eingesetzt werden.

Eine Kombination der Disziplinen Mechanik und Elektronik ist zu entwickeln. Aufgrund der Baugröße sind Verfahren wie das Schrauben nur bedingt einsetzbar. Von den Festigkeitswerten her sind Löt- oder Klebeverbindungen für kleine Abmessungen eine gebräuchliche Technologie. Hier soll daher der Schwerpunkt auf diese in der mechanischen Montage wenig gebräuchlichen Verbindungstechnologien gelegt werden. Die Montage- und Fügeaufgaben für mechatronische Baugruppen sind nahe verwandt mit Technologien der Elektronikproduktion.

¹ MID = Molded Interconnect Devices

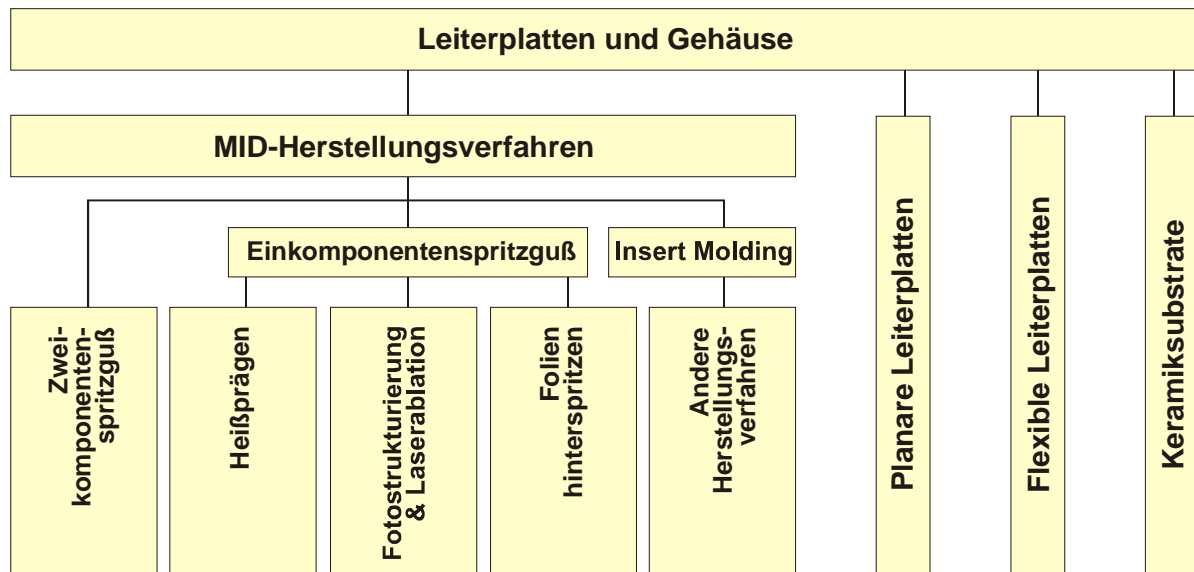


Bild 25: Zur Auswahl stehende Schaltungsträger [55]

Die Miniaturisierung und Steigerung der Funktionalität elektronischer und miniaturisierter Produkte führen nicht nur zu neuen Schaltungsträgertechnologien sondern auch zu einem stetig wachsenden Bauelementespektrum. Neben herkömmlichen planaren Leiterplatten gewinnen starre und flexible dreidimensionale Schaltungsträger aus thermoplastischem Basismaterial immer mehr an Bedeutung [2]. Folien sind besonders gut in dreidimensionale Gehäusestrukturen integrierbar und ermöglichen den Aufbau von räumlichen Multilayer-Schaltungsträgern. Herkömmliche Bestückungssysteme sind aufgrund ihres mechanischen Aufbaus für die aus diesen Trends resultierenden Anforderungen nur unzureichend geeignet, da das Maschinenverhalten hinsichtlich der thermischen und dynamischen Eigenschaften im Dauerbetrieb noch nicht systematisch erforscht und bei der Systementwicklung nur mangelhaft berücksichtigt ist.

3.2.2 Bauelemente und Substrate

Die wachsende Integrationsdichte elektrischer und mechanischer Funktionen in einem Produkt lässt sich nur mit immer feineren Strukturen realisieren. Durch den anhaltenden Miniaturisierungstrend im Bereich der Bauelemente finden elektronische Bauformen mit Rastermaßen kleiner als 300 µm zunehmend Einsatz [10]. Bei den Substraten zeigt sich international ein Trend hin zu einer steigenden Zahl von Produkten mit thermoplastischen Trägermaterialien. Je nach Einsatzzweck werden dabei spritzgegossene Schaltungsträger oder Folien verwendet. Eine weitere Realisierungsmöglichkeit für die Erstellung dreidimensionaler Strukturen bieten flexible Schaltungsträger auf Folienbasis. Folien werden im planaren Zustand mit SMT-Bauelementen bestückt und gelötet und können dann beim Einbau in ein Gehäuse zu einer räumlichen Form gebogen oder gefaltet werden. Den Vorteilen stehen jedoch eine Reihe von technologischen Nachteilen gegenüber, insbesondere hinsichtlich der Handhabung der biegeschlaffen Folien. Die Technologie flexibler Schaltungsträger erfordert somit neue Ansätze für die gesamte Prozesskette, insbesondere jedoch für die Bestück- und Verbindungstechnik [2].

Die Größenunterschiede verschiedener Varianten von zu montierenden Bauteilen können erheblich sein. Ein besonderes Augenmerk liegt auf Multichipmodulen, die hochintegriert aufgebaut sein können. ICs zur Signalauswertung (bzw. mechatronische Systeme) können in solchen Modulen zu einer größeren Einheit montiert werden, wobei die besonderen Merkmale der Aufbau- und Verbindungstechnik berücksichtigt sind. Das Gehäuse benötigt nicht die feine Strukturierung wie das von den Abmaßen her kleine Multichipmodul, wo teurere Herstellungsverfahren zum Einsatz kommen. Diese Kombination spricht für den Einsatz alternativer Schaltungsträger.

3.2.3 Maschinen und Systeme

Die fortschreitende Miniaturisierung der Bauelemente und der Einsatz neuer Schaltungsträgermaterialien führen zur Entwicklung neuer Systemkomponenten für Bestückautomaten und Montagezellen. Zur Sicherung der Montagegenauigkeit werden derzeit Bildverarbeitungssysteme mit einer Auflösung unter 5 μm und Achspositioniersysteme mit einer Auflösung von 1 μm eingesetzt. Trotz der Verwendung dieser hochgenauen Systeme sind mit den marktüblichen Geräten lediglich Genauigkeiten von 50 μm realisierbar. Dies ist auf das Maschinenverhalten hinsichtlich der Schwingungen und der thermischen Verformung des Systems zurückzuführen, das besonders bei räumlichen Anwendungen zu beachten ist. Präzisionsbestücksysteme erreichen mit ihrem aufwendigen mechanischen Aufbau zwar die erforderlichen Fügetoleranzen, weisen aber hinsichtlich der Bestückleistung, der Kostensituation und der Beschränkung auf das Bestücken von rein planaren Baugruppen erhebliche Defizite auf [10][87].

Eine Besonderheit bei der Herstellung miniaturisierter Baugruppen ist die große Vielfalt an zu montierenden Bauteilen. Dies hat auch einen großen Einfluss auf die Produktionssysteme. Es muss gewährleistet sein, dass auf einer Anlage möglichst alle Bauteilvarianten verarbeitet werden können. Der Gewichtsunterschied zwischen dem größten und schwersten Bauteilen im Verhältnis zu den kleinsten und leichtesten kann den Faktor 3.000 erreichen, das Größenverhältnis den Faktor 50. Dies hat zur Folge, dass die Montageanlagen für miniaturisierte Baugruppen wesentlich flexibler und modularer aufgebaut sein müssen als Anlagen in der rein mechanischen Montage. Es muss eine Montageplattform leicht mit anderen Anlagenteilen verkettet werden können, um verschiedene Arbeitsgänge auf angepassten Fertigungsmitteln durchzuführen. Durch diesen modularen Aufbau einer verketteten Produktionsanlage kann die Anlage flexibel umgestaltet und ein neues Produkt schnell eingefahren werden.

Über modulare Greif- bzw. Werkzeugköpfe kann die einheitliche Montageplattform in kurzer Zeit auf andere Fügeverfahren und Bauteile umgebaut werden. Entsprechend flexibel muss die Teilezuführung gestaltet werden. Dies setzt voraus, dass die modularen Greif-/Werkzeugköpfe und Werkstückwechseltische eine eigene Datenhaltung auf einer integrierten elektronischen Baugruppe haben müssen. Alle für die Fertigung relevanten Daten werden „offline“ auf dieser intelligenten Maschinenkomponente gespeichert. Ziel ist es, dass sich die Montageanlage nach dem Umbau auf eine andere Produktvariante selbstständig dem neuen Fertigungsauftrag anpasst, indem auf die gespeicherten Daten zugegriffen wird. Der Bedieneringriff wird minimiert und Fehlermöglichkeiten werden verringert.

3.2.4 Prozesskette für die Produktion mechatronischer Baugruppen

Die Herstellung einer mechatronischen Baugruppe kann in drei Phasen unterteilt werden (Bild 26). Die erste Phase ist das Design des Gehäuses mit der Berücksichtigung der gewünschten elektromechanischen Funktionen. Anders als in der mechanischen Konstruktion benötigt hier der Konstrukteur grundlegendes Know-How in der Formgebung von Spritzgussteilen, spezifischen Eigenschaften der elektrischen und mechanischen Verbindungstechnik sowie der Berücksichtigung der Möglichkeiten der Fertigungsanlagen. Qualifiziertes Personal steht für diese Aufgaben nur begrenzt zur Verfügung.

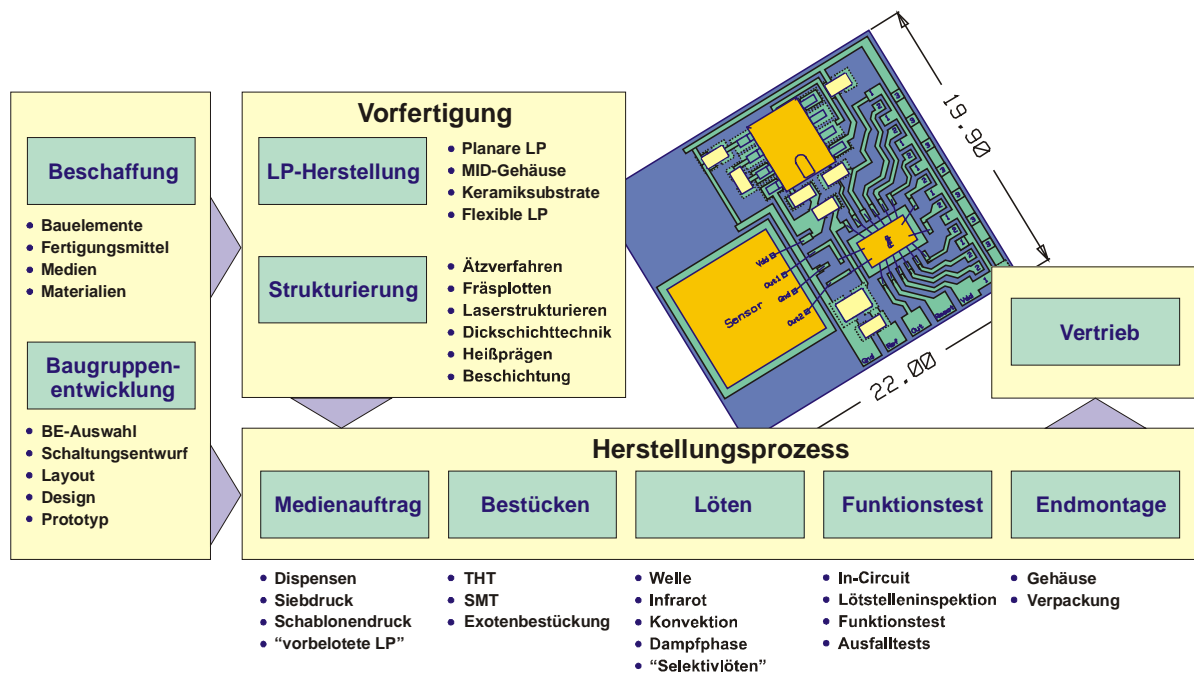


Bild 26: Prozesskette für die Produktion mechatronischer Baugruppen

Die zweite Phase ist die Vorfertigung mit der Herstellung des spritzgegossenen Gehäuses und der Strukturierung der Gehäuseoberfläche mit Leiterbahnen. Hier steht eine Vielzahl von technologischen Möglichkeiten zur Verfügung, die im folgenden Kapitel angesprochen werden.

Die dritte Phase ist der Montageprozess mit Auftrag der Verbindungsmedien, wie Klebstoff oder Lotpaste, des Einlegens der Bauteile und der Befestigung dieser am Gehäuse. Bei elektrischen Kontakten bietet sich das Löten und Drahtbonden an. Lötverfahren, auch wenn sie in erster Linie in der Elektronikproduktion eingesetzt werden, können bei der Herstellung mechatronischer Baugruppen eine wichtige Funktion erfüllen. Die Größe der montierten elektromechanischen Bauteile ermöglicht es, Lot sowohl als mechanisches, wie auch als elektrisches Verbindungsmedium zu verwenden. Zunehmend interessant in diesem Bereich wird die Weiterentwicklung von Leitklebstoffen.

3.3 Maßnahmen zur schnellen Technologieeinführung

Die Reduzierung der Montagezeiten und -kosten sowie die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit über neue Technologien sind die Ziele der Einführung dieser Innovationen. Dabei müssen die Randbedingungen von außen (Werkzeugmaschinen-, Steuerungs- und Elektronikhersteller) berücksichtigt werden. Neben der eigentlichen Anpassung der elektronischen Baugruppe an die Anforderungen in der Werkzeugmaschine ist die Akzeptanz und Bereitschaft der Steuerungs- und Maschinenhersteller von entscheidender Bedeutung, diese Komponente zuzulassen. Weiterhin müssen die firmeninternen Randbedingungen in Betracht gezogen werden. Hier muss vorwiegend überprüft werden, ob die vorhandene Personalstruktur im eigenen Haus hinsichtlich der Kapazität und des Wissens in der Lage ist, die neuen Aufgaben zu erfüllen. Die Beschaffung neuer Fachkräfte ist nur dann sinnvoll, wenn diese für einen längeren Zeitraum mit entsprechenden Aufgaben betraut werden können.

Die Vergangenheit hat deutlich gezeigt, dass neue Produkte und Technologien innerhalb kurzer Zeit Eingang in die Fertigungsanlagen finden, um deren Leistungsfähigkeit zu steigern. Diese schnellen Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionsmittel verdienen besondere Aufmerksamkeit, da mit einer gezielten Unterstützung dieser Wechselwirkungen schnellere Markteinführungen innovativer Produkte möglich sind. Beispielsweise machen dezentrale Steuereinrichtungen oder eine große Anzahl an Sensoren in Fertigungsanlagen eine Anpassung der Steuerungskonzepte im Hinblick auf Überwachung und Inbetriebnahme nötig. Nur eine gesamtheitliche Betrachtung aller Einflüsse bei der Entwicklung neuer Produkte und Produktionsmittel sichert den Erfolg am Markt

Die Problematik im Zusammenhang mit der Fertigung mechatronischer Baugruppen liegt vor allen Dingen im Zusammenspiel der unterschiedlichen Disziplinen

- Mechanische Fertigungstechnologien
- Elektronikfertigung
- Informationsverarbeitung und Softwareentwicklung.

Im heutigen Arbeitsumfeld wird oft jede einzelne Disziplin alleinstehend betrachtet. Dies führt zu erheblichen Schnittstellenproblemen zwischen Arbeitsgruppen und verhindert die Chancen, die in einer konstruktiven Zusammenarbeit liegen. Die zukünftigen Aufgaben erfordern daher Arbeitsstrukturen, die ein interdisziplinäres Arbeiten fördern. Des weiteren mangelt es an Fachkräften, die gleichzeitig in allen drei Disziplinen geschult wurden. Dahingehend ist eine Anpassung von Ausbildung und Lehre durchzuführen, um dem Arbeitsmarkt die erforderliche Anzahl von Arbeitskräften zur Verfügung zu stellen.

Es gibt viele Ansätze in der Forschungslandschaft und teilweise in der Industrie miniaturisierte, mechatronische Baugruppen oder Mikrosysteme herzustellen. Gesicherte und zertifizierte Produktionsverfahren sind aber meist noch in der Entwicklung. Zukünftig müssen Ausgründungen oder Firmengründungen in dieser Richtung gezielt unterstützt werden. Hier bietet sich ein großes Potential für eine neue Dienstleistungsbranche. Da viele Entwicklungen in Instituten und Forschungseinrichtungen durchgeführt werden, müssen neue Plattformen geschaffen werden, die den Technologietransfer verstärken und die stabile Zusammenarbeit von Industrie und Forschung auch über längere Zeiträume ermöglichen.

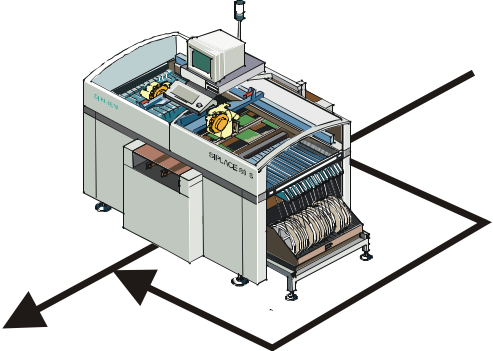
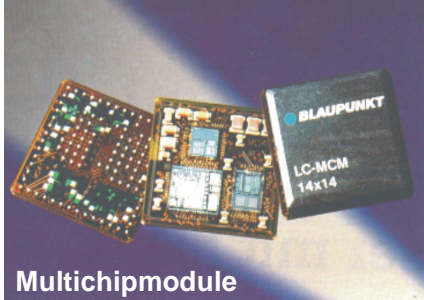
<p>Organisatorische Maßnahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Interdisziplinäres Arbeitsumfeld (Mechanik, Software, Elektronik) ● Wechselwirkungen zwischen Produkten und Produktionsmitteln beschleunigen ● Anpassung von Ausbildung und Lehre ● Neue Plattformen zur engen und interdisziplinären Zusammenarbeit von Industrie und Forschung ● Potenzial für neue Dienstleistungsbranche 	<p>Technologische Maßnahmen</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Kombination von konventionellen und elektronischen Fertigungsverfahren ● Zunahme von Technologien der Mikrostrukturierung ● Handhaben und Fügen von Mikrobauteilen ● Entwicklung von rechnergestützten Entscheidungs- und Entwicklungshilfen für mechatronische Bauteile ● Verwendung innovativer Materialien, Werkstoffen und Technologien
	

Bild 27: Maßnahmen zur Technologieeinführung [88][105]

Auf technologischer Seite werden Kombinationen von konventionellen und elektronischen Fertigungsverfahren zunehmen. Vor allen Dingen werden Verbindungstechniken aus der Mikrofertigung wie das Kleben, Löten oder Drahtbonden für die Produktion miniaturisierter Baugruppen zunehmend interessant. Dies erfordert eine Neuorientierung im Design der Baugruppen und in der Verwendung moderner Materialien. Die Fertigungseinrichtungen sind auf diese Variantenvielfalt und diese Technologien ausulegen. Stichworte sind hier modulare Plattform- und Feederkonzepte sowie modulare Greif-/Werkzeugköpfe. Die Vielfalt der möglichen Fertigungstechnologien wurde bereits bei der Definition von Mikrosystemen angesprochen.

3.4 Entwicklung eines signalverstärkten Vibrationsmessmoduls

3.4.1 Beschreibung der Modulkomponenten

Zur Erfassung der Maschinenvibration wurde ein mechatronisches Messmodul konzipiert, dessen Abmaß klein genug ist, um nahe dem zu beobachtenden Prozess angebracht werden zu können und robust genug, um den Gegebenheiten in einer Werkzeugmaschine standzuhalten. Das Gehäusematerial weist eine hohe Steifigkeit auf, um nicht dämpfend auf die zu messenden Schwingungen zu wirken. Ein Stahlgehäuse scheidet aus, da aus Miniaturisierungsgründen die Leiterbahnen in das Gehäuse integriert werden sollen. Keramikssubstrate für diesen Zweck sind am Markt erhältlich. Die Verstärkung des elektrischen Messsignals soll möglichst nahe dem Sensor erfolgen, damit das Rauschen infolge elektromagnetischer Störungen minimiert wird [111].

- Ziele**
- Prozessnahe Messung der Signale für aussagekräftige Daten
 - Messung der Vibrationen an der Maschinenspindel in Lagernähe
 - Datenanalyse hinsichtlich kritischer Frequenzbereiche
 - Kostengünstige Sensorlösung
- Eigenschaften**
- Das Gehäusematerial muß eine große Steifigkeit aufweisen (Keramiksubstrat)
 - Der IC-Verstärker ist im Gehäuse integriert
 - Das Gehäuse nimmt die Kräfte auf, die durch das Kabel eingebracht werden
 - Die Leiterbahnen sind Bestandteil des Gehäusematerials

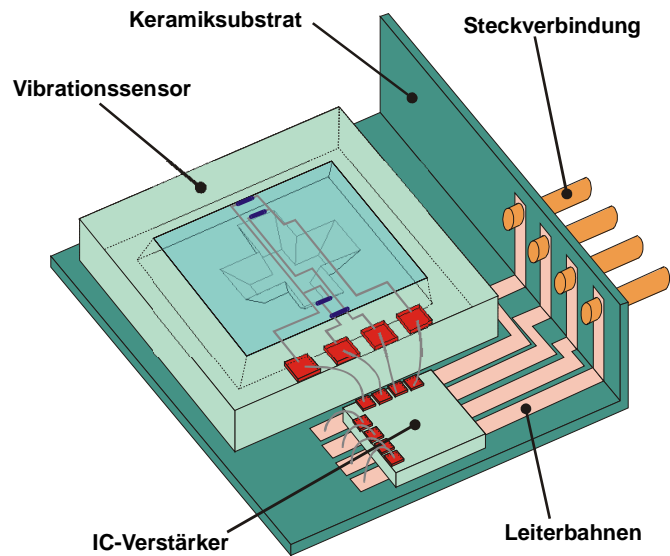


Bild 28: Prinzipieller Aufbau eines Vibrationsmessmoduls auf Halbleiterbasis

Das Vibrationsmessmodul setzt sich im wesentlichen aus dem Vibrationssensor¹ und einem anwendungsspezifischen Integrierten Schaltkreis (ASIC) zusammen, der angepasst an das Ausgangssignal des Vibrationssensors dessen Verstärkung übernimmt². Zusätzliche Bauteile, die zur Bereitstellung und Stabilisierung von Versorgungs- und Referenzspannungen und zur Erzeugung des Systemtaktes erforderlich sind, befinden sich ebenfalls auf der Platine [17].

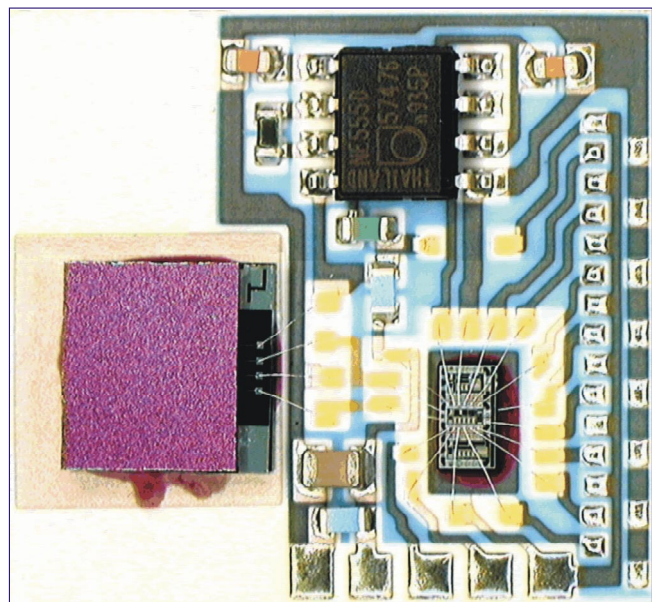
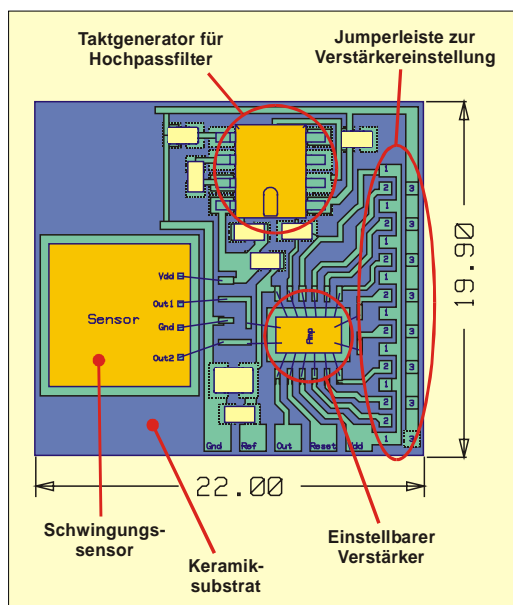


Bild 29: Das Vibrationsmessmodul mit integriertem Verstärker

¹ Fraunhofer Institut für integrierte Schaltungen – Bauelementetechnologie (FhG IIS-B), Erlangen

² Fraunhofer Institut für integrierte Schaltungen – Angewandte Elektronik (FhG IIS-A), Erlangen

In Bild 29 ist der Aufbau des Prototyps dargestellt, wie er bei der Fertigstellung dieser Dissertation vorlag. Es sind der Schwingungssensor und der IC-Verstärker zu erkennen, die beide drahtgebondet sind. Das Bauelement am oberen Rand des Keramiksubstrates ist ein Taktgenerator NE555, der für den Hochpassfilter des Verstärkers benötigt wird. In dieser Entwicklungsphase wurde besonders auf eine größtmögliche Flexibilität für die Testphase geachtet. Die Padleiste auf der rechten Seite ermöglicht die Einstellung der Verstärkung auf 8 Bit Genauigkeit, der externe Taktgenerator eröffnet Spielraum in der Wahl der Grenzfrequenz. Nach einer Redesignphase des IC-Verstärkers kann auf die Padleiste und den externen Taktgenerator verzichtet werden, was die Abmessungen des Moduls erheblich verkleinert.

3.4.2 Spezifikation des Vibrationssensors in Mikrosystemtechnik

Nur wenige kommerziell verfügbare Beschleunigungsaufnehmer sind für den Bereich großer Beschleunigungsamplituden bei gleichzeitig hoher Dynamik geeignet; dies gilt insbesondere für miniaturisierte Sensoren. Vorhandene mikrotechnische Sensoren für den Messbereich bis zu 10 kHz [95][124] verfügen über eine zu geringe Empfindlichkeit. Diese Gründe führten zu der Entwicklung eines speziell an die genannten Anforderungen angepassten Sensors. Aufgrund sowohl der notwendigen Miniaturisierung als auch der hervorragenden mechanischen Eigenschaften von Silizium [98] wurde die Siliziumtechnologie zur Herstellung des Vibrationssensors gewählt.

Speziell für die Entwicklung des Vibrationssensors galten folgende Vorgaben [99]:

- Beschleunigungsspitzen bis zu 4.000 g können bei der Bearbeitung poröser Werkstoffe auftreten, daher ist eine Messung im Bereich hoher Beschleunigungen erforderlich
- Die Messung soll wegen der limitierenden Datenübertragung einen Frequenzbereich von 0 bis ca. 10 kHz abdecken; signifikante Informationen über den Werkzeugzustand konnten z. B. bei der Frequenz von 4,2 kHz beobachtet werden
- Der Schneidprozess verursacht eine Erwärmung des Werkzeughalters. Am Ort der Anbringung der Sensoren, kann sich die Temperatur auf bis zu 80 °C erhöhen

Bei hohen Beschleunigungsamplituden und hoher geforderter Bandbreite ist das piezoresistive Prinzip zur Erfassung von Vibrationen dem kapazitiven oder piezoelektrischen vorzuziehen [118]. Die bei diesem Prinzip auftretende Empfindlichkeit gegen Temperatureinflüsse lässt sich durch eine elektrische Isolation des piezoresistiven Elements vom Substrat herabsetzen. Diese Maßnahme vermeidet die temperaturabhängigen pn-Übergänge, die bei der Verwendung monokristalliner Widerstände durch den Herstellungsprozess, Ionenimplantation oder Diffusion, verursacht werden. Als vom Substrat isoliertes piezoresistives Material steht mit polykristallinem Silizium zugleich ein Standardmaterial der Halbleitertechnologie zur Verfügung. Die Anwendung polykristalliner Piezowiderstände erlaubt einen Arbeitstemperaturbereich bis 200 °C [36].

Von den Basisgeometrien für Vibrationssensoren - Balken, Brücke und Membran – eignet sich die Membran am Besten, da sie die höchste Resonanzfrequenz pro Sensorgrundfläche erreicht. Das Bild 30 zeigt schematisch den Aufbau des Vibrations-

sensors. Eine auftretende Vibration lenkt eine dünne Siliziummembran aus. Die dünne Membran entsteht durch anisotropes Ätzen aus dem Siliziumfestkörper bis auf eine geringe Restdicke.

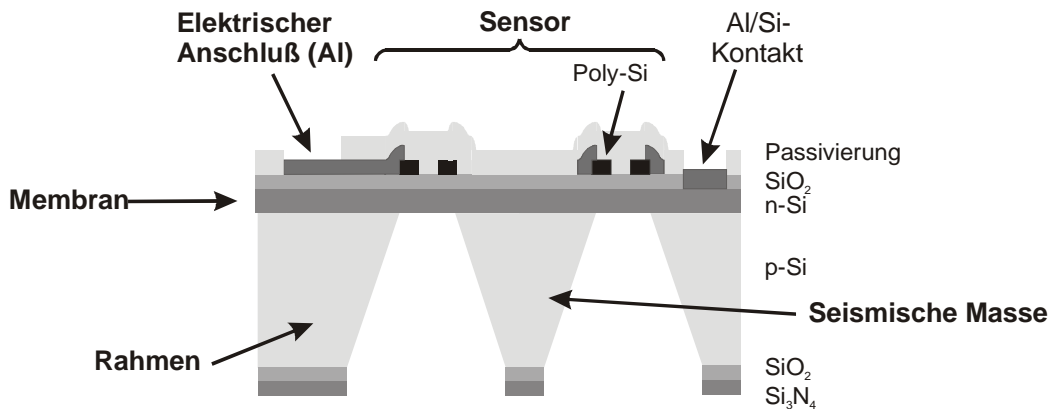


Bild 30: Schematischer Querschnitt durch den Vibrationssensor [127]

Problematisch bei der Herstellung des Sensors ist die gezielte Einstellung der Membrandicke. Oxid- und Nitridschichten bilden die Ätzmaske für die rückseitigen Bearbeitung. Eine eventuell vorhandene seismische Masse verstärkt den Dehnungsverlauf und erhöht so die Empfindlichkeit. An den Orten hoher Dehnung sind polykristalline Piezowiderstände angebracht, die ihren Wert unter Deformation ändern. Eine Metallisierung mit Aluminium verschaltet die einzelnen Widerstände zu einer Wheatstoneschen Brücke. Das Aluminium stellt auch die elektrischen Kontakte bereit.

Für die Auslenkung $z(t)$ eines Sensors nach infolge einer Vibration $a_z(t)$ gilt die allgemeine Beschreibung [100]

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = ma(t) \quad (1)$$

mit m , c und k die verteilte Masse, Dämpfungs- und Federkonstante der vibrations-sensitiven Struktur, bestehend aus Membran und seismischer Masse. Die Eigenfrequenz der Struktur folgt nach einer Laplacetransformation und Normierung

$$H(j\omega) = \frac{Z(j\omega)}{A(j\omega)} = \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + j2D\omega_0\omega} \quad (2)$$

aus

$$\omega_0 = 2\pi \cdot f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

Für eine einfache Membran der Kantenlänge a und Dicke d und den Materialparametern Elastizitätsmodul E und Poissonzahl ν gilt für die erste Resonanzfrequenz [13]

$$f = \frac{35,99}{2\pi} \cdot \frac{d}{a^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{12\rho \cdot (1-\nu^2)}} \quad (4)$$

Die Empfindlichkeit der mechanischen Sensorstruktur folgt aus der Betrachtung der maximalen Auslenkung in Gleichung (2) und beträgt:

$$S = \frac{m}{k} \quad (5)$$

Eingesetzt in Gleichung (3) ergibt dies, dass sich die Empfindlichkeit invers proportional zum Quadrat der Resonanzfrequenz verhält. Diesen Sachverhalt hält Gleichung (6) fest, modifiziert durch die Einführung eines Effizienzparameters β [14],

$$S = \frac{\beta \cdot m}{k} = \frac{\beta \cdot 4\pi^2}{f_0^2} \quad (6)$$

Die Effizienz ist von geometrischen und technologischen Parametern abhängig, die die mikromechanische Gestaltung des Feder-Masse-Systems und des mechanisch-elektrischen Wandlers beeinflussen. Neben der Abhängigkeit von der Auslenkung setzt sich die Empfindlichkeit eines piezoresistiven Sensors aus der resultierenden Dehnung ε der Piezowiderstände und der folgenden Änderung des Widerstands- bzw. der Ausgangsspannung U_0 zusammen:

$$S = S_{\text{mech}} \cdot S_{\text{el}} = \left(\frac{\partial z}{\partial a_z} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \cdot \frac{\partial U_0}{\partial \varepsilon} \quad (7)$$

Der Einsatz eines speziell an die Aufgaben der Werkzeugzustandsüberwachung angepassten piezoresistiven Vibrationssensors mit dünner Siliziummembran und polykristallinen Piezowiderständen lieferte im Probelauf positive Ergebnisse. Aufbauend auf diese stellt der Vibrationssensor für die Spindelüberwachung eine bezüglich des Sensorentwurfs und -aufbaus angepasste Weiterentwicklung dar. Die Schwingungsamplituden sind weniger stark ausgeprägt als beispielsweise bei einem Werkzeugbruch. Die Eigenfrequenzen einer Maschinenspindel bewegen sich im niedrigen Frequenzbereich. Ferner ist eine Erwärmung in der Umgebung des Sensors geringer.

Infolgedessen kann die Empfindlichkeit des Vibrationssensors erhöht werden. Zwei Möglichkeiten stehen hierzu zur Verfügung [100]:

Eine Änderung der Sensorgeometrie ändert die Kennwerte Empfindlichkeit, Resonanzfrequenz und Messbereich des Vibrationssensors. Dabei können die Empfindlichkeit S und die Resonanzfrequenz f_0 nicht unabhängig voneinander eingestellt werden:

$$S = \frac{\beta \cdot 4\pi^2}{f_0^2} \quad (8)$$

β ist ein Effizienzparameter, der von der Sensorgeometrie und –technologie abhängt. Die Verringerung der Dicke der vibrationsempfindlichen Sensorkomponente, hier der dünngeätzten Siliziummembran erhöht die Empfindlichkeit.

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Empfindlichkeit liegt in der Wahl eines piezoresistiven Materials mit höherem Piezokoeffizienten:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (9)$$

mit ε Dehnung der Membran im Bereich des Piezowiderstands R und resultierende Widerstandsänderung ΔR . Die Siliziumtechnologie bietet neben dem polykristallinen Silizium auch monokristallines Silizium als piezoresistives Material an. Bei höherem Temperaturkoeffizienten liegt der Piezoeffizient um einen Faktor von 4 über dem von Polysilizium. Die alleinige Veränderung des piezoresistiven Materials hat keinen Einfluss auf die Resonanzfrequenz.

3.4.3 Herstellungssequenz des Vibrationssensors

Bild 31 zeigt schematisch den Aufbau des Vibrationssensors und gewährt einen Überblick über den technologischen Prozess zu seiner Herstellung. Aufbauend auf dem Grundmaterial von löcherleitendem p-Silizium wird durch Ionenimplantation und anschließende Eindiffusion ein tiefer pn-Übergang erzeugt. Dieser gibt die spätere Membrandicke vor. Nach mehreren Maskierungsschritten auf der Scheibenvorder- und -rückseite werden die Piezowiderstände durch Ionenimplantation und Ausheilen eingebracht. Eine Metallisierung verbindet die Piezowiderstände zu einer Wheatstoneschen Brücke. Eine Passivierung schützt die elektrisch aktive Scheibenvorderseite vor Feuchte und Kontamination. Abschließender Prozessschritt ist die dreidimensionale Strukturierung des Siliziums zur Erzeugung der Membran und der seismischen Masse, die durch anisotropes Ätzen mit elektrochemischem Ätzstop am pn-Übergang erfolgt [17].

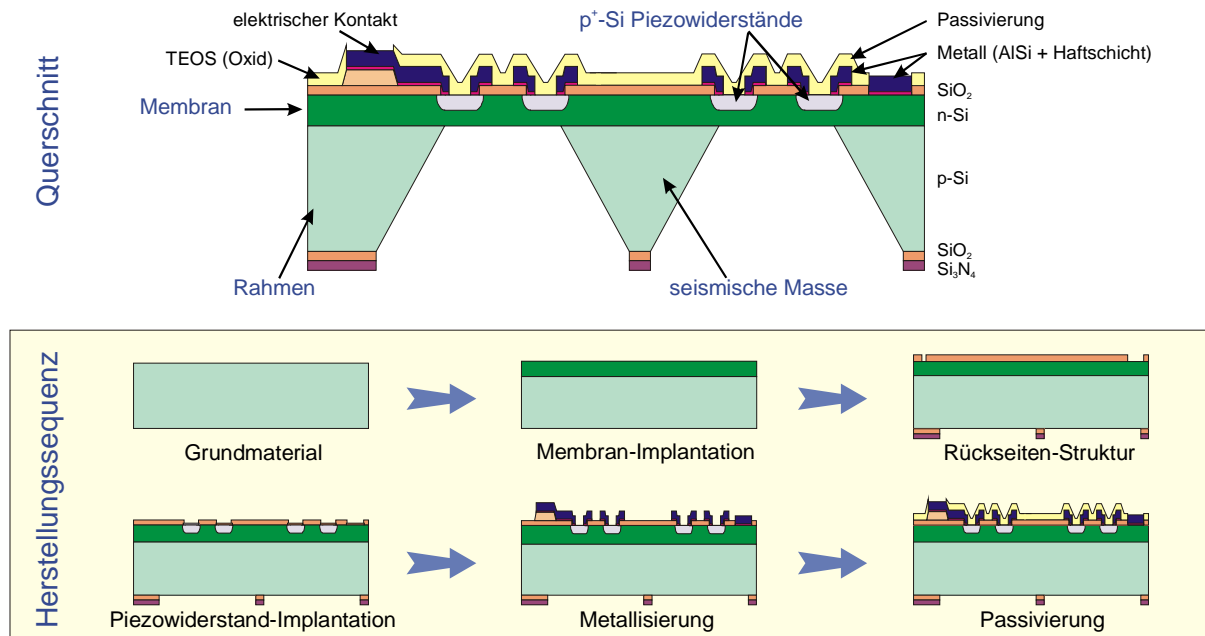


Bild 31: Schematische Darstellung des Querschnitts durch den Sensor und Überblick über dessen Herstellungsprozess in Siliziumtechnologie [17]

Für die Anpassung des Vibrationssensors an die Spindelüberwachung wurden zwei Wege zur Erhöhung der Empfindlichkeit gewählt. Die Membran wurde in verschiedenen Schichtdicken konzipiert und als Material für die Piezowiderstände monokristalli-

nes Silizium gewählt. Zugleich wurden auch Vibrationssensoren mit polykristallinen Piezowiderständen und angepassten Geometrien konzipiert.

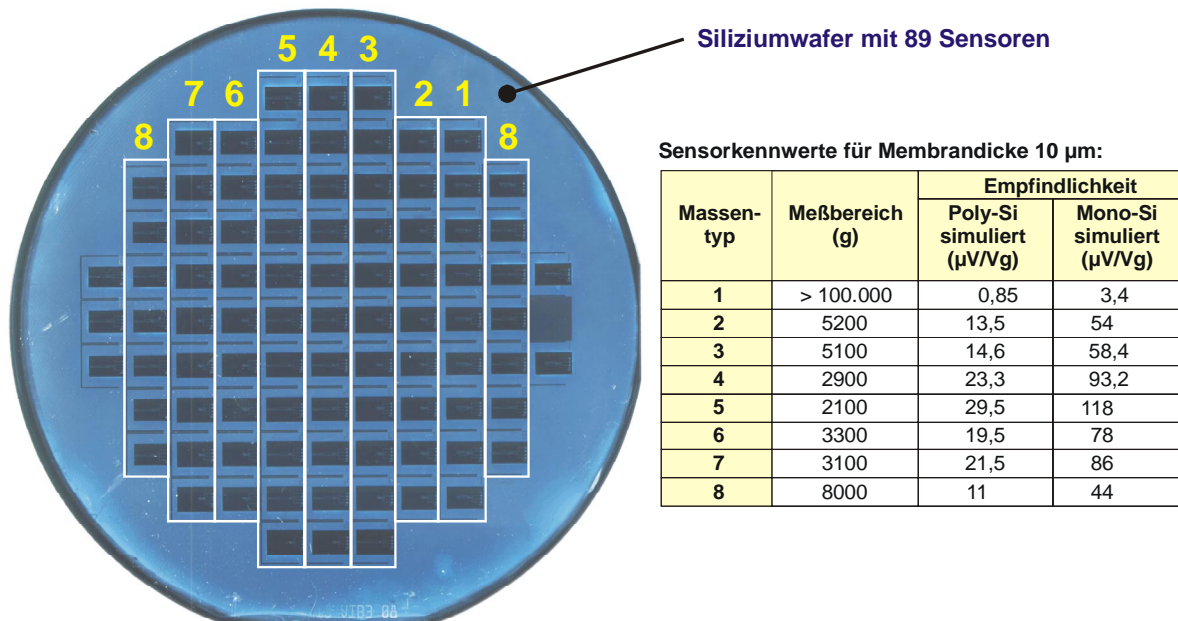


Bild 32: Simulierte Sensorkennwerte bei variierter Geometrie [127]

Der Vibrationssensor ist nach Definition dieser Dissertation ein typisches Mikrosystem. In einem Fertigungsprozess wird eine große Anzahl von Sensoren unterschiedlicher Spezifikation hergestellt. Acht verschiedene Varianten der seismischen Masse in Kreuz- und Rechteckform mit jeweils unterschiedlichen Kennwerten wurden entwickelt. Bild 32 fasst die zu erwartenden Kennwerte Messbereich und Empfindlichkeit von Vibrationssensoren mit poly- bzw. monokristallinen Piezowiderständen und einer Membrandicke von 10 µm zusammen. Die Resonanzfrequenz dieser Sensoren beträgt ca. 14 kHz für ungedämpfte Vibrationssensoren. Diese Auslegung stellt eine genügende Reserve für den Frequenzverlust durch Dämpfungsmaßnahmen zur Verfügung. Der zu erwartende Frequenzbereich von ca. 5 kHz ist mit diesen Sensoren somit abgedeckt. Weitere Membrane wurden mit den Dicken 5 µm und 15 µm hergestellt. Im ersten Fall sinkt die Resonanzfrequenz um ca. 50 %, im zweiten Fall ist ein Anstieg der Resonanzfrequenz auf ca. 150 % zu erwarten.

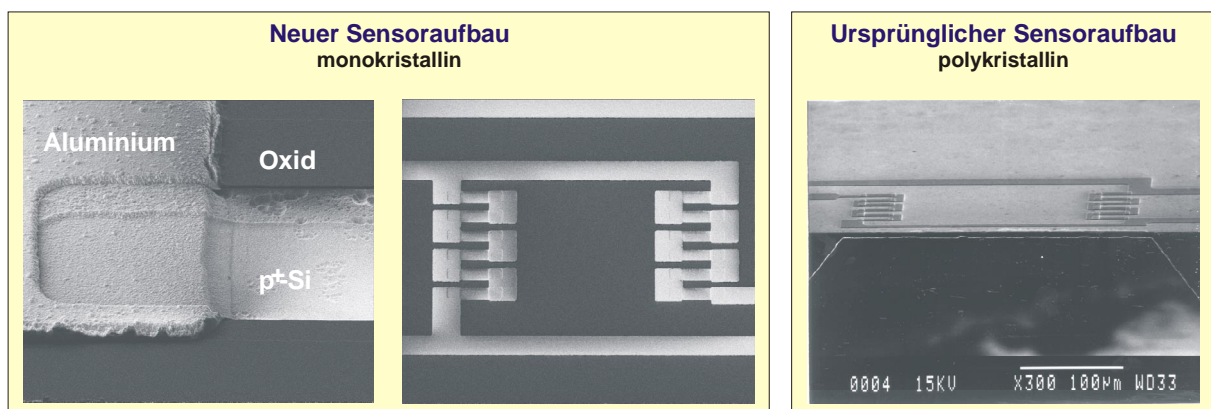


Bild 33: FIB- bzw. REM-Bild von mono- und polykristallinen Piezowiderständen [127]

In Bild 33 sind monokristalline Piezowiderstände mit der verbindenden Aluminiummetallisierung in der Draufsicht gezeigt. Die gute Prozessführung bei der Maskenjustierung ist deutlich erkennbar, ebenso der Höhenverlauf der Metallisierungsschicht über den Kontaktgebieten mit dem implantierten Piezowiderstand. Zum Vergleich ist ein Schnitt durch die Membran eines Sensors mit polykristallinen Piezowiderständen dargestellt.

3.4.4 Aufbau des integrierten Verstärkers

Das Signal der Piezowiderstände wird direkt auf dem Vibrationsmessmodul verstärkt, um das Rauschen so gering wie möglich zu halten. Damit die kleinstmögliche Abmessung erreicht werden kann, wird der Verstärker als Integrierte Schaltung realisiert. In der ersten Verstärkerstufe wird das Signal des Vibrationssensors um den Faktor 10 verstärkt. Ein nachgeschalteter Hochpaßfilter trennt den statischen Anteil (Offset) des Sensorsignales ab, um zu verhindern, dass die nachfolgenden Verstärker den linearen Aussteuerbereich verlassen. Zur Realisierung niedriger Grenzfrequenzen sind relativ große Bauelementwerte erforderlich. Das Filter wurde deshalb in Switched Capacitor Technik aufgebaut. Dies ermöglicht die Erzeugung großer Widerstandswerte mit vergleichsweise kleinen Kondensatoren, die aber ein Taktsignal von 13 kHz erfordern.

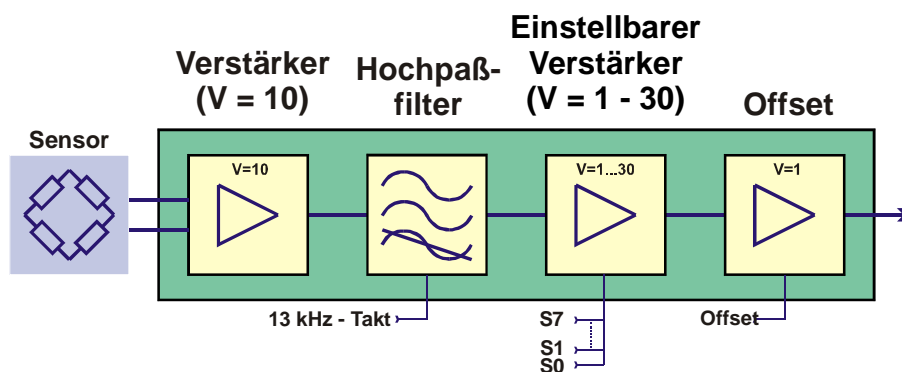


Bild 34: Blockschaltbild des Sensorverstärkers

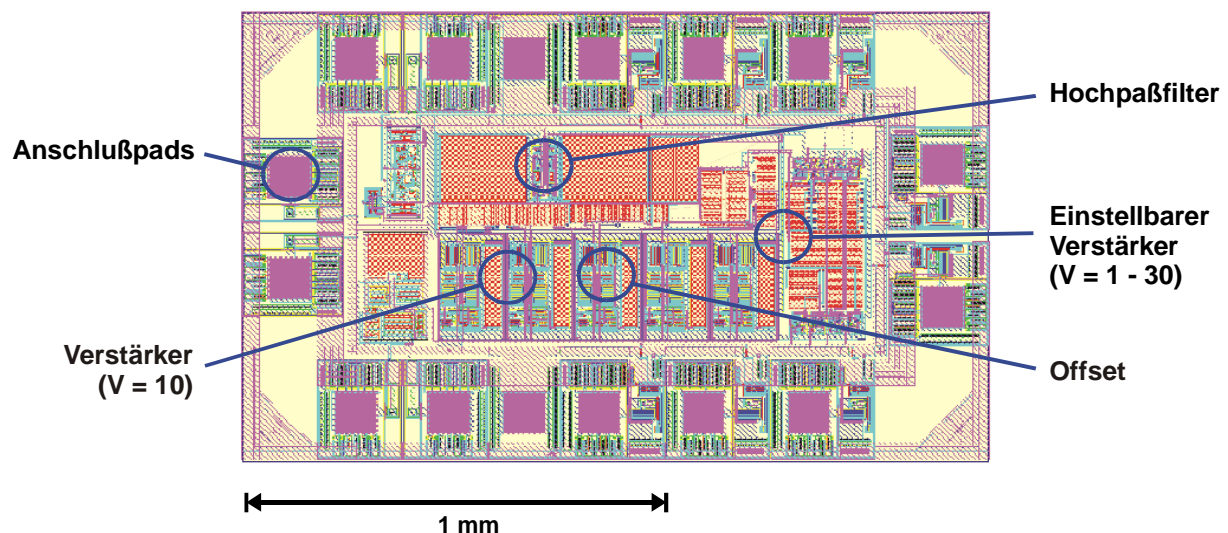


Bild 35: Layout des Sensorverstärkers

Die zweite Verstärkerstufe ermöglicht eine einstellbare Verstärkung, die durch 8 Schalter in linearen Schritten zwischen 1 und 30 variiert werden kann. Die Gesamtverstärkung der Schaltung beträgt somit maximal 300. Die Ausgangsstufe bietet die Möglichkeit, dem verstärkten Sensorsignal für die weitere Signalverarbeitung einen Gleichanteil hinzuzufügen. Im Layout in Bild 35 ist eine große Anzahl von Anschlußpads zu erkennen, die das Schaltungslayout aufwendig gestalten, aber für den Schritt zu einem Produkt nicht mehr benötigt werden, da sie ausschließlich zu Testzwecken dienen.

Neben der kompakten Bauform des Verstärkers liegt der Vorteil im verwendeten Bandpass, der nur die dynamischen Signale verstärkt. Der statische Anteil, beispielsweise eines Sensoroffsets braucht nicht berücksichtigt zu werden, da dieser durch den Tiefpass abgeschnitten wird.

3.4.5 Funktionstest des Sensormoduls

Die Vibrationssensoren wurden herstellungsbegleitend und nach Fertigstellung untersucht. Die Sensoren erreichten eine Empfindlichkeit von über $30 \mu\text{V/Vg}$ und Resonanzfrequenzen bis zu $6,7 \text{ kHz}$. An mehreren aufgebauten Sensoren der Masstypen 3 und 6 wurden Messungen am Vibrationsteststand durchgeführt. Die Ergebnisse stellt Bild 36 dar. Die Sensoren weisen eine hohe Reproduzierbarkeit in ihren Kenngrößen, der Empfindlichkeit und Resonanzfrequenz auf. Die Empfindlichkeit beträgt für die getesteten Sensoren ca. $15 \text{ bis } 30 \mu\text{V/Vg}$; dies stimmt gut mit den Simulationswerten aus Bild 32 überein. Weitere Messungen wurden zur Untersuchung der Linearität der Vibrationssensoren vorgenommen. Bild 36 zeigt die gemessenen Kennlinien. Im untersuchbaren Bereich steigt die Ausgangsspannung der Vibrationssensoren linear mit der anregenden Vibrationsamplitude.

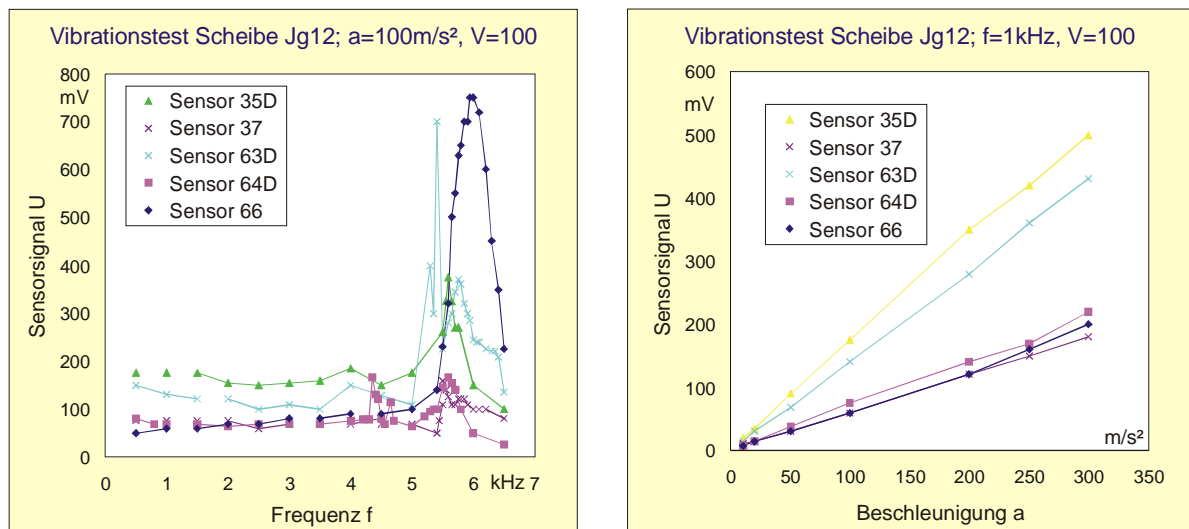
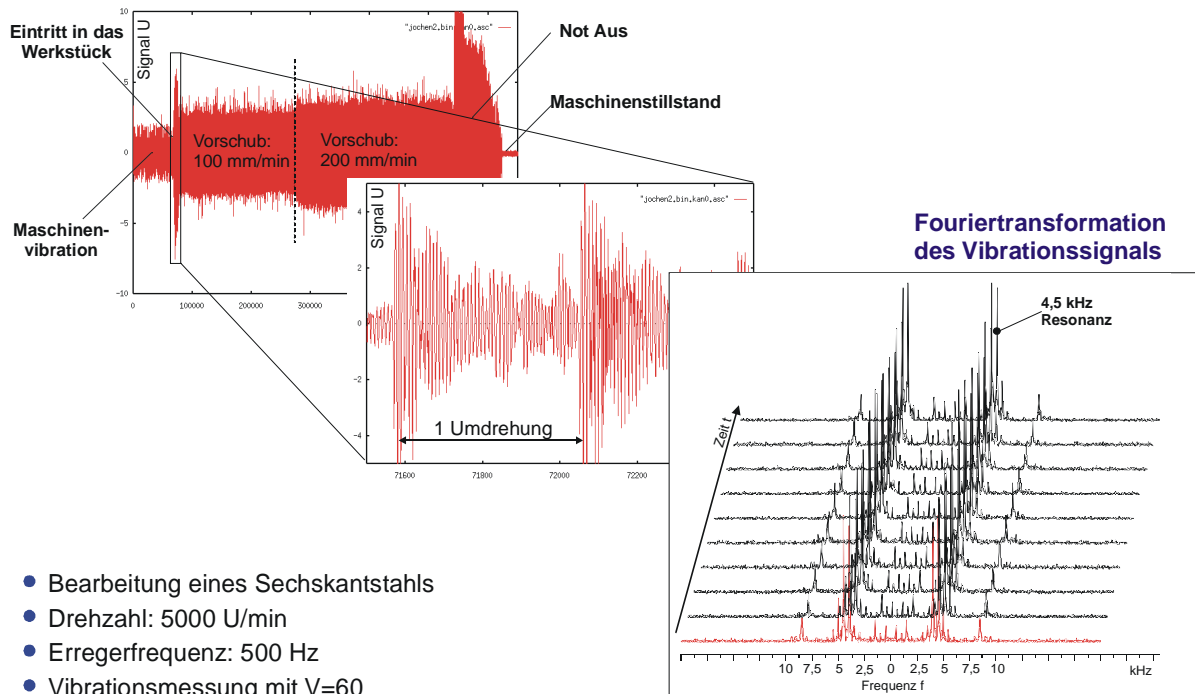


Bild 36: Vibrationstests von Sensoren mit polykristallinen Piezowiderständen [127]

Messungen während des Drehens in einem CNC-Drehzentrum wiesen die Funktionstüchtigkeit für die praktische Bearbeitung nach. Bild 37 zeigt Messsignale des Vibrationssensors während eines Zerspanprozesses im Drehzentrum WEILER DZ 42 CNC. Bearbeitet wurde ein Sechskantstahl, die Drehzahl betrug 5.000 U/min . Das

Teilbild links oben zeigt die Sensorausgangsspannung über den Gesamtverlauf des Schnitts. Die einzelnen Bearbeitungsschritte sind deutlich erkennbar: Vor dem Eintreten der Schneide in das Werkstück erfasst der Sensor die Maschinengrundschwingung.



- Bearbeitung eines Sechskantstahls
- Drehzahl: 5000 U/min
- Erregerfrequenz: 500 Hz
- Vibrationsmessung mit $V=60$

Bild 37: Vibrationsmessungen in einer Werkzeugmaschine [99]

Ein hohes Messsignal tritt beim Eindringen auf, da eine starke Beschleunigung auf den Sensor wirkt. Zunächst wurde mit einem Vorschub von 100 mm/min gespant. Das Messsignal schwingt in einer höheren Amplitude um den Nullpunkt. Mit der Verdoppelung der Vorschubgeschwindigkeit erhöht sich auch das Vibrationssignal. Anschließend wurde die Maschine über Not-Aus gestoppt. Aufgrund der starken Abbremsung erhöhen sich die Vibrationen stark. Die hohen Ausschläge gehen bis zum Stillstand der Maschine zurück. Der Ruhezustand der Maschine macht sich in einem Sensorsignal nahe Null bemerkbar. Das mittlere Teilbild vergrößert das Eintreten der Schneide in das Werkstück. Dargestellt ist eine Umdrehung des Sechskantstahls. Die einzelnen Schnitte durch die sechs Kanten sind deutlich erkennbar. Die Fouriertransformation im Teilbild rechts unten zeigt das Spektrum des Messsignals. Aus dem Spektrum geht hervor, dass die höherfrequenten Schwingungen Vielfache der Anregungsfrequenz von 500 Hz sind.

Bild 38 zeigt das Sensormodul in einem Wafer-Prober. Messnadeln werden direkt mit den Anschlüssen der integrierten Schaltung kontaktiert. Dieses Vorgehen ist nötig um das Verhalten des Verstärkers genau zu charakterisieren. Aus den Ergebnissen der Sensor- und der Verstärkercharakterisierung kann das Ausgangssignal des Sensormoduls genau spezifiziert werden, um einer Ausgangsspannung einen Beschleunigungswert zuweisen zu können.

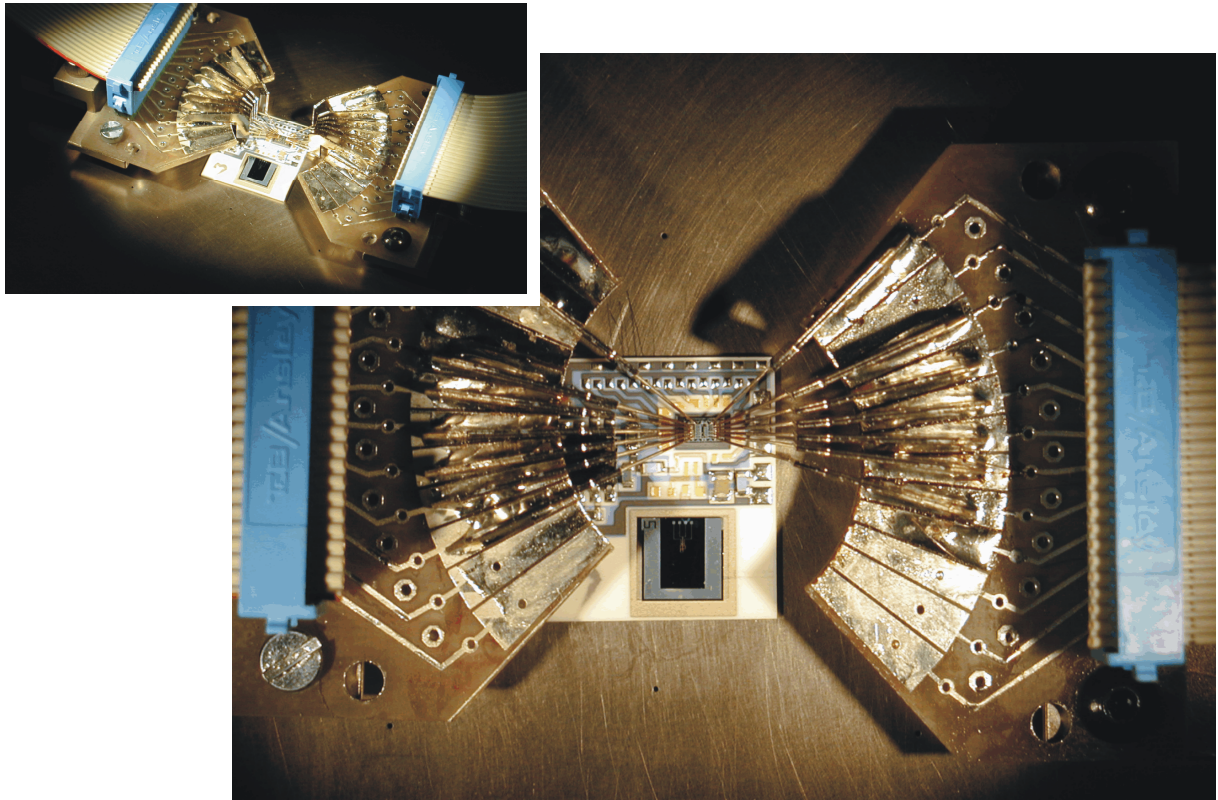


Bild 38: Das Vibrationsmessmodul im Wafer-Prober (Fotos: FhG IIS-A)

4 Analyse des Problemfelds Prozess- und Maschinenüberwachung

4.1 Ziele der Prozessüberwachung

4.1.1 Abschätzung des wirtschaftlichen Nutzens

Ständig kürzer werdende Innovationszyklen, der verschärfte internationale Wettbewerb und der Wunsch von Kunden nach speziellen technischen Lösungen, die auf ihre Bedürfnisse zugeschnitten sind, verschärfen die Konkurrenzsituation im produzierenden Gewerbe. Der starke Anstieg des Leistungsumfanges technischer Produkte sowie der Trend zu größerer Variantenvielfalt und kürzer werdenden Lieferzeiten unterstützen diese Entwicklung. Im Werkzeugmaschinenbau äußert sich diese Situation in der Form einer erhöhten Flexibilität und Komplexität der Systeme. Da sich dies in den Kosten niederschlägt, entsteht für den Produktionsbetrieb zur Wahrung seiner Wettbewerbsfähigkeit der Zwang Kosten zu senken und zugleich Qualität und Leistungsvermögen der Produkte zu sichern und zu steigern. Dieses Ziel kann aber nur dann erreicht werden, wenn alle Produktionsmittel optimal eingesetzt werden und deren Verfügbarkeit maximiert wird.

Ein Instrumentarium auf diesem Weg stellen Werkzeugüberwachungssysteme dar. Deren Anwendungsgebiet geht heute über die ursprüngliche Werkzeugbruch- und -verschleißerkennung hinaus. Eine Voraussetzung für diese Entwicklung ist die Verwendung der Rechenleistung heutiger Maschinensteuerungen und der Einsatz moderner Mikroelektronik für die Datenerfassung und -übertragung [1].

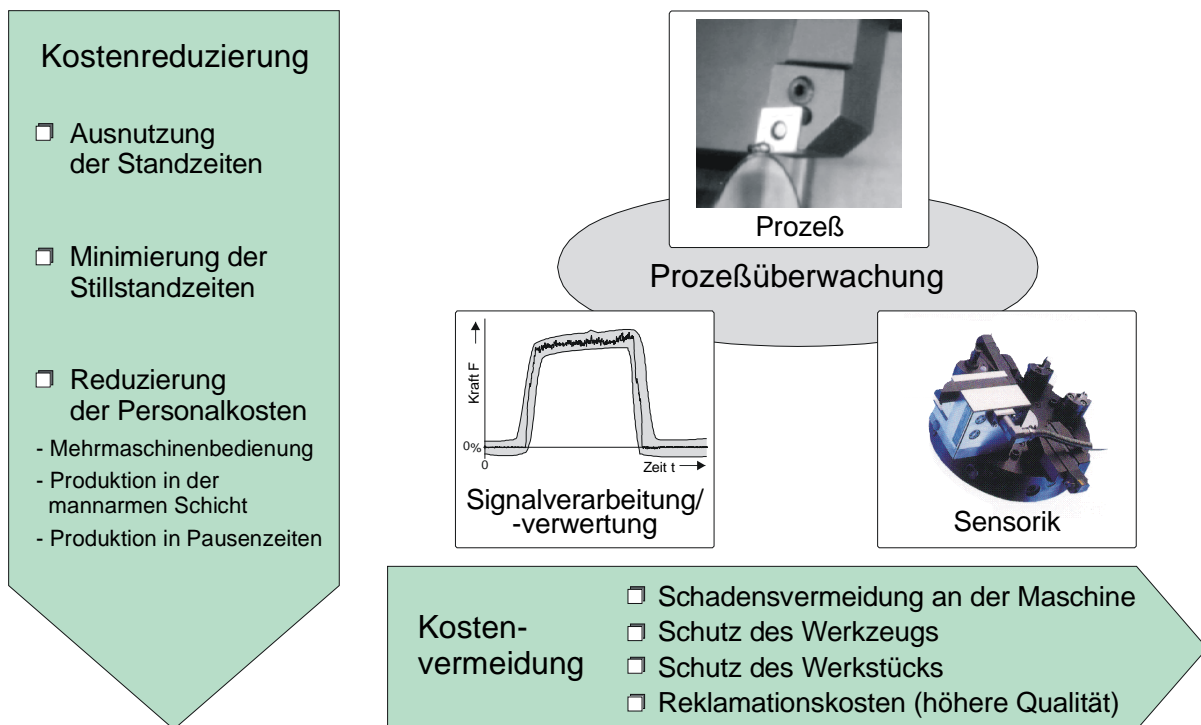


Bild 39: Wirtschaftlicher Nutzen eines Werkzeugüberwachungssystems [54]

Der Grad der Automatisierung von Arbeitsabläufen beim Drehen, Bohren, Schleifen und Fräsen erhöht sich ständig. Bereits weitestgehend automatisiert sind der Werkzeugwechsel, Spannmittelwechsel und die informationstechnische Einbindung. Im Zuge der Kostensenkung zielt die Werkzeugüberwachung in der spanenden Fertigung auf eine Erhöhung des bestehenden Automatisierungsgrades, verbunden mit einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Produktionsanlagen. Gerade in volkswirtschaftlich schwierigen Zeiten spielt eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit der Systeminvestitionen mit Blick auf immer kapitalintensivere Produktionsanlagen eine große Rolle.

Mit Hilfe der Werkzeugüberwachung können Werkzeugverschleiß und -bruch sowie Kollisionen zwischen Werkzeug, Werkstück oder Maschinenbauteilen, die zu Beschädigungen derselben führen können, rechtzeitig erkannt und größere Folgeschäden vermieden werden. Das Ergebnis liegt in minimierten Neben- und Stillstandszeiten der Werkzeugmaschinen zur Schadensbehebung und führt somit zu längeren Maschinenlaufzeiten. Denkbar sind mannarme Fertigungen durch Parallelbedienung mehrerer Werkzeugmaschinen, das Durcharbeiten von Pausen und eine mannlose Fertigung in dritter Schicht (Bild 39). Ein weiterer immer wichtiger werdender Aspekt der Werkzeugüberwachung liegt in der Sicherung der Bearbeitungsqualität, wodurch Reklamationskosten gesenkt werden können. Aufmaßschwankungen führen nicht selten zu teuer produzierter Ausschussware bzw. zu Reklamationen von Seiten der Kunden. Nicht vernachlässigt werden darf der gesundheitliche Schutz des Maschinenbedieners, der schwer in materielle Größen umgesetzt werden kann. Insgesamt führt eine Überwachung und Diagnose zu mehr Sicherheit, höherer Zuverlässigkeit, gleichmäßigerer Qualität und letzten Endes zur Prozessbeherrschung und -optimierung.

Die für den Systemanwender entscheidende Frage liegt im Leistungsvermögen heutiger Werkzeugüberwachungssysteme. Neben das Problem der Verwendung eines geeigneten Sensors tritt die Wahl der Auswertestrategie, um aus der Vielzahl ähnlicher Ereignisse diejenigen zur Auswertung heranzuziehen, die für die entsprechende Überwachungsaufgabe maßgeblich sind (z.B. Unterscheidung zwischen unterbrochenem Schnitt und Werkzeugbruch). Die Zuverlässigkeit der Alarmmeldung spielt für die Akzeptanz der Überwachung eine große Rolle. Um diese zu erhöhen sind in den letzten Jahren die Systeme bezüglich Sensortechnologie und Überwachungsstrategie stetig verbessert worden [49]. Hinzu kommen neue leistungsfähige Visualisierungssysteme, die für den Systemanwender neue verbesserte Möglichkeiten mit sich bringen und über die reine Werkzeugbruch- und Werkzeugverschleißüberwachung hinausgehen [14]. Auf diese Weise soll die Qualität und die Wirtschaftlichkeit des gesamten Fertigungsprozesses durch Werkzeugüberwachungssysteme gewährleistet werden [143].

4.1.2 Technische Gesichtspunkte

In der Großserien- und Massenfertigung werden Werkzeugüberwachungssysteme zur Kollisions- und Brucherkenung schon erfolgreich eingesetzt. Diese benötigen das Anlernen einer Vielzahl von Basisdaten im Rahmen von Teach-In-Programmdurchläufen, auf die während der Überwachung zugegriffen wird. In der Einzel- und Kleinserienfertigung werden diese Systeme aufgrund der flexibleren Fertigung noch nicht häufig eingesetzt. Beispielsweise liegt die Wahrscheinlichkeit

des Auftretens einer Kollision in der Einzel- und Kleinserienfertigung infolge von häufigen Umrüst- und Einrichtoperationen um mehr als die Hälfte höher als in der Großserien- und Massenfertigung [52].

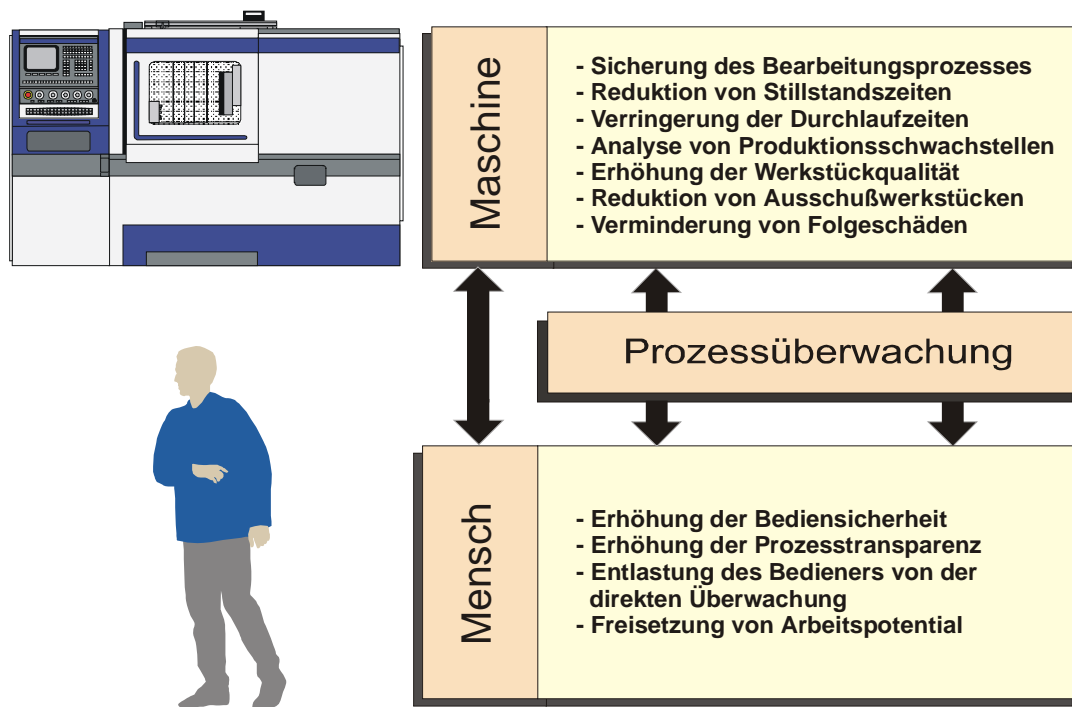


Bild 40: Wirkung der Prozessüberwachung auf Mensch und Maschine [117]

Durch die Einführung eines Überwachungssystems werden Vorteile für den Prozess als auch für den Bediener geschaffen (Bild 40). Mit der Prozessüberwachung werden Maschinenstillstandszeiten reduziert, Werkzeugstandzeiten erhöht und Störungen frühzeitig erkannt, gleichzeitig werden die Durchlaufzeiten verkürzt. Dieses führt zu einer gleichmäßigeren und besseren Qualität der Werkstücke, was sich positiv auf die Kosten auswirkt. Der gesamte Bearbeitungsprozess wird sicherer, eine mögliche Kollision rechtzeitig verhindert und die Konzentration des Bedieners wird entlastet. Es bietet sich die Möglichkeit, einen Bediener für mehrere Bearbeitungsprozesse einzusetzen, womit man die Personalkosten reduzieren kann. Die Ziele der Prozessüberwachung kann den Aufgaben folgendermaßen gegenübergestellt werden [14]:

- | | |
|-----------------------------------|---|
| • Werkzeugbruchüberwachung | 0-Fehler-Produkt
Werkstückschutz
Maschinenschutz |
| • Werkzeugverschleißüberwachung | Einhaltung des Qualitätsstandards
Standzeitoptimierung
Schutz vor Werkzeugbruch durch Überlastung |
| • Überwachung des Prozessverlaufs | Dokumentation von Prozessdaten (ISO 9000)
Schnelle Fehlerdiagnose |
| • Kollisionsüberwachung | Maschinenschutz |

An Hand von Sensorsignalen, deren Auswertung (Vergleich mit Referenzmessungen oder einem Prozessmodell) soll ein Überwachungssystem den Prozess verfolgen,

auftretende Störungen erkennen und entsprechend reagieren. Abhängig von der Störungsursache hat das Überwachungssystem von der Erkennung der Störungsursache bis zur Ausführung der erforderlichen Maßnahmen eine bestimmte Reaktionszeit zur Verfügung (Bild 41).

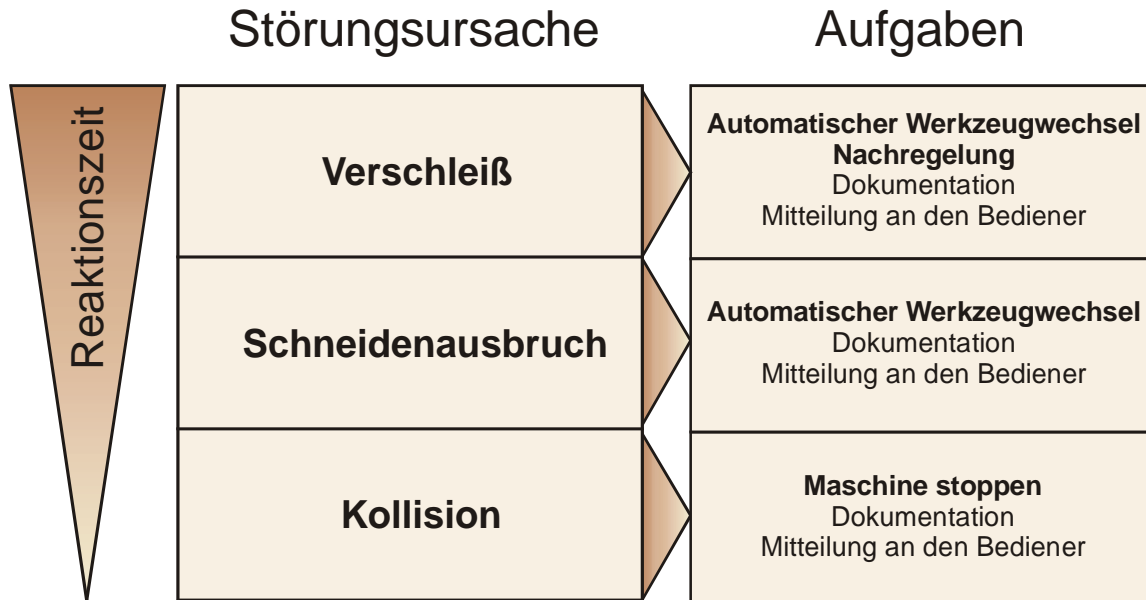
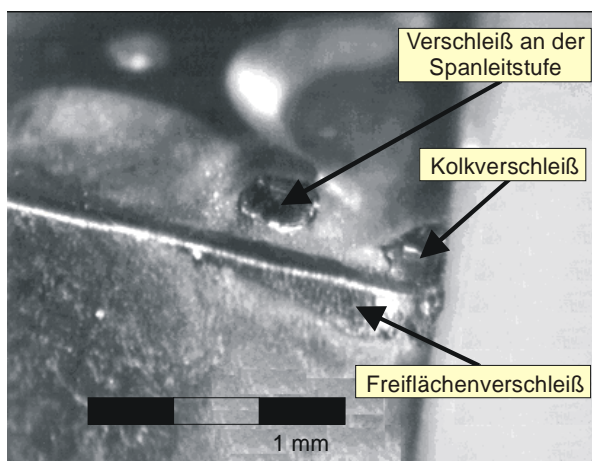
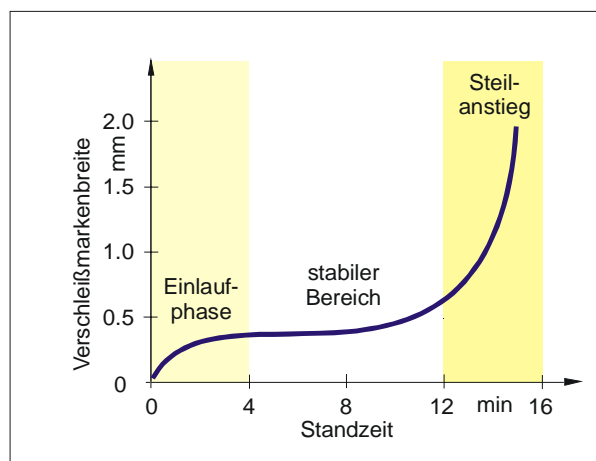


Bild 41: Aufgaben eines Überwachungssystems

Die Standzeit der Wendeschneidplatten ist abhängig von der Schnitttiefe, Schnittgeschwindigkeit, als auch vom Material des Werkstücks und der verwendeten Schneide. Unabhängig von den Prozessparametern und der genutzte Wendeschneidplatte zeichnet sich die Entwicklung der Verschleißmarkenbreite durch drei Bereiche aus (Bild 42). Der erste Bereich, die Einlaufphase ist charakterisiert durch einen schnellen Anstieg der Verschleißmarkenbreite und streckt sich von Beginn der Bearbeitung bis zum Erreichen des stabilen Bereichs.



Verschleißformen an Wendeschneidplatten



Verschleißentwicklung während der Bearbeitung

Bild 42: Verschleißverhalten von Wendeschneidplatten [99]

Als stabiler Bereich wird der bezeichnet, der durch einen niedrigen Zuwachs der Verschleißmarkenbreite in Abhängigkeit von der Zeit aufweist. Dieser Bereich zeichnet sich durch einen nahezu konstanten Verlauf der Verschleißmarkenbreite aus. Das Erreichen der maximalen Werkzeugstandzeit ist durch einen steilen Anstieg zu erkennen [99].

Das Überwachungssystem soll den in Bild 42, rechts beschriebenen steilen Anstieg der Verschleißmarkenbreite erkennen und rechtzeitig einen Werkzeugwechsel ausführen oder den Bediener über den Schneidenzustand informieren. Es ist vom Vergleich des Ist-Zustands mit dem hinterlegten Prozessmodell abhängig, ob ein Werkzeugwechsel oder ein Not-Aus-Stop durchgeführt wird.

Diese Dissertation stellt ein multisensorielles Überwachungssystem vor, das es erlaubt, durch Beurteilung der physikalischen Größen Vibration, Kraft und Temperatur verlässliche Aussagen über den Werkzeugzustand zu treffen. Unter Verwendung der Halbleitertechnologie ist es möglich, kostengünstige Sensorik mit geringem Bauraum, wie den hier vorgestellten Vibrationssensor, auf spezielle Anforderungen hin einzustellen.

4.2 Anforderungen an ein Prozeßüberwachungssystem

4.2.1 Prozessüberwachung für spanende Werkzeugmaschinen

Der Aufbau von Werkzeugüberwachungssystemen besteht aus mehreren Hard- und Softwarekomponenten. Die Bestandteile mit ihren Aufgaben sind in Bild 43 dargestellt. Jeder der Blöcke erfordert eine anwendungsspezifische Lösung. Beispielsweise können Drehmaschinen mit einem schwenkbaren Werkzeugmagazin mit einer verdrahteten Verbindung zwischen der Sensorik auf dem Werkzeug und der Datenauswertung auf der Steuerung in der Praxis nicht betrieben werden.

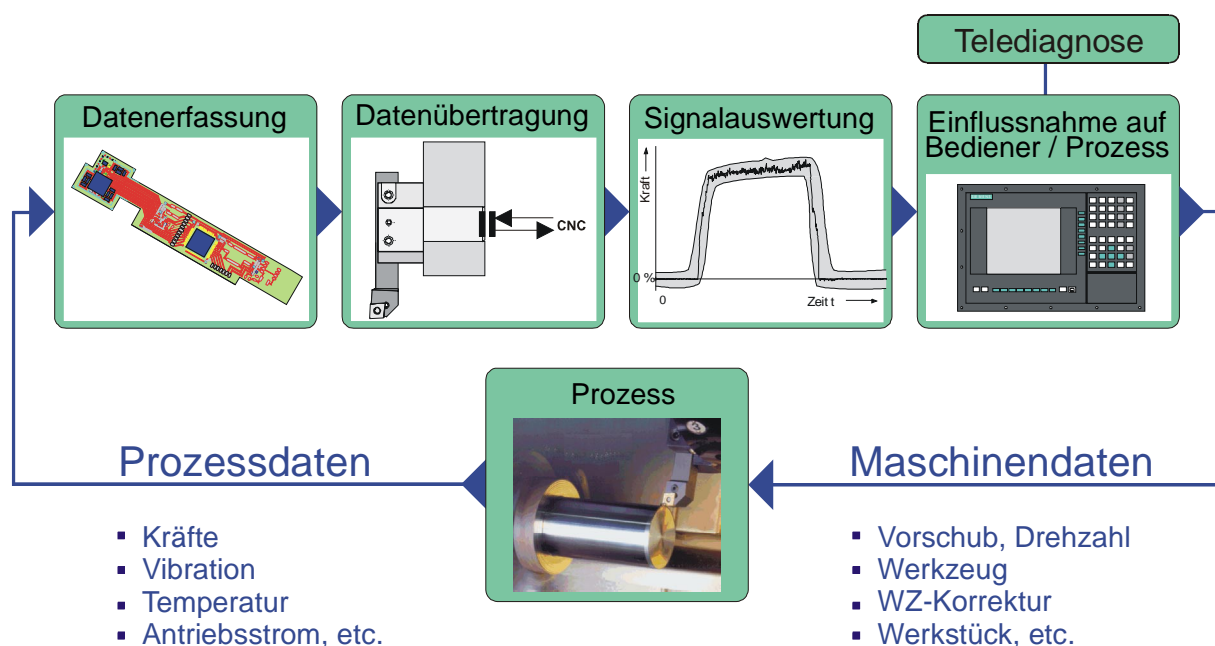


Bild 43: Allgemeiner Aufbau einer Werkzeug- oder Maschinenüberwachung

Folgende Aufzählung beschreibt kurz jeden Teilaufgabenbereich aus Bild 43:

- Sensorik zur Messung verschleißabhängiger physikalischer Größen und deren Umwandlung in proportionale elektrische Größen
- Signalaufbereitung: Signalverstärkung und Eliminierung von Störungen
- Signalauswertung zur Extraktion von Signalkenngrößen oder -merkmalen mit Hilfe von angepassten Verfahren und Algorithmen
- Überwachungsstrategie zur differenzierten Bewertung von Kenngrößen oder Signalmustern entsprechend der Überwachungsaufgabe, Erkennung von Abweichungen und Fehlern, Reaktion durch steuerungs- oder regelungstechnischen Eingriff in den Prozessablauf, Ankopplung an ein Telediagnosesystem

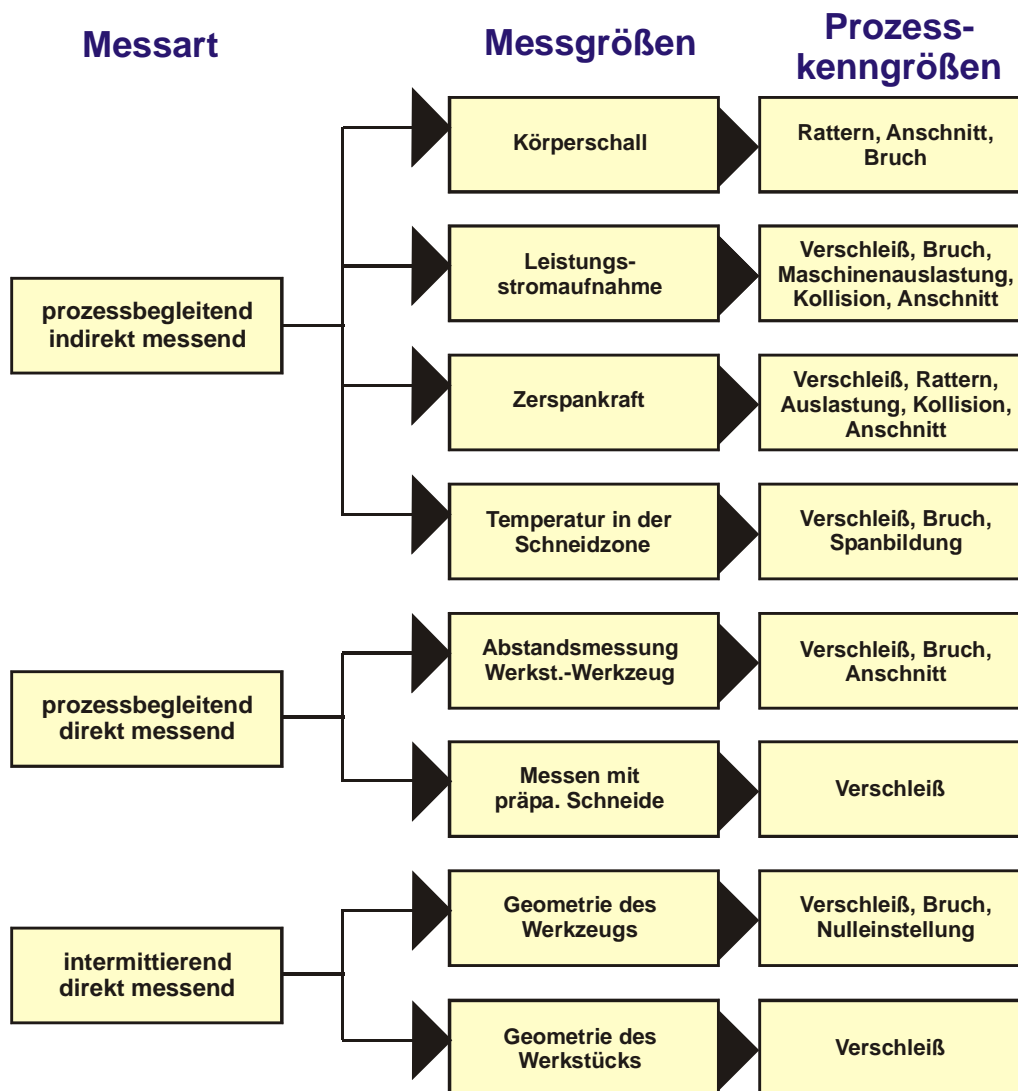


Bild 44: Übersicht möglicher Überwachungsmethoden beim Zerspanen [125]

Bislang sind einige Methoden der Prozessüberwachung im Einsatz. Das Bild 44 zeigt ein Überblick über die erfassbaren Prozessgrößen eines Spanprozesses und die daraus ermittelten Informationen über die Störungsursache. Es ist zu erkennen, dass man über die Überwachung unterschiedlicher Messgrößen gleiche Informationen

über eine Prozesskenngroße erhalten kann. Die Messgrößen sind dabei noch nach ihrer Messart zu unterscheiden. Die größte Aussagekraft über den Prozess erhält man bei paralleler Betrachtung von mehreren Kenngrößen. Erstens ist die Unterteilung in offline und online bzw. intermittierend und prozessbegleitend, zweitens in direkte und indirekte Messarten. Bei der direkten Messart wird die Prozesskenngroße an dem Ort der Entstehung erfasst, beispielsweise die Ermittlung des Werkzeugverschleißes durch Geometriemessung des Werkzeugs. Unter der indirekten Messart versteht man die Ermittlung einer Prozesskenngroße durch die Korrelation der Prozessparameter (Kraft, Schwingung, etc.) und der Prozesskenngroße.

Die Gewährleistung eines störungsfreien Verlaufs von Bearbeitungsprozessen ist das Ziel der Prozessüberwachung. Hierbei spielen die folgenden Aufgaben eine wichtige Rolle [125]:

- Gewährleistung der Sicherheit des Prozesses,
- Vorbeugen von Maschinenschaden,
- Vermeidung von Ausschuss,
- Vermeidung von Stillstandszeiten,
- optimale Nutzung der Ressourcen sowie
- Sicherheit der die Anlage betreibenden Menschen

4.2.2 Randbedingungen einer effektiven Datenerfassung

Im Allgemeinen hat jeder Sensor Vor- und Nachteile in Bezug auf spezielle Überwachungsaufgaben, die für die Auslegung des Überwachungssystems berücksichtigt werden sollten. Im Vergleich verschiedener Überwachungsverfahren zeigt sich, dass sich gute Eignung und hohe Genauigkeit eines Verfahrens im Aufwand und in den Kosten niederschlägt.

Messgröße	Wirkleistung	Zerspankraft	Schallemission	Drehmoment
Sensorprinzip	Hallsensor/ Messumformer	- Piezoquarze, - Dehnmessstreifen, - Kraftmessdübel, - induktive Näherungssensoren, - Kraftmesslager	- AE-Sensor - Körperschallaufnehmer, - Ankopplung über Kühlschmiermittel, - berührungslose Signalübertragung	- Dehnmessstreifen im Werkzeughalter
typische Anwendungsfälle	Überwachung rotierender Werkzeuge	- beim Drehen, - an Mehrspindelautomaten	- Brucherkennung beim Bohren, Fräsen und Reiben, - an Mehrspindelbohrköpfen, - Anfunkerkennung beim Schleifen, - Maschinen-diagnose	- Gewindebearbeitung

Tabelle 2: Sensorprinzipien und Anwendungsfälle

Als Beispiel soll hier die Gegenüberstellung zwischen einer relativ einfachen Standzeitmitführung und einer Körperschallauswertung dienen. Die Körperschallauswertung hat sehr gute Eigenschaften für eine Bruch- und Kollisionserkennung, besitzt jedoch Defizite bei der Verschleißerkennung und in den Kosten, was nicht zuletzt am Mehraufwand für die Messwerterfassung und Signalverarbeitung liegt. Diese ist ungleich größer als bei der Standzeitmitführung. Die Standzeitmitführung besitzt demgegenüber fast nur den Vorteil geringer Kosten.

++ sehr gut + gut 0 mittel - schlecht -- sehr schlecht	direkt (d) / indirektes (i) Verhalten	kontinuierlich (k) / intermittierend (i)	berührend (b) / berührungslos (l)	hauptzeitparallel? ja (j) / nein (n)	Bruch erkennbar?	Kollision erkennbar?	Verschleiß erkennbar?	Kosten bzw. Aufwand
Standzeitmitführung	i	k		j	--	--	0	++
Abtastung Werkzeug	d	i	b/l	n	0	--	--	+
Vermessung Werkstück	i	i	b	n	0	--	0	++
Abstandsmessung	d	k/i	l	j	+	--	0	+
Aufbringen elektischer Widerstandsschicht	i	k	b	j	0	--	++	-
radioaktive Markierung	i	k	l	j	0	--	++	-
Dehnungsmessstreifen	i	k	b	j	++	++	0	+
Sensoren auf Piezoquarzbasis	i	k	b	j	++	+	+	-
Induktive Wegaufnahme	i/d	k	l	j	+	0	+	+
Kraftmesslager	i	k	b	j	+	+	++	0
Motorstromaufnahme	i	k	b	j	+	+	0	+
Drehmomentüberwachung	i	k	b	j	++	++	+	-
Körperschallauswertung	i	k	b	j	++	++	0	-
Optoelektronische Verschleißüberwachung	d	i	l	j	--	--	++	--

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Werkzeugüberwachungsverfahren [13][15][143]

Prozesskraftmessung

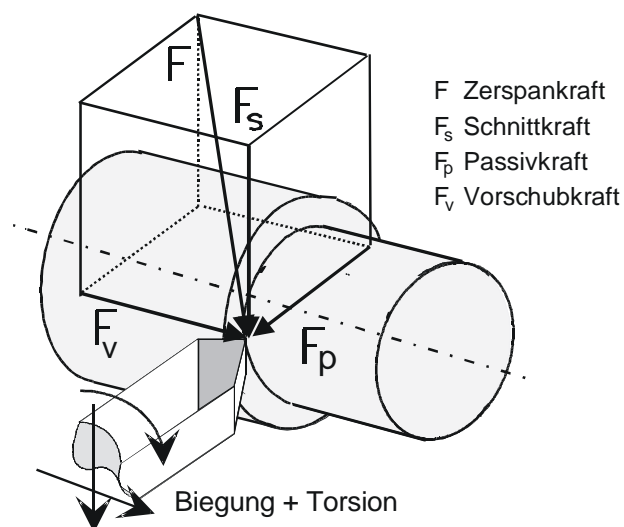
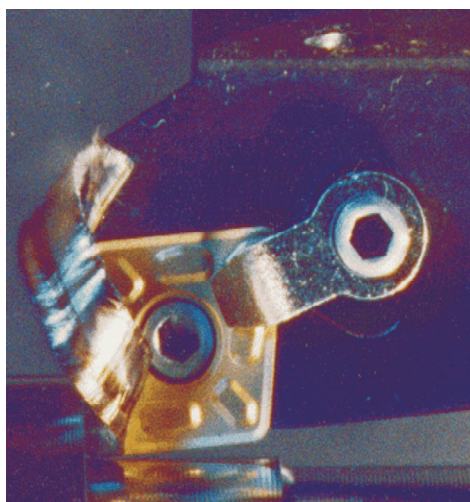
Heutzutage arbeiten die Werkzeugmaschinen mit modernen Technologien, die höhere Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten erlauben. Dadurch ist die Bearbeitung dynamischer, was im schlimmsten Fall bei Störungen einen Schaden an der Werkzeugmaschine oder Verletzungen des Maschinenbenutzer hervorrufen kann. Konventionelle Werkzeugüberwachungssysteme zeichnen sich durch folgende Aspekte aus, die häufig Fehlalarme verursacht haben.

- größere Entfernung des Sensors von der Schneide
- maschinenspezifische Sensorik
- keine Nachregelung
- problematische Ergebnisinterpretation

Für eine Akzeptanz der Werkzeugüberwachungssysteme bei den Maschinenbenutzern und eine Einführung in den Fertigungsprozess sind noch einige Optimierungsschritte notwendig, wie:

- prozessnahe Sensorintegration,
- einfache Anpassung an geänderte Prozessgrößen
- geringes Gewicht,
- geringe Baugröße,
- Draht- und kontaktlose Datenübertragung zur Steuerung,
- Integration in die CNC,
- Automatische Adaption auf neue Prozessgrößen,
- Minimaler Bedieneringriff in das Überwachungssystem

Störungen, die bei Werkzeugmaschinen auftreten, sollen mit Hilfe moderner Überwachungssysteme erkannt und abgefangen werden. Dies wurde erst durch den heutigen Stand der Technik möglich, unter Verwendung von Mikrosensoren, leistungsfähigen Prozessoren als auch offenen PC-basierten Steuerungen der modernen Werkzeugmaschinen.



- Das Werkzeug wird durch Biegung, Torsion und Schwingungen beansprucht
 - Die Spankraft ist von einer großen Anzahl von Parametern abhängig
- Ein Prozesskraftmesssystem soll die Spankraft in Richtung und Größe erfassen

Bild 45: Zerspankraftkomponenten bei der Drehbearbeitung

Um den Drehprozess in einer Drehmaschine überwachen zu können, müssen Intensität und Richtung der auftretenden Kräfte bekannt sein. Die Gesamtkraft beim Drehvorgang wird als Zerspankraft bezeichnet. Sie setzt sich aus den beiden Komponenten Aktiv- und Passivkraft zusammen, wobei die Aktivkraft nochmals in die Schnittkraft und die Vorschubkraft unterteilt wird (Bild 45). Somit bilden die drei Komponenten Schnitt-, Vorschub- und Passivkraft die Zerspankraft. Das Drehwerkzeug wird durch den Zerspanvorgang auf Biegung und Torsion um alle drei Raumachsen beansprucht. Die Größe der Zerspankraft ist abhängig von Werkzeugver-

schleiß und den Bearbeitungsparametern, wobei die Zerspankraft mit höherem Werkzeugverschleiß eine schnelle Steigung aufweist.

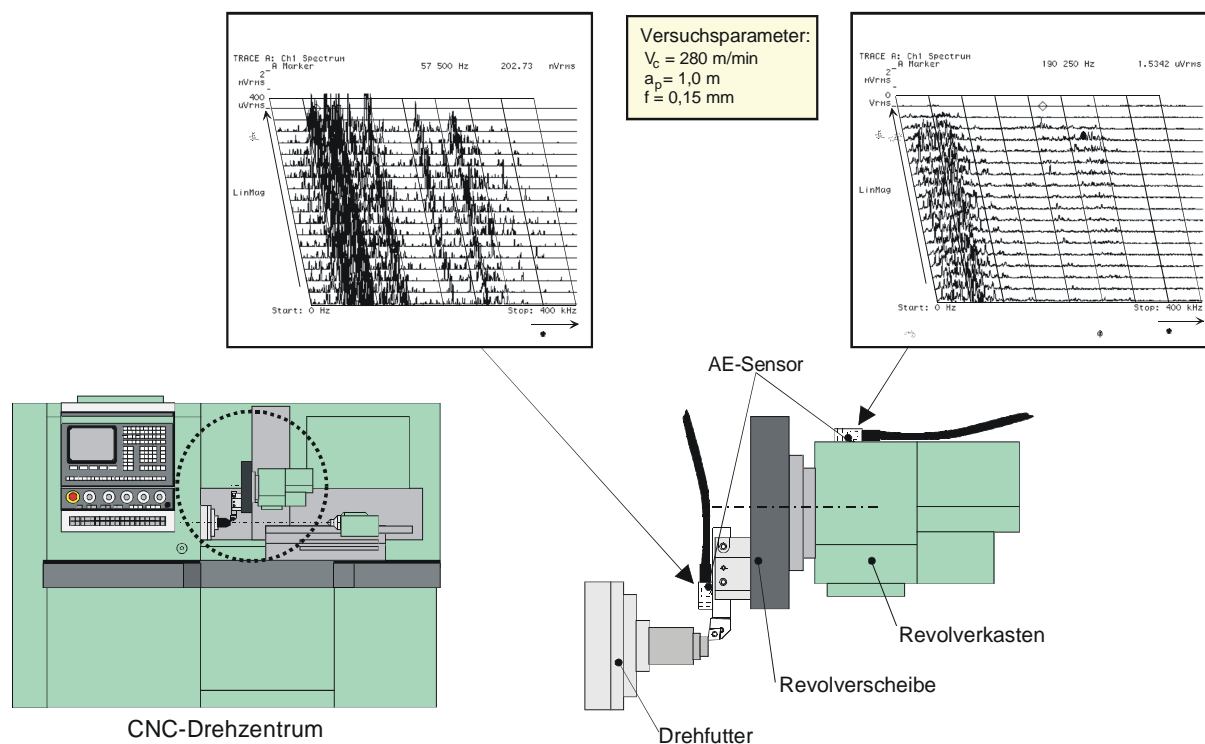


Bild 46: Durchgeführte Maschinenvibrationsmessungen unter Variation des Sensorortes

Für die Prozessüberwachung werden Sensoren benötigt, die gewährleisten, dass die Komponenten der Zerspankraft in den drei Raumachsen aufgenommen werden können. Eigene Untersuchungen haben erwiesen, dass die Signalgüte in der Nähe der Wirkstelle, d. h. in der Nähe der Schneidplatte um ein Vielfaches höher ist als beispielsweise am Revolverkasten [5]. Erst durch die Prozessnähe ist gewährleistet, dass kleine Ereignisse wie ein Schneidkantenausbruch erkannt werden können und Störungen, die nicht prozessbedingt sind, keine Fehlalarme erzeugen (Bild 46). Dies unterstützt die Bedingung, dass idealerweise die Kräfte in den drei Raumachsen zu erfassen sind, um sichere Aussagen über den Prozesszustand treffen zu können.

4.2.3 Methoden für die Signalauswertung

Neben Sensorik und Elektronik benötigt jedes Überwachungssystem eine leistungsfähige und für die jeweilige Überwachungsaufgabe speziell ausgewählte Auswertestrategie. Die Entwicklung und Anwendung geeigneter Auswertestrategien basiert auf dem Wissen über das Verhalten unterschiedlicher Schneidstoffe. Beispielsweise zieht der Bruch von Hartmetallwerkzeugen einen impulsartigen Kraftanstieg nach sich, was aus einer Verklebung von Bruchstücken der Schneide zwischen Werkzeug und Werkstück resultiert. Schneidkeramiken hingegen zerbröseln beim Bruch, so dass es zu keiner Verklebung kommen kann. Das Kraftsignal ist folglich dem einer Schnittunterbrechung ähnlich, d. h. es kommt zu einem Steilabfall der Kraft (Bild 48) [18]. Aus diesem Beispiel ist zu erkennen, dass für unterschiedliche

Versagenscharakteristiken jeweils geeignete Auswertestrategien anzuwenden sind. Im Folgenden werden einige Strategien näher behandelt [126].

Statische Schwellen

Statische Schwellen sind eine relativ einfache Auswertestrategie. In Lernzyklen werden maximale Signalwerte mit arbeitsscharfem Werkzeug ermittelt und zu 100 % gesetzt. Die Festsetzung der Schwellen für Kollision, Bruch, Verschleiß und Leerschnitt werden nach Erfahrungswerten festgesetzt. Problematisch äußern sich hier Unregelmäßigkeiten wie Aufmaß- oder Härteschwankungen, die ab und an zu einer Überschreitung der Schwellwerte und damit zur Fehldiagnose führen. Die Anwendung dieser Auswertestrategie ist daher vor allem für bereits vorbearbeitete Werkstücke, wie Stangenmaterial, Fließpressstücke und zu bohrende Werkstücke zu empfehlen.

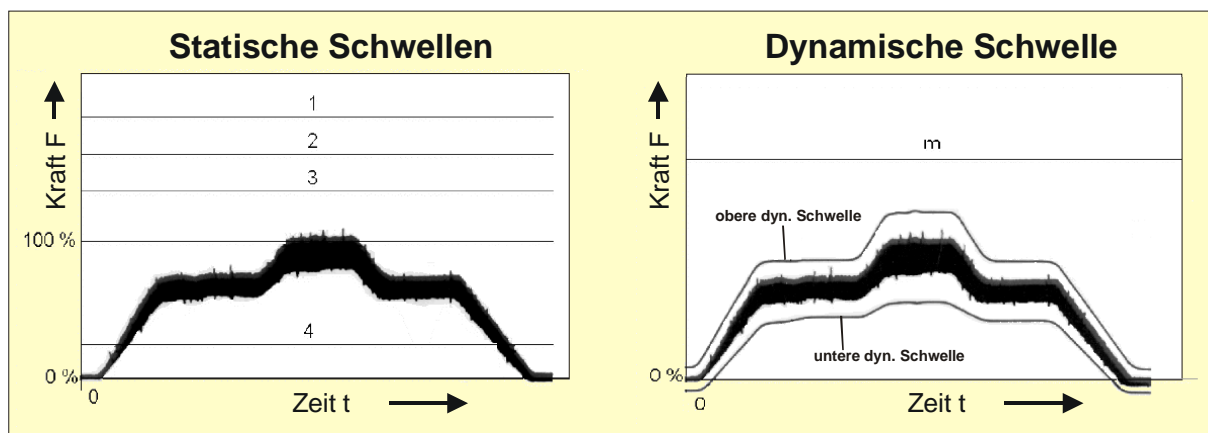


Bild 47: Dynamische und statische Schwellwertüberwachung [57]

Dynamische Schwellen

Bei der dynamischen Schwellwertüberwachung werden die Schwellen ständig synchron zum Signalverlauf errechnet, wodurch eine Anpassung an die aktuelle Signalgröße erreicht wird. Aufmaß- und Härteschwankungen führen hier zu keiner Fehlinterpretation. Werkzeugbruch oder Kollision bewirken eine impulsförmige Signaländerung, so dass die dynamische Schwelle unter- oder überschritten wird. Eine Verschleißerkennung ist mit dynamischen Schwellwerten nicht möglich. Hierzu dient die Vorgabe eines Signalmaximums in Form einer statischen Schwelle.

Mustererkennung

Die Mustererkennung beruht auf der Speicherung einer Anzahl von Referenz-Signalverläufen in der Überwachungseinheit. Musterverläufe existieren für verschiedene Schneidstoffe, Versagensfälle und typische Bearbeitungsfälle. Während der Bearbeitung werden die Musterverläufe ständig mit dem momentanen Signalverlauf verglichen und bei Übereinstimmung mit atypischen Werten wird die entsprechende Fehlermeldung ausgegeben. Eine Lernphase ist für dieses Verfahren nicht notwendig, was bei kleinen Losgrößen von Vorteil ist. Da keine Abhängigkeit von absolut auftretenden Signalgrößen besteht, ist es flexibel einsetzbar.

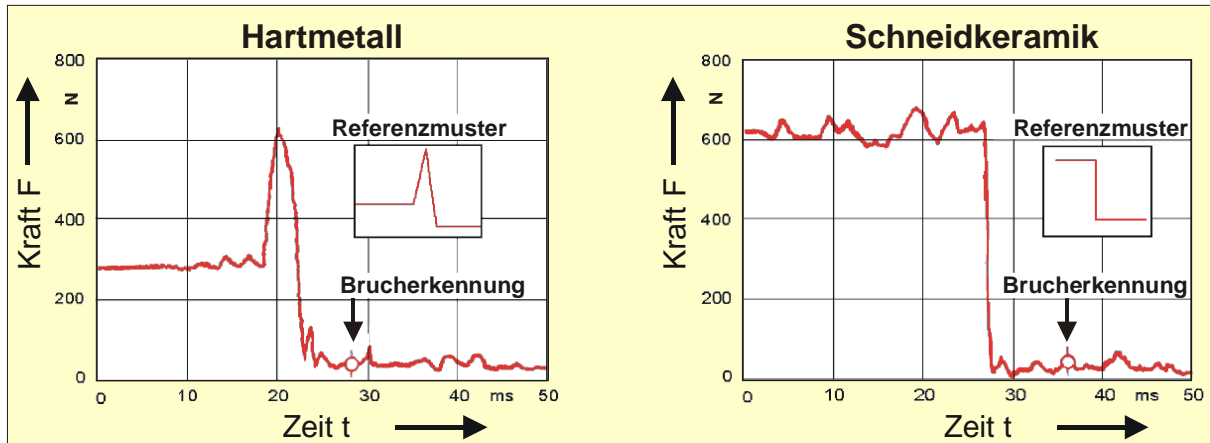
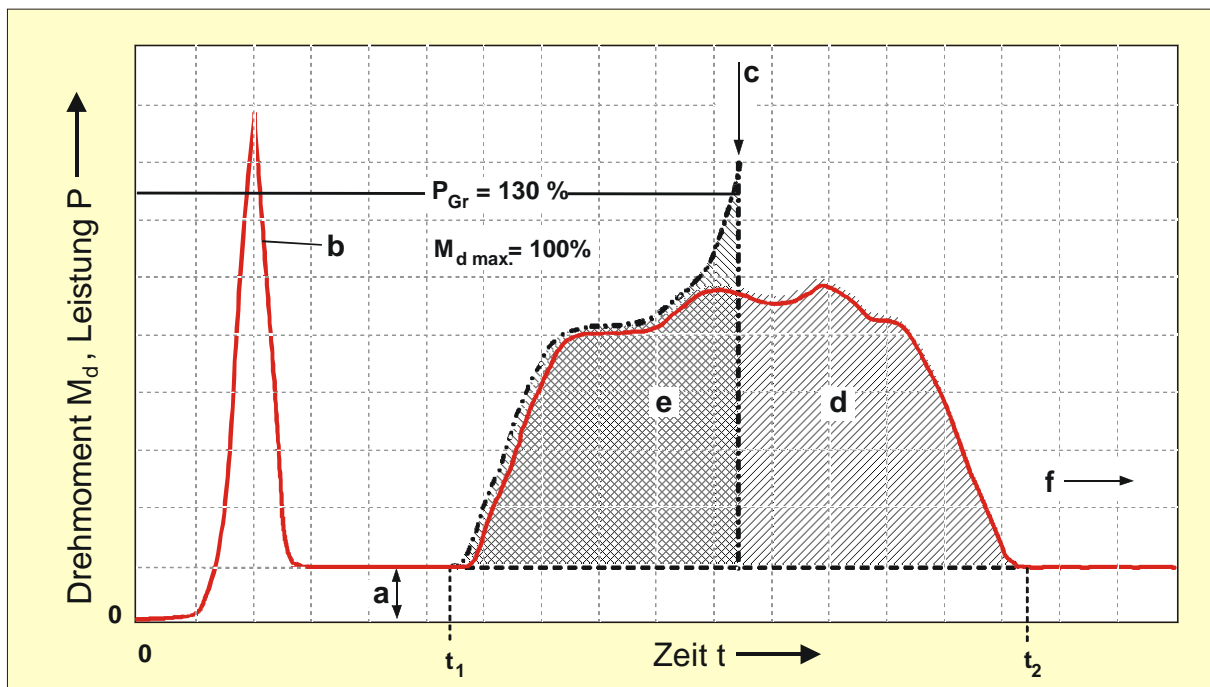


Bild 48: Beispielhafte Signalverläufe und Referenzmuster der Mustererkennung [57]

Messtellenmethode

Die Messtellenmethode ist ein Verfahren zur Verschleißerkennung. Ausgewertet wird der Anstieg der mittleren Signalwerte von Bearbeitungszyklen. Die Berechnung des Signalendwertes basiert auf dem Signalanfangswert und einem Faktor für den zulässigen Anstieg. Vorausgesetzt werden hier reproduzierbare Schnittbedingungen, d.h. Schnittgeschwindigkeit, Spanquerschnitt und Arbeitsdurchmesser müssen gleich sein.

Bildung eines Arbeitsintegrals



- | | |
|--|--|
| (a) Leerlaufleistung | (b) Spindel-Hochlauf |
| (c) Werkzeug-Totalbruch | (d) mit scharfem Werkzeug eingelernte Arbeit (100 %) |
| (e) Arbeit bis zum Werkzeugbruch
(hier 50 %, W _{min} -Grenze 70 %) | (f) Arbeitsminimum-Alarm |
- P_{Gr} Leistungskraft-Grenzwert (130 %) M_{d max} größtes Drehmoment bei der Sollwert-Aufnahme (100 %)

Bild 49: Drehmomentverlauf während eines Bearbeitungsschrittes [57]

Das Integral der von einer Werkzeugschneide geleisteten Arbeit wird hier zur Überwachung herangezogen. Nach Erfahrungswerten werden Grenzen für Arbeitsminimum und Arbeitsmaximum festgelegt. Das Arbeitsmaximum, das aus dem Produkt der Arbeit eines Lerschnitts mit einem arbeitsscharfem Werkzeug und einem Verschleißfaktor ermittelt wird, dient als Verschleißgrenze. Werkzeugbruch wird mit dem Grenzwert Arbeitsminimum erkannt.

Frequenzselektive Messverfahren

Bei diesen Verfahren werden Schwingungen bestimmter Frequenzen im Signalverlauf ausgewertet, wodurch Werkzeugverschleiß, -bruch und Kollision detektiert wird. Zur Auswertung müssen spezifische Signalmuster vorher erlernt werden oder man lernt ein Neuronales Netz an, das später flexibel eingesetzt werden kann. Während der Überwachungsphase werden charakteristische Schallwellen erkannt und so die jeweiligen Ereignisse diagnostiziert.

4.2.4 Beispiele für eine Kollisions-, Bruch- und Verschleißerkennung

Die wesentlichen Aufgaben der Signalverarbeitung eines multisensoriellen Werkzeugüberwachungssystems sind [68]:

- die Erkennung von Kollisionen innerhalb der Maschine in Echtzeit
- die Entdeckung oder Vorhersage von Ausbrüchen an der Schneidkante des Werkzeugs
- eine prozessbegleitende Charakterisierung des aktuellen Verschleißes der Schneide

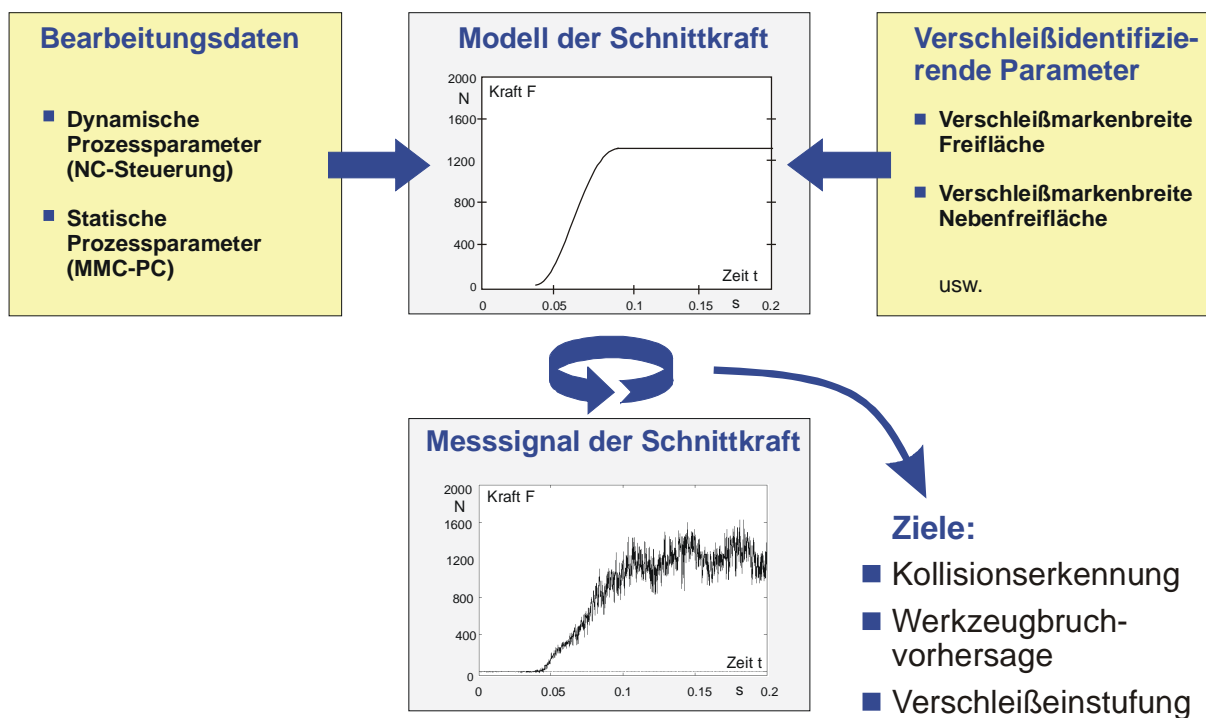


Bild 50: Modellbildung als Voraussetzung der Kollisionserkennung und Verschleißstufung [122]

Die realisierte Kollisionserkennung basiert auf dem Prinzip, die Werte der drei beim Zerspanen auftretenden Kräfte zu schätzen und eine Kollision dann anzunehmen, wenn die aktuell auftretenden Kräfte deutlich über den Schätzwerten liegen. Eine derartige Schätzung setzt ein Modell der Kräfte voraus, das möglichst genau sein soll, aber andererseits wegen der Echtzeitanforderungen bei der Kollisionserkennung nicht zu komplex sein darf. Projektpartner entwickelten ein Modell der Zerspankräfte, das sich auf Ergebnisse zahlreicher Zerspanversuche mit Kraftmessungen stützt. In dieses Modell gehen verschiedene feste Parameter ein, wie z. B. Werkstoffmaterial, Einstellwinkel (κ) und Spanwinkel (γ). Daneben sind dynamische Größen, wie z. B. Schnittgeschwindigkeit (v_C), Schnitttiefe (a_P) und insbesondere der aktuelle Verschleißgrad der Schneide berücksichtigt (Bild 50) [122].

Ein Werkzeugbruch (meist eine Folge von erhöhtem Verschleiß) kann mit Hilfe der Verschleißermittlung vermieden bzw. aufgrund eines Kraftanstiegs mit Hilfe der einstellbaren Schwellwerte der Kollisionserkennung entdeckt werden. Bei der VerschleißEinstufung sollen verschleißidentifizierende Parameter, wie z. B. die Verschleißmarkenbreite, mit Hilfe verschiedener Prozesseinflussgrößen sowie statischer und dynamischer Anteile der gemessenen Signale durch ein neuronales Netz geschätzt werden. Einen Schwerpunkt bei der VerschleißEinschätzung bilden die Verfahren zur Vorverarbeitung und Aufbereitung der multisensoriell erfassten Daten, die als Eingabe für die neuronalen Netze dienen, und die Auswahl eines geeigneten Netzparadigmas, das die zeitliche Entwicklung der Merkmale berücksichtigt.

Im Modell zu berücksichtigende Prozesseinflussgrößen sind [122]:

Werkzeugdaten: Freiwinkel, Keilwinkel, Spanwinkel, Einstellwinkel, Neigungswinkel, Eckenwinkel, Eckenradius, Schneidenbeschichtung

Bearbeitungsdaten: Vorschub, Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe, Werkstückmaterial, Werkstückdurchmesser, Bearbeitungsform

Verschleißerkennung

Bei der Verschleißgradermittlung werden verschiedene, den Verschleiß einer Schneide charakterisierende Parameter mit Hilfe Neuronaler Netze geschätzt. Wichtigste Aufgabe hierfür ist die Auswahl geeigneter, d. h. aussagekräftiger Netzeingangsgrößen im Hinblick auf eine kontinuierliche Schätzung von Verschleißgrößen, wie z. B. die Verschleißmarkenbreite auf der Frei- bzw. Nebenfreifläche [20][122].

Nach einer umfangreichen Analyse, der mit konventionellen Sensoren aufgezeichneten Messdaten, werden neben den variablen Prozesseinflussgrößen wie Schnitttiefe, Vorschub und Schnittgeschwindigkeit aus den Signalen extrahierte Merkmale festgelegt, die einen signifikanten Einfluss auf die Verschleißentwicklung besitzen. Es sind dies beispielsweise die statischen Anteile von Schnitt-, Vorschub- und Passivkraft, sowie Kraftzunahmefaktoren und Energieaufnahmen in bestimmten Frequenzbändern. Ein weiteres, wichtiges Kriterium ist die Standzeit der Schneide. Nach dem Training des Neuronalen Netzes wird der Einfluss der einzelnen Eingangsgrößen auf das Ergebnis (Korrelation) untersucht. Anhand der gewonnenen Resultate erfolgte eine Optimierung des Netzes im Hinblick auf die Anzahl von Eingangsgrößen und Knoten.

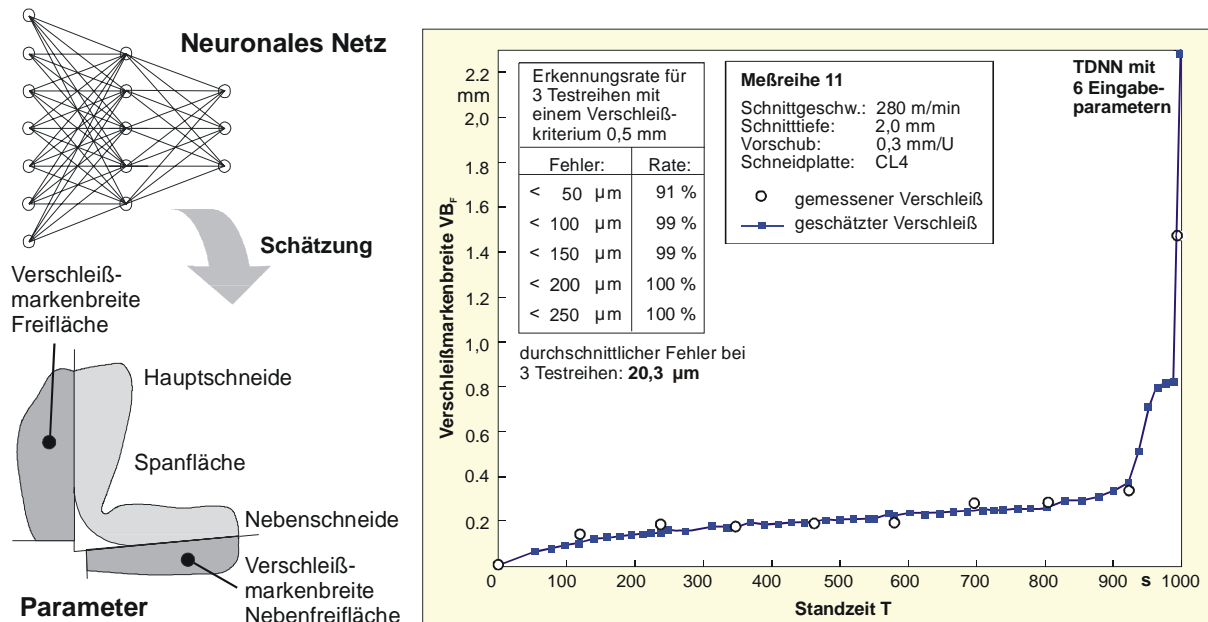


Bild 51: Beispiel für die Schätzung der Verschleißmarkenbreite auf der Freifläche mit TDNNs [122]

Die Schätzung zeitlicher Verläufe von Signalen auf der Basis von Merkmalssequenzen ist mit Time-Delay Neural Networks (TDNN) besonders gut möglich. Mit diesem Netztyp, trainiert mit dem RPROP-Algorithmus, wird der durchschnittliche Fehler bei einer extrapolierenden Schätzung auf ca. 20 μm verbessert (Bild 51). Gleichzeitig benötigt dieses Netz lediglich 6 Eingangswerte, was einer direkten Einbindung in eine Werkzeugmaschine zugute kommt [122].

Kollisionserkennung

Bei der Kollisionserkennung wird eine modellbasierte Lösung eingesetzt, wie sie bei kommerziell verfügbaren Werkzeugüberwachungssystemen noch nicht realisiert worden ist. Ausgehend von einem Modell für die Kräfte in Schnitt-, Vorschub- und Passivrichtung werden dynamisch, d. h. in Abhängigkeit von den aktuellen Prozesseinflussgrößen, insbesondere vom aktuellen Verschleißzustand der Schneide, Schwellwerte für die Kräfte berechnet. Bei Überschreitung eines Schwellwertes wird ein Not-Aus-Signal an die CNC-Steuerung abgesetzt.

Für die Erkennung einer Schwellwertüberschreitung wird ein neuartiges Prädiktionsverfahren verwendet. Dieses baut auf einer Quadratmittelapproximation der empfangenen Sensordaten mit Polynomen auf. Im Gegensatz zur einfachen Mittelwertbildung berücksichtigt dieses Extrapolationsverfahren den im Signal vorhandenen Trend. Im Kollisionsfall kann dadurch die Drehmaschine deutlich schneller stillgelegt werden. In Bild 52 ist ein Schnittkraftsignal bei einer Kollision dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass ab dem Zeitpunkt des signifikanten Schnittkraftanstiegs das Extrapolationsverfahren zu jedem Zeitpunkt einen höheren Wert als die Mittelwertbildung ergibt und somit zu einer früheren Schwellwertüberschreitung führt. Die Algorithmen zur modellbasierten Schwellwertberechnung und zur Erkennung von Schwellwertüberschreitungen wurden echtzeitfähig auf einem DSP-Board implementiert und in Werkzeugmaschinen getestet. Diese modellbasierte Lösung hat für den

praktischen Einsatz den Vorteil, dass sie nicht nur für die Massenfertigung geeignet ist, da (im Gegensatz zu vielen herkömmlichen Überwachungssystemen) keine Messschnitte zur Ermittlung von Schwellwerten durchzuführen sind [22].

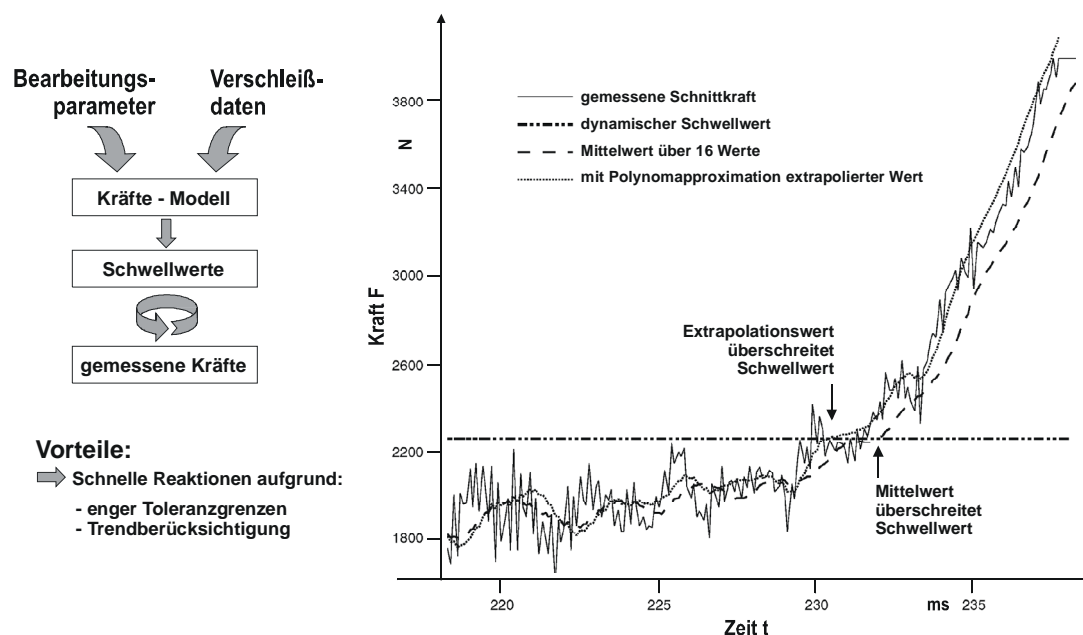


Bild 52: Beispiel einer modellbasierten Kollisionserkennung [22]

Sowohl für die Kollisions- wie auch für die Verschleißerkennung gilt, dass in Echtzeit alle zur Berechnung nötigen Eingangsgrößen zur Verfügung gestellt und verarbeitet werden müssen. Dies setzt eine leistungsfähige Hardwareumgebung und Schnittstelle zum NC-Kern der Steuerung voraus.

4.3 Diskussion von Überwachungssystemen

4.3.1 Systeme zur Schwingungsüberwachung

Der heutige Markt bietet eine Reihe von Systemen zur Überwachung von Vibrationen an. Dazu gehören die sogenannten Schwingungswächter, die einen breiten Einsatz in der Praxis gefunden haben. Bei diesen Schwingungswächtern wird ein breitbandiges Aufnahmesignal in einem vorher festgelegten Frequenzband ausgewertet. Der Wächter bildet meistens den Mittel- oder Effektivwert und damit einen Summenpegel, den er mit einem vorgegebenen Grenzwert vergleicht. Der Schwingungssummenpegel enthält die unterschiedlichsten Informationen, z. B. sehr hohe Pegel bei Unwucht oder sehr kleinen bei Wälzlagerschäden. Kleine Pegel haben den Nachteil, dass die meisten Details nicht erkennbar sind [73]. Das Bild 53 zeigt das Prinzip eines Schwingungswächters. Ein großer Nachteil dieser Überwachungsmethode ist, dass sich der Summenpegel erst deutlich im Endstadium eines Schadens ändert, so dass die Früherkennung nicht mit diesem Überwachungssystem gewährleistet ist. Ein weiteres Problem, das bei Schwingungswächtern auftritt, ist ihre hohe Empfindlichkeit gegenüber wechselnden Drehzahlen, die große Pegeländerungen hervorrufen. Dadurch ist deren Einsatz für die Schwingungsüberwachung bei Werkzeugmaschinen schwierig.

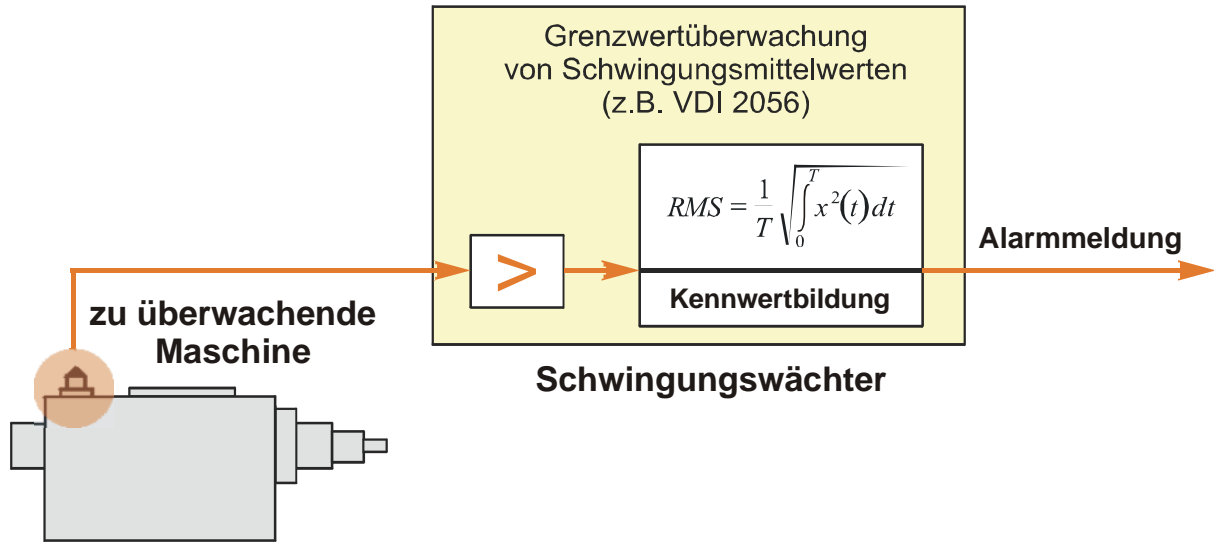


Bild 53: Prinzip eines Schwingungswächters [73]

Eine Neuentwicklung auf diesem Gebiet ist der digitale, frequenzselektive Schwingungswächter. Dabei werden Amplituden innerhalb fester und sehr schmaler Frequenzbänder auf vorgegebene Grenzwerte überwacht. Das Bild 54 zeigt ein Beispiel dieser Überwachungsart. Die Drehzahlempfindlichkeit wird durch das Nachführen der Frequenzbänder in ihrer Lage und Breite angeglichen. Diese Methode ist für das Überwachen im Frequenzbereich, (die Amplitude wird über die Frequenz dargestellt) konzipiert worden. Die Umformung vom Zeitbereich in den Frequenzbereich wird mit Hilfe der Fast-Fourier-Transformation durchgeführt.

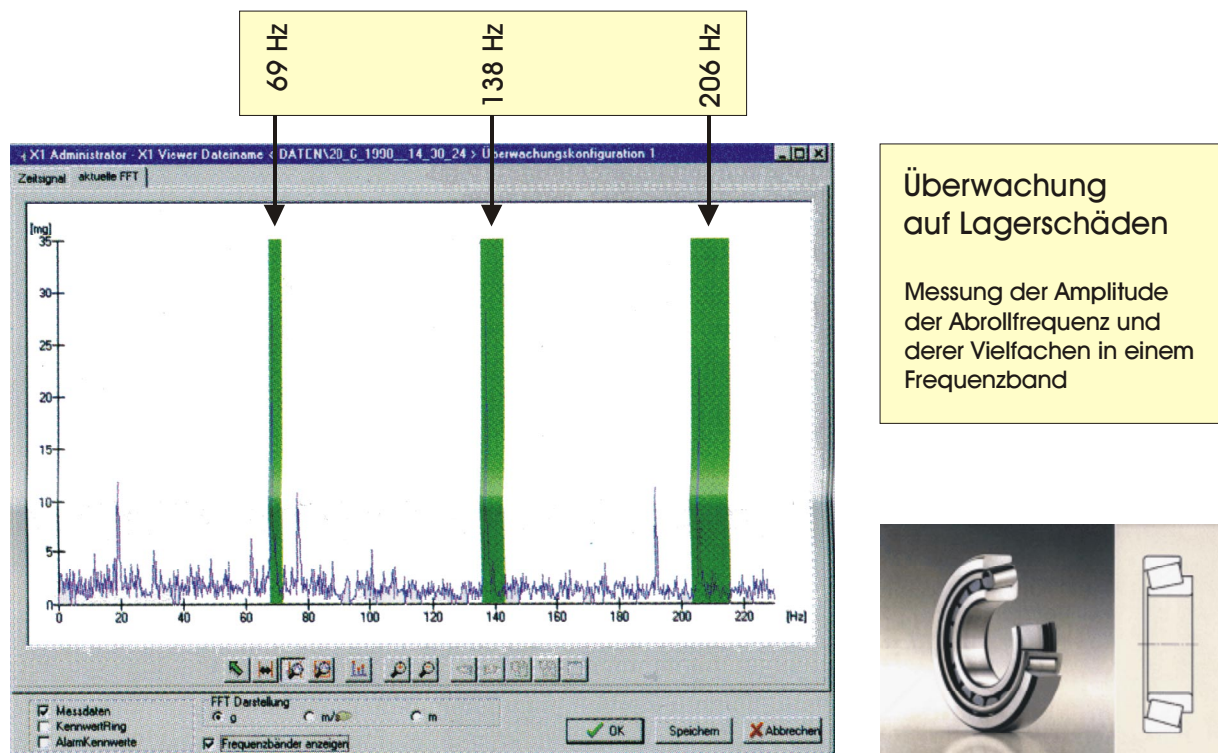
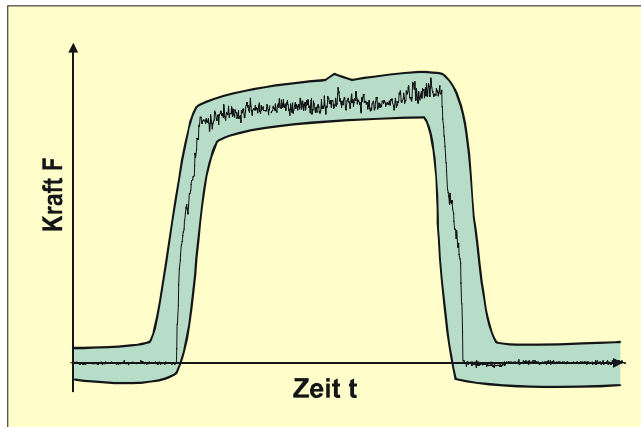


Bild 54: Prinzip der frequenzselektiven Schwingungsüberwachung [73]

4.3.2 Defizite konventioneller Überwachungssysteme

Zur Werkzeugüberwachung werden die intermittierende Technik, bei der der Zustand des Werkzeugs nach Abschluss eines Bearbeitungsprozesses untersucht wird, und das kontinuierliche Verfahren unterschieden [18]. Vorteil des kontinuierlichen Verfahrens ist die ständige Erfassung der aktuellen Prozessgrößen. Damit kann auf einen Werkzeugbruch oder eine Kollision unmittelbar reagiert und Folgeschäden vermieden werden.



- **Maschinenspezifische Sensorik:**
nicht optimal für das gesamte Bearbeitungsspektrum geeignet
- **Messschnitt erforderlich:**
ungeeignet für flexible Fertigung
- **Keine Nachregelung:**
Abschalten der Maschine bei Verlassen des Korridors
- **Ergebnisinterpretation problematisch:**
Abschalten durch Werkstücktoleranz oder Werkzeugzustand

Bild 55: Defizite konventioneller Systeme zur Werkzeugüberwachung [7]

Die Anforderungen der Anwender konzentrierten sich in der Vergangenheit auf die Erkennung von Werkzeugbrüchen [13][143]. Zur Überwachung des spanenden Fertigungsprozesses werden die unterschiedlichsten Signale, wie Körperschall, Kräfte, Motorstrom oder Drehmoment gemessen [145][139]. In der Regel beschränkt sich die Meßwerterfassung auf ein Signal. Die Sensorik ist hierbei maschinenspezifisch ausgelegt. Dies ist der wesentliche Nachteil der bestehenden Systeme, da nicht bei allen Bearbeitungsaufgaben zufriedenstellende Signale geliefert werden können. Zusätzlich muss bei einem Wechsel der Bearbeitungsaufgaben ein neuer Messschnitt durchgeführt werden. Dies schränkt ihre Verwendbarkeit in einer flexiblen Fertigung ein [104]. Der Funktionsumfang der Schnittstelle zur NC-Steuerung ist in der Regel begrenzt. Eine adaptive Nachregelung der Maschine, beispielsweise zur Korrektur eines thermisch- oder verschleißbedingten Schneidenversatzes, ist daher mit wirtschaftlichem Aufwand nicht möglich [8].

4.3.3 Praxiserfahrungen mit Überwachungssystemen

Die hinlänglich bekannten Tendenzen zur Internationalisierung des Wettbewerbes, gesteigerten Qualitätsanforderungen, Dokumentationspflicht im Rahmen des Produkthaftungsgesetzes, ISO 9000, höhere Komplexität der Werkstücke, etc. stellen höhere Anforderungen an den Fertigungsprozess. Dabei wird dieser von vielfältigen Faktoren bestimmt.

Eines der Mittel, um wirtschaftlich und in hoher Qualität fertigen zu können, ist der Einsatz von Werkzeugüberwachungssystemen. Aus der Sicht des Anwenders ist jedoch nicht nur die Erkennung von Kollisionen und Werkzeugbrüchen interessant, sondern auch die Qualität des gesamten Fertigungsprozesses.

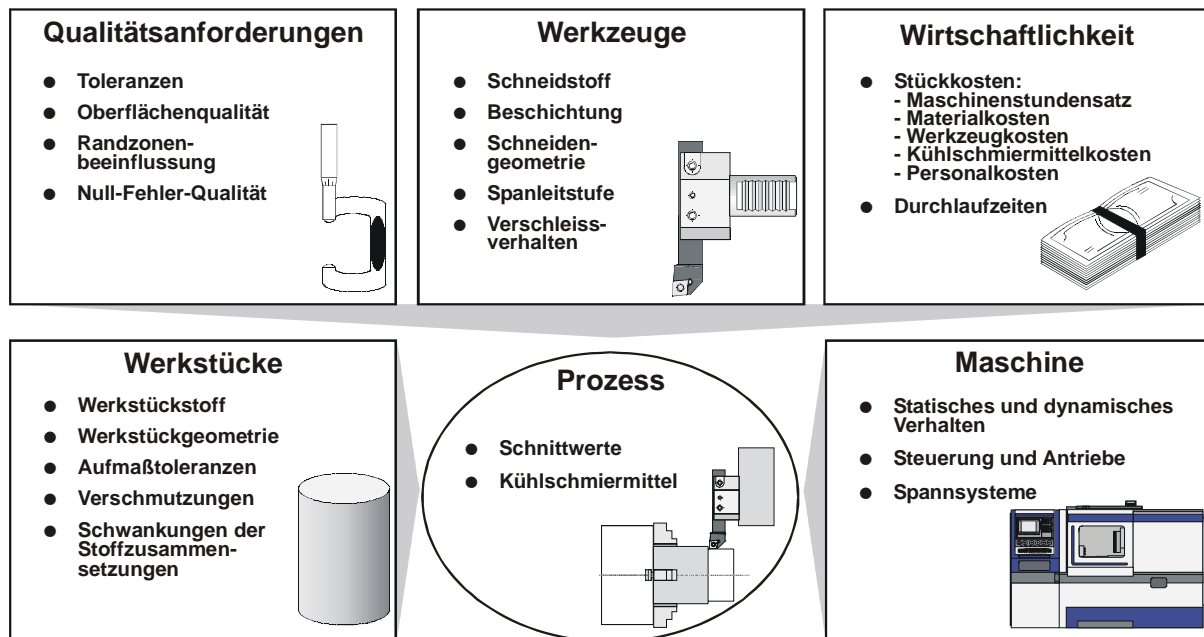


Bild 56: Einflussgrößen auf den Zerspanungsprozess [143]

Basis einer funktionierenden Überwachung ist ein sicherer Prozess, der, wenn die Maschine eingerichtet und richtig gerüstet ist, nur durch Werkzeugverschleiß oder zufällige Ereignisse beeinträchtigt wird. Andernfalls kann eine Überwachung nur die ständigen Störungen feststellen. Die Optimierung des Prozesses bleibt dem erfahrenen Werkstattpersonal vorbehalten. Die eingesetzten Sensoren können lediglich Anhaltswerte beitragen [42].

Die hauptsächlichen Zielsetzungen für den Einsatz von Prozessüberwachungssystemen sind aus der Sicht der Anwender [143]:

- Gewährleistung störungsarmer Prozesse
- Effektive Qualitätskontrolle
- Bessere Auslastung der Produktionsausrüstung
- Bessere Nutzung von Maschinen und Werkzeugen
- Reduzierung der Fertigungskosten
- Beherrschung komplexer Fertigungsprozesse und -systeme mit dem vorhandenen Personal

Elementare Voraussetzung für die erfolgreiche Einführung eines Werkzeugüberwachungssystems ist die Akzeptanz bei den Maschinenbenutzern. Nach [143] tragen dazu folgende Gesichtspunkte bei:

- Kurze Zeit der Inbetriebnahme
- Anwenderfreundliche graphische Benutzeroberfläche
- Hohe Erkennungssicherheit
- Geringe Anzahl von Fehlalarmen
- Schulung des Personals
- Geringer zusätzlicher Aufwand für das Maschinenpersonal
- Erkennbarer persönlicher Vorteil für den Maschinenbenutzer

4.3.4 Anforderungen an neue Überwachungssysteme

Neue Entwicklungen und Trends in der Maschinentechologie und im Werkzeugdesign bilden die Grundlage für neue Anforderungen an Werkzeugüberwachungssysteme im produktiven Umfeld. Große Fortschritte wurden im Bereich der Schneidprozesse erzielt, die sich kontinuierlich weiterentwickeln. Neben einer Steigerung der Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe, die in bisherigen Maschinen nicht gekannte dynamische Anforderungen nach sich zieht, ist ein deutlicher Trend zu höherer Genauigkeit zu verzeichnen. Hiermit verbunden sind Forderungen nach verbesserten Prozessen mit minimierten Schadstoffemissionen (z. B. Trockenbearbeitung, Minimalmengenschmierung) und reduziertem Ausschuss [13].

Folgende Aufstellung fasst einige Anforderungen zusammen [14][15][143]:

- Zuverlässigkeit der Systeme und Sicherung der Qualität
- Vermeidung von Maschinenstillstandzeiten
- Optimale Nutzung aller Ressourcen
- Einfachheit für Integration und Bedienung
- Anbindung an ein Ferndiagnosesystem
- Integration der Überwachungssysteme in die Maschinensteuerung
- Modulare Systemstruktur
- sichere Störungserkennung/-vermeidung bei komplexen Fertigungsprozessen
- weitgehende Standardisierung (Bedienung, Schnittstelle, usw.)
- deutliche Senkung der Kosten insbesondere für Installation und Betreuung
- Selbstjustierende und selbsttestende Systeme

Die entscheidenden Kriterien einer innovativen Überwachung und Diagnose liegen in der Nutzung multipler Informationsquellen sowie in der Einbindung des Maschinenbedieners und seines Fachwissens. Erreichen lässt sich dieses Ziel durch die Entwicklung einfacher robuster, aber dennoch intelligenter Sensorik, durch Verknüpfung quantitativer und qualitativer Informationen und in der systematischen Sammlung von Regeln [54]. Die Werkzeugüberwachung darf ferner keine Sonderlösung darstellen, sondern muss ein integraler Bestandteil einer CNC-Werkzeugmaschine sein. Überwachungssysteme müssen den Charakter eines Fremdkörpers in der Maschine verlieren. Da sich diese Aufgaben nicht von einer Gruppe alleine lösen lassen, ist das Zusammenwirken von System-, Steuerungs- und Maschinenhersteller wünschenswert [14][143].

4.3.5 Aktuelle Entwicklungsaufgaben und -probleme

Im Folgenden sind für die Bereiche Sensorik, Systemkonzepte und für die Werkzeugüberwachung allgemein aktuelle Entwicklungsaufgaben, -probleme und Tendenzen angegeben, die zu einer Verbesserung und Leistungssteigerung der Überwachungssysteme beitragen [135].

In Zukunft wird es nicht genügen, nur Kriterien wie Verschleißzustand des Werkzeugs, Werkzeugbruch oder Kollision zu überwachen. Diese sind nur drei von einer

prozessabhängigen größeren Menge von wichtigen Merkmalen. Die Systeme der Zukunft müssen daher Prozeßüberwachungssysteme sein, bei denen die bisherige Werkzeugüberwachung einen Hauptbestandteil bildet.

Sensorik

- Wartungsfreiheit
- Überlastsicherheit
- Alterungsbeständigkeit
- Eliminierung (Bewältigung) von Störeinflüssen (Temperaturgradienten, Schwingungen, Schmierstoffe, elektromagnetische Strahlung)

Systemkonzepte

- Intelligente und schnelle Auswerteverfahren (Signaldekomposition, Signaltransformation, Datenklassifizierung)
- Methoden zur Datenkompression, -übertragung und Archivierung
- Anbindung an die Werkzeugmaschinensteuerung bzw. Prüfmittel
- Schnittstellen und Busanbindungen, Mensch-Maschine-Kommunikation

Allgemein

- Dokumentation der Fertigungsprozesse
- Vereinheitlichung der Begriffe, Verfahren und Standards
- Normung
- Schulung der Entwickler, Konstrukteure und Anwender

Die Prozessüberwachung wird unter veränderten Rahmenbedingungen und dem zukünftigen Charakter der Fertigung auch weiterhin zur Senkung der Fertigungskosten beitragen. Um dies zu erreichen, müssen die Funktionen erweitert, die Systeme vervollkommen und in die Maschinensteuerung integriert werden. Die Prozessüberwachung muss in die SPS-/CNC-Steuerung eingebunden werden, Stand-Alone-Lösungen müssen der Vergangenheit angehören. Auch das Wissenspotential der Mitarbeiter muss stärker genutzt werden. Der Mitarbeiter der Zukunft darf eine Maschine nicht nur bedienen, sondern muss sie im Team intelligent steuern und überwachen können [14][143].

5 Alternative Methoden zur Signalerfassung und –auswertung

5.1 Grundlagen der Sensorik

5.1.1 Der Sensorbegriff

Die Aufgabe eines Sensors besteht darin, eine zu messende physikalische oder chemische, nichtelektrische Größe und ihre Änderungen in ein elektrisches Signal umzuwandeln, das mit den Messgrößen in einem eindeutigen, oft linearen Zusammenhang steht [6][101]. Die erhaltenen elektrischen Messsignale werden in der Aufbereitungselektronik vorverarbeitet, um diese für die Weiterleitung bzw. Verarbeitung bereit zu stellen. Über eine entsprechende Schnittstelle werden diese Signale zur Datenverarbeitungseinheit übertragen und dort verarbeitet. Die beschriebene Sensormesskette ist in Bild 57 dargestellt

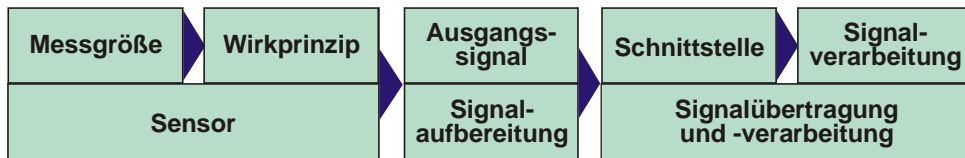


Bild 57: Prinzipdarstellungen einer Messkette

Aufgrund der zunehmenden Bedeutung der Sensorik in der Automatisierungstechnik steht heute dem Anwender ein breites Spektrum an Sensoren zur Verfügung. Eine umfassende Darstellung der Sensoren bzw. ihre prinzipielle Aufteilung wird in Bild 58 veranschaulicht.

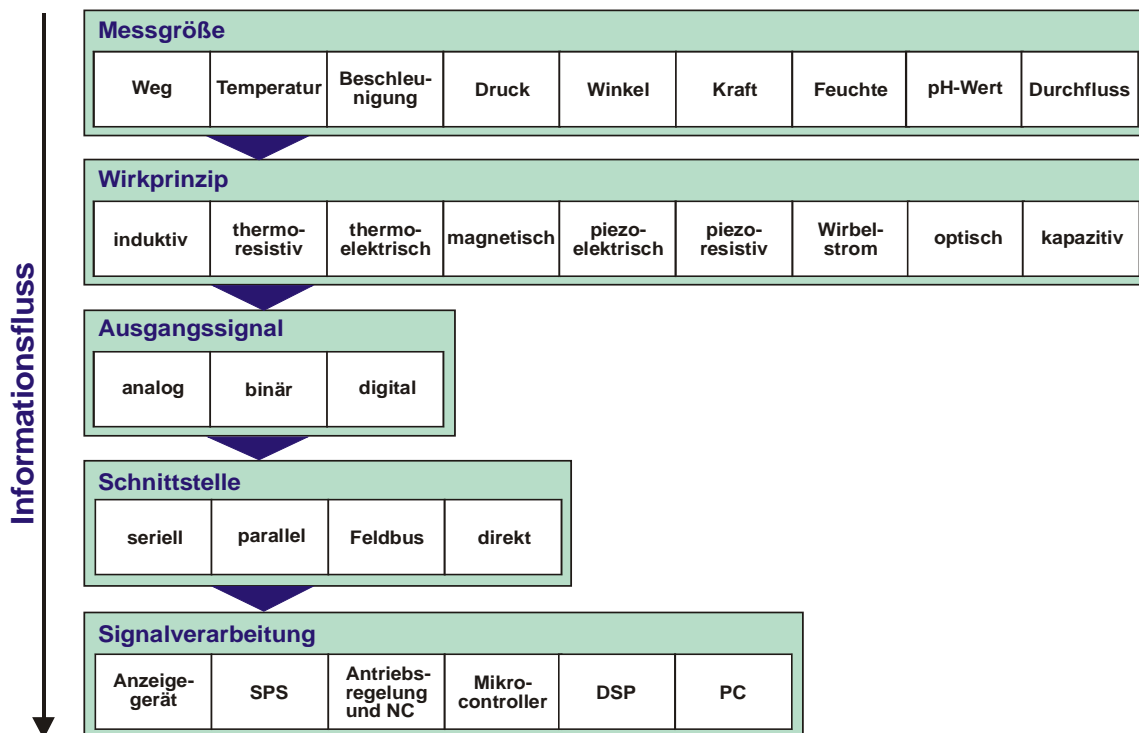


Bild 58: Einteilung von Funktionsbereichen in einer Messkette

Wegen der großen Anzahl an unterschiedlichen Messgrößen und Wirkprinzipien kann auf die einzelnen Merkmale nicht näher eingegangen werden. Die Ausgangssignale und die verfügbaren Schnittstellen, sowie der Ort der Signalverarbeitung haben eine entscheidende Bedeutung und werden daher nachfolgend kurz erläutert.

5.1.2 Ausgangssignale

Die Art und der Umfang der Signalaufbereitung und -verarbeitung ist in erster Linie von der Ausgangsform des gelieferten Signals abhängig. Die Sensoren geben, je nach ihrer Komplexität, folgende Signale aus:

Analoges Ausgangssignal

Die analogen Ausgangssignale werden vornehmlich in Form eines Stromsignals (z.B. 4 mA... 20 mA) oder eines Spannungssignals (z.B. – 10 V... +10 V) gegeben.

Das 4 bis 20 mA-Ausgangssignal stellt die erste industrielle Normierung eines Sensorsignals dar, wodurch beliebige Komponenten unterschiedlicher Hersteller kombinierbar sind. Das Stromsignal selbst hat ausschließlich die Funktion eines Informationsträgers, wobei der Informationsgehalt nicht definiert ist. Es ist eine anwenderspezifische Definition, ob 4 bis 20 mA z. B. einen Druck- oder einen Temperaturbereich bedeutet. Außerdem lässt sich mit dieser Schnittstelle eine Ausfallerkennung (z.B. Kabelbruch) realisieren. 0 mA Stromsignal bedeutet hier, dass kein Sensor vorhanden oder dieser beschädigt ist. Analoge Ausgangssignale liefern beispielsweise Temperatursensoren und berührungslose Abstandsmesssysteme.

Binäres Ausgangssignal

Bei binären Ausgangssignalen sind nur zwei Spannungswerte definiert, zwischen denen beim Überschreiten eines bestimmten Schwellwertes gewechselt wird. Die meisten Schalter (Ein/Aus) liefern ein binäres Signal (low/high). Induktive Näherungsschalter verwenden typischerweise binäre Ausgangssignale.

Digitales Ausgangssignal (parallel oder seriell)

Die digitalen Signale sind gegenüber äußeren Störungen weniger empfindlich als die analogen Signale. Für eine störungsarme Weiterleitung und Weiterverarbeitung von Sensorsignalen, z. B. in Rechenanlagen oder PCs, ist es daher günstiger, wenn diese in digitaler Form vorliegen. Da die meisten Sensoren analoge Ausgangssignale liefern, ist eine Analog-Digital-Umsetzung notwendig.

5.1.3 Schnittstellen

Schnittstellen definieren die Art und Form der Übertragung der Sensorausgangssignale. Die Übertragung der Signale kann direkt, seriell oder parallel erfolgen.

Direkte Übertragung

Die einfachste Form der Übertragung der Sensorsignale ist die Direktverdrahtung. Hier wird das Sensorausgangssignal direkt an die Datenverarbeitungseinheit z. B. SPS angeschlossen.

Serielle/Parallele Schnittstellen

Wenn bei komplexen Sensoren die übliche analoge oder digitale Signalausgabe nicht mehr ausreicht bzw. die Anwendung es erforderlich macht, werden diese häufig mit parallelen (z. B. Druckerschnittstelle) oder seriellen Schnittstellen (RS232, RS422, RS485) ausgestattet.

Für die serielle Übertragung steht nur eine Leitung zur Verfügung, über die die Bits nacheinander (seriell) übertragen werden. Auf diese Weise wird die Übertragung über größere Strecken ermöglicht. Die seriellen Schnittstellen haben ein großes Einsatzgebiet im Bereich der modernen Automatisierungstechnik. Sie ermöglichen eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen zwei Geräten. Hier ist im Wesentlichen die Hardware definiert. Signale werden über eine Pegeländerung übertragen (0V -> Low {0}; 12V -> High {1}).

Bei der seriellen Standardschnittstelle ist nur die elektrische Spezifikation der Schnittstelle genormt, nicht jedoch das zur Übertragung verwendete Protokoll. Die eingesetzten Protokolle sind daher grundsätzlich herstellerspezifisch und unterscheiden sich außer in Art und Format der übertragenen Daten beispielsweise auch in Adressierung und in Fehlererkennungsverfahren.

Bei der parallelen Übertragung können mehrere Bits (in der Regel acht), als ein komplettes Byte über parallele Leitungen transportiert werden, daher sind sie nur für kurze Übertragungsstrecken vorgesehen. D.h. jedem Bit ist eine Leitung zugewiesen, was eine höhere Übertragungsgeschwindigkeit ermöglicht.

Feldbusschnittstellen

Um den Nachteil der herstellerspezifischen Protokolle zu umgehen, werden seit einigen Jahren vermehrt standardisierte Feldbusse eingesetzt. Diese basieren meist auf dem RS485-Standard, für die aber ein einheitliches Protokoll eingesetzt wird, weshalb ein problemloser Datenaustausch mit den Geräten verschiedener Hersteller ermöglicht wird.

Aufgrund der Vielfalt an Feldbussystemen und der durch spezielle Hardware verursachten höheren Kosten, ist es meist nicht sinnvoll die Feldbusanbindung direkt in die Steuerung zu integrieren. So werden in vielen Steuerungen im Regelfall RS232- bzw. RS485-Schnittstellen vorgesehen, die vergleichsweise preisgünstig integriert werden können. Die Anbindung an einen Feldbus wird durch Module vorgenommen, die das Feldbusprotokoll auf das Schnittstellenprotokoll der Steuerung umsetzen [5].

5.1.4 Daten- und Signalverarbeitungsgeräte

Grundsätzlich zählt zur Datenverarbeitung jeder Vorgang, der sich auf die Aufbereitung, Speicherung, Transformation und Bearbeitung von Daten zur Lösung eines Problems bezieht. Zur Verarbeitung von Sensorsignalen stehen heute folgende Geräte zur Verfügung:

Anzeigeegeräte

Ein Anzeigegerät ist die einfachste Form eines Signalverarbeitungsgerätes mit dessen Hilfe der erfasste Messwert (Temperatur, Druck usw.) dargestellt wird.

Maschinensteuerung

Die Maschinensteuerung besteht in der Regel aus den Funktionsgruppen: SPS, Achsregelung mit NC und MMC (Bild 59). Im Folgenden werden diese Funktionsgruppen näher erläutert:

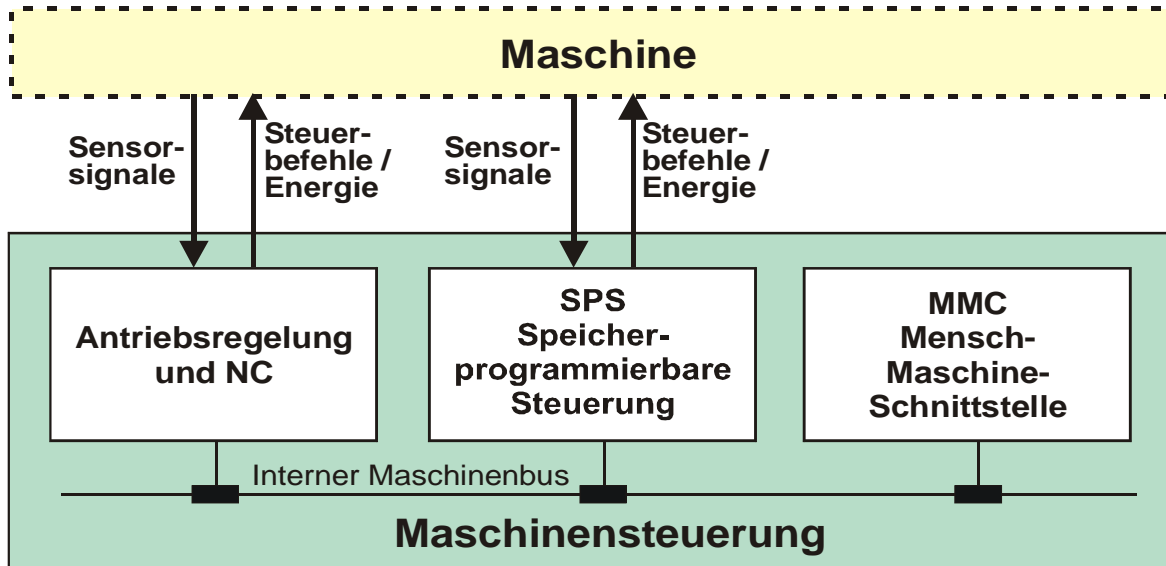


Bild 59: Funktionsblöcke einer Maschinensteuerung

SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung)

SPS sind elektronische Steuerungen, deren Funktion und Eigenschaft als Programm im Steuerungsgerät gespeichert ist. Die speicherprogrammierbare Steuerung hat die Struktur eines Rechners und besteht aus CPU (Zentralbaugruppe) mit Speicher, Ein-/Ausgabe-Baugruppen und internem Bus-System. Sie wird vorwiegend für binäre Verknüpfungs- und Ablaufsteuerungen eingesetzt. Bei einer SPS wird das Steuerungsprogramm nicht einmalig ausgeführt, sondern zyklisch wiederholt durchlaufen. Die Dauer eines Durchlaufs, die Zykluszeit, bestimmt die schnellstmögliche Reaktion der SPS, was als ein wichtiges Leistungskriterium gilt.

NC (Numerical Control) und Antriebsregelung

Die Elementarfunktionen aller Steuerungen für CNC-Maschinen (Computerized Numerical Control) sind die Regelung numerischer Achsen und die Ausführung von Schalt- und Technologiefunktionen. Der Begriff „Numerische Steuerung“ ist eigentlich irreführend, da die heutigen CNCs im Sinne der DIN 19226 keine Steuerungen, sondern Regeleinrichtungen mit geschlossenen Regelkreisen sind. Die vorgegeben Wegmaße, Drehzahlen und Vorschube werden ständig mit den gemessenen Istwerten verglichen und Abweichungen ausgeregelt. Außerdem sind CNCs datenverarbeitende Geräte, die nicht nur numerische Eingaben, sondern alle Buchstaben und Sonderzeichen verstehen, speichern, berechnen und logische Folgen selbst generieren können.

MMC**(Mensch-Maschine-Schnittstelle)**

Die MMC ist das Ein/Ausgabegerät für die Maschinensteuerung, mit deren Hilfe die Überwachung aller Steuerungsfunktionen und Eingabe von Daten (z. B. Erstellung eines neuen Programms) erfolgt. Bei modernen Maschinensteuerungen wird in der Regel zu diesem Zweck ein Industrie-PC (IPC) eingesetzt .

Die einzelnen Komponenten der Maschinensteuerung sind über einen internen Maschinenbus miteinander verbunden, beispielsweise MPI-Bus bei Steuerungen der Fa. Siemens. Neben der schnellen Inbetriebnahme und übersichtlichen Verkabelung können sehr einfach externe Programmiergeräte angeschlossen werden.

Um die Überwachungsaufgabe ausführen zu können, ist zwischen den zu überwachenden Objekten bzw. den zur Überwachung dieser Objekte (Messgrößen) eingesetzten Sensoren und der Maschinensteuerung ein entsprechender Informationsfluss erforderlich. Die Sensoren erfassen die physikalischen Größen und wandeln diese in elektrische Werte um, die von einem Funktionsblock der Maschinensteuerung weiterverarbeitet werden. In Abhängigkeit vom Verarbeitungsergebnis werden von der Maschinensteuerung aus bestimmte Steuerbefehle an die zu überwachenden Objekte geschickt.

Mikrocontroller

Der Mikrocontroller ist eine erweiterte Version eines Mikroprozessors.

Der *Mikroprozessor* ist die Zentraleinheit eines PC-Systems (CPU - Central Processing Unit), mit dessen Hilfe alle erforderlichen arithmetischen und logischen Rechenoperationen durchgeführt werden. Er wird aber erst durch zusätzliche externe Bausteine, wie Speicher, Timer, I/O-Ports usw. ein funktionsfähiges System [37].

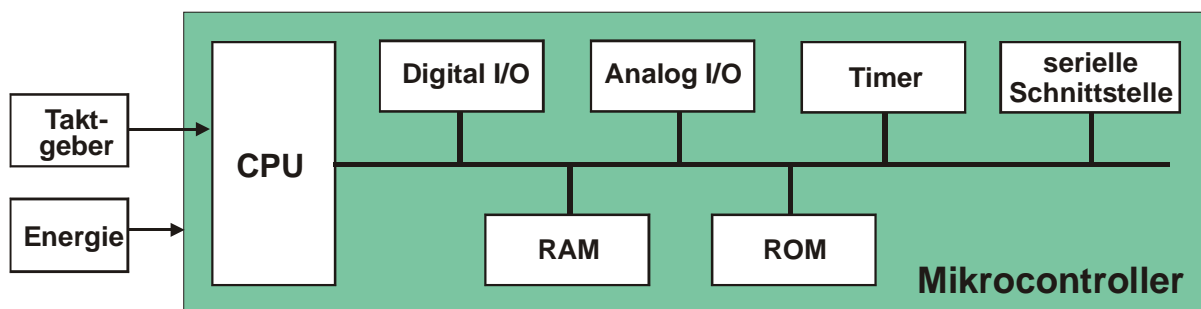


Bild 60: Aufbau eines Mikrocontrollers

Im Gegensatz zum Mikroprozessor stellt der *Mikrocontroller* ein komplettes Prozessorsystem dar, bei dem neben der eigentlichen CPU wesentliche Peripheriekomponenten auf dem Chip integriert sind, wie z.B. Speicher, Timer, serielle Schnittstellen oder I/O-Ports (Bild 60). Durch diese On-Chip-Peripherie werden externe Bauteile stark reduziert, so dass kompakte Schaltungen mit sehr kleinem Platzbedarf entstehen. Weiterhin können sie individuell an die geforderten Aufgaben angepasst werden, da ihre Funktion abhängig vom Steuerprogramm ist [37].

5.2 Bewertung von Sensoren für die Produktion

5.2.1 Sensoren für die Produktionstechnik

Sensoren gelten als Schlüsseltechnologie zur Informationsgewinnung in Produktionsanlagen, Maschinen und Prozessen. Die zunehmende Automatisierung in der Produktionstechnik basiert im Wesentlichen nicht nur auf der Integration moderner Rechner- und Steuerungstechnik, sondern auch auf deren Verbindung zur Umwelt über Sensorsysteme. Obwohl Sensoren meist nur einen geringen Kostenfaktor in einer industriellen Gesamtanlage darstellen, haben sie für die Automatisierung eine zentrale Bedeutung [101]. Die Aufgabe eines Sensors besteht darin, eine erfasste physikalische oder chemische, nichtelektrische Größe und ihre Änderungen in ein eindeutiges elektrisches Signal umzuwandeln.

Die Einteilung der Sensoren kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen:

- Nach der Art der Messgrößen: Weg-, Winkel-, Kraft-, Beschleunigungs-, Temperatur-, Gassensoren
- Nach der Art der Wirkprinzipien: ohmsche, kapazitive, induktive, optoelektronische, thermoelektrische, magnetische, piezoelektrische, piezoresistive Sensoren

Im Allgemeinen können für Sensoren in der Produktionstechnik folgende Verwendungszwecke unterschieden werden:

- Regelungsaufgaben
- Überwachungsaufgaben
- Messaufgaben
- Steuerungsaufgaben
- Identifikationsaufgaben

In den ersten drei Anwendungsgebieten wird vor allen Dingen die physikalische Größe gemessen und ausgewertet. Für Steuerungszwecke, wie beispielsweise in Materialflusssystemen, genügt oft die Erkennung der Anwesenheit mit einem binär wirkenden Sensor. In automatisierten Produktionsprozessen kommt der Anwesenheitserkennung von Objekten und die Bestimmung ihrer Position eine große Bedeutung zu. Induktive Sensoren spielen hierbei aufgrund ihrer berührungslosen Arbeitsweise, ihrer robusten industrietauglichen Bauart - und damit hohen Zuverlässigkeit - sowie aus wirtschaftlichen Gründen eine besonders wichtige Rolle. Zur Messung von Prozesskräften sind Dehnungsmessstreifen oder piezoelektrische Sensoren verfügbar. Die Kraftmessung ist häufig die Grundlage zur Messung anderer physikalischer Messgrößen. So wird beispielsweise eine Druckgröße aus einer Kraftmessung hergeleitet oder eine Beschleunigung wird durch die Kraftwirkung einer beweglichen Masse auf einen Kraftsensor bestimmt.

5.2.2 Funktionen von Sensoren in Werkzeugmaschinen

Auf Werkzeugmaschinen bezogen können allgemein drei Verwendungszwecke für Sensoren unterschieden werden: Die Betriebs-, Funktions- und die Prozessüberwa-

chung. Für jede Funktion ist in Tabelle 4 ein reales Beispiel sowie die entsprechende Datenverarbeitungseinheit angegeben. Die Prozessüberwachung, beispielsweise die Messung der Kräfte oder Schwingungen während des Zerspanprozesses, werden nur selten und nur auf Kundenwunsch eingesetzt. Dabei erfolgt die Datenverarbeitung meist innerhalb eines externen Auswertegeräts, das mit der Maschinensteuerung gekoppelt sein kann.

Verwendungszweck	Beispiel	Datenverarbeitungseinheit
Betriebsüberwachung	Betriebsgrenzen (Temperatur)	Antriebsregelung und NC
Funktionsüberwachung	Werkzeug-Wechsel	SPS
Prozessüberwachung	Spanprozess (Kraft)	Externes Gerät (z.B. DSP)

Tabelle 4: Aufgaben von Sensoren am Beispiel von Motorspindeln

Um die obengenannten Aufgaben ausführen zu können, ist ein Informationsaustausch zwischen den entsprechenden Funktionsblöcken der Maschinensteuerung und der Motorspindel bzw. der in Motorspindeln eingesetzten Sensoren notwendig. Der Zusammenhang zwischen den Bestandteilen dieses Informationsflusses zeigt Bild 61.

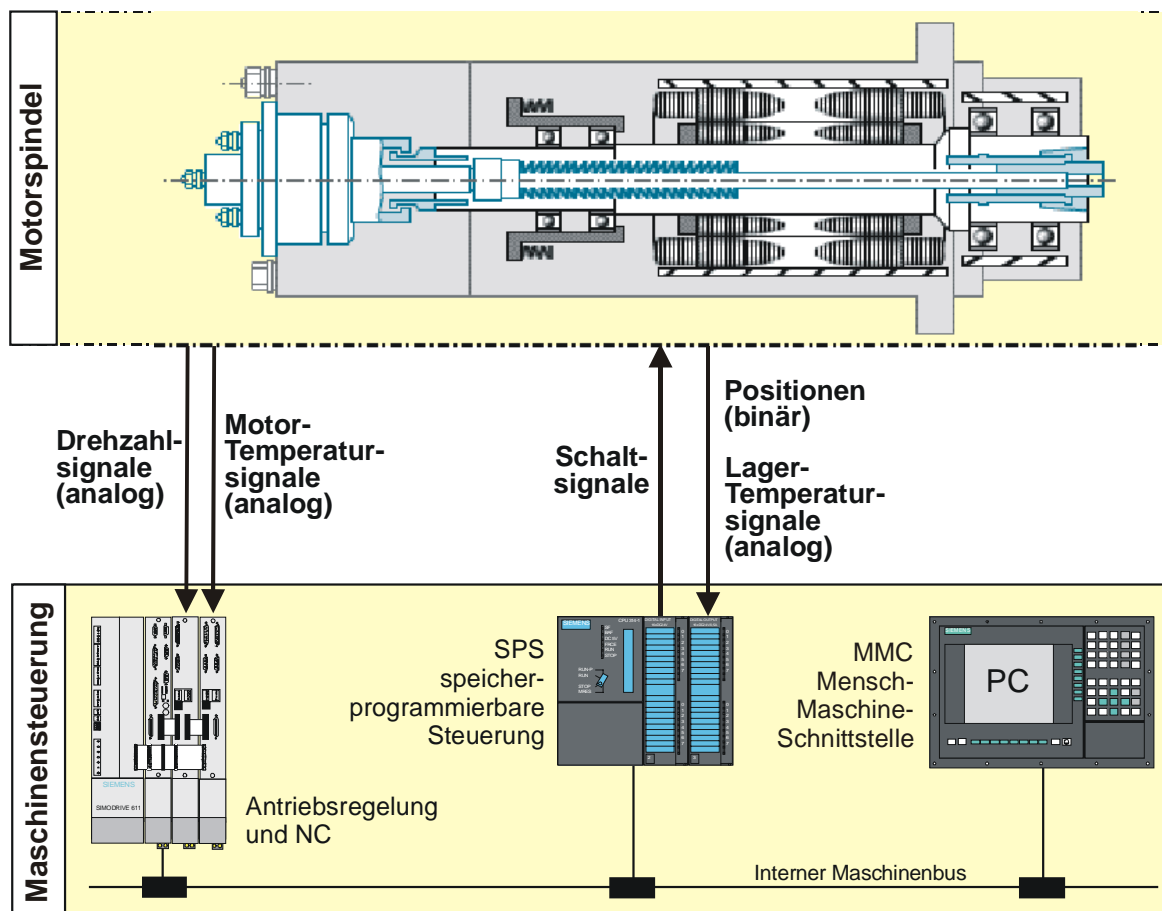


Bild 61: Zusammenspiel der Maschinensteuerung mit einer Motorspindel

Hier ist die Maschinensteuerung SINUMERIK 840D der Fa. Siemens, mit den folgenden Komponenten dargestellt: der Antriebsregelung SIMODRIVE 611, der SPS, einer SIMATIC S7-300 und der MMC103, einem Windows-Pentium-PC zur Maschinenbedienung. Abgebildet ist weiterhin der Informationsfluss, wie er in einer Werkzeugmaschine realisiert sein kann.

5.2.3 Entwicklungstrend in der Sensorik

Sensoren gelten als Schlüsselemente zur Informationsgewinnung in Produktionsanlagen, Maschinen und Prozessen. Die zunehmende Automatisierung in der Produktionstechnik beruht im wesentlichen nicht nur auf der Integration von moderner Rechner- und Steuerungstechnik sondern auch auf deren Verbindung zur Umwelt über Sensorsysteme. Obwohl Sensoren meist nur einen geringen Kostenfaktor in einer industriellen Gesamtanlage darstellen, besitzen sie für die Automatisierung eine zentrale Bedeutung. Als aktuelle Trends sind die Miniaturisierung der Sensoren mit einer Integration von elektronischen Elementen zur Signalverstärkung und Datenverarbeitung am Messort sowie die zunehmende Bedeutung von Telemetriesystemen hervorzuheben. Die große Rechenleistung heutiger PCs oder Mikrocontroller schafft neue Möglichkeiten für Bildverarbeitungssysteme auch bei Anwendungen, die bislang aus Kostengründen auf den Einsatz derartiger Systeme verzichten mussten.

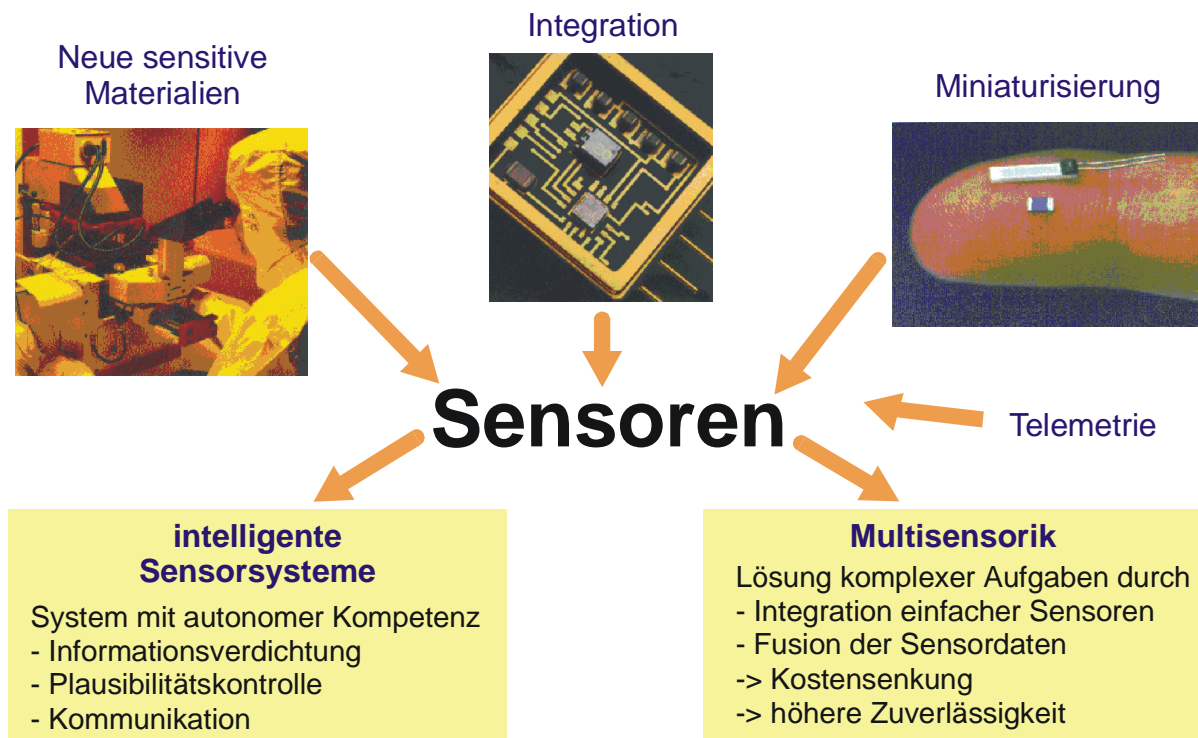


Bild 62: Entwicklungstrends in der Sensortechnik

In den letzten Jahren wurden große Fortschritte in der Entwicklung neuer Sensoren erzielt. Neue sensitive Materialien auf Halbleiterbasis und hochintegrierte elektronische Bauelemente konnten gefunden werden, die eine Grundlage zur Miniaturisierung, Leistungssteigerung und Kostenverringerung bisheriger Sensorsysteme darstellen. Durch die Integration des Messaufnehmers, der vorverarbeitenden Elektronik

und der Auswerteeinheit wurden intelligente Sensorsysteme möglich, die über die reine Messwerterfassung hinaus eine Reihe von Verarbeitungsaufgaben übernehmen. Beispielsweise mit der Mikrosystemtechnik konnten die Eigenschaften geringer Baugröße und Kosten vereint werden.

Um eine zuverlässigere Aussage über den zu messenden Prozess zu erhalten, stützt man sich speziell bei der Zerspanung gleichzeitig auf mehrere physikalische Größen. Durch die Fusion der Daten von mehreren einzelnen Sensoren (Multisensorik) können komplexe Aufgaben, für die bisher hochspezialisierte Sensorsysteme notwendig waren, kostengünstig gelöst werden. Werden die Sensoren redundant ausgeführt, so kann eine höhere Zuverlässigkeit des gesamten Sensorsystems erreicht werden. Durch eine Signalverstärkung vor Ort bleibt die Signalgüte erhalten, die durch elektromagnetische Störungen verursacht durch die Produktionsanlage in starkem Maß beeinträchtigt wird [96].

Sensorsysteme gehen den Weg einer höheren Integration von Mikroelektronik bei gleichzeitiger Miniaturisierung. Die Bestrebungen im Bereich der Mikrosystemtechnik oder Mechatronik sind Anzeichen für das große Potential, das noch in diesen Technologien steckt. Es ist wünschenswert, dass diese neuen Entwicklungen auch zu niedrigeren Kosten für hochwertige Sensorsysteme führen. Sensoren können dann in großer Zahl in Produktionsanlagen eingesetzt werden, um über die höhere Verfügbarkeit und kürzere Ausfallzeit die Wertschöpfung zu steigern.

Drahtlose Daten- und Energieübertragung

Die Integration von zusätzlichen Funktionen in ein Sensormodul und die Miniaturisierung des gesamten Sensoraufbaus schafft die Möglichkeit, Signale an Positionen in einer Produktionsanlage zu erfassen, wo mit früheren Verfahren nur mit einem erheblichen Aufwand gemessen werden konnte. Diese Vorteile werden schnell relativiert, wenn Signale auf bewegten Komponenten, wie Wellen oder Zerspanwerkzeugen erfasst werden sollen. Hier ist man auf Telemetriesysteme angewiesen, die das Sensorsystem zum Einen drahtlos mit Energie versorgen und zum anderen die Daten mit einer hohen Bandbreite und Geschwindigkeit übertragen [6]. Bei der Auswahl einer drahtlosen Datenübertragungstrecke sind die Anforderungen der Datenauswertung zu berücksichtigen. Hervorzuheben ist die Bandbreite, die Genauigkeit der erfassten Daten sowie die Datenrate der Übertragungstrecke.

Signalübertragung über Feldbuslösungen

Sehr wichtig bei der Überwachung von Werkzeugmaschinen ist die Art der Ankopplung der gewonnenen Sensorsignale an die Maschinensteuerung. Die gegenwärtig verwendete konventionelle Verdrahtung ist dadurch gekennzeichnet, dass jeder Sensor für sich mit einer Zweipunktverbindung verkabelt ist. Die Sensorsignale stehen auf diese Weise permanent für die Steuerung zur Verfügung, was einen entscheidenden Vorteil bei zeitkritischen Zuständen darstellt. Die konventionelle (parallele) Verdrahtung hat andererseits den Nachteil eines hohen Verkabelungsaufwandes und hoher Installationskosten. Mit dem Ersatz dieser herkömmlichen Verdrahtung durch ein Feldbussystem können diese Nachteile vermieden werden. Bei dieser Lösung muss jeder Sensor mit einer Schnittstelle zum Anschluss an den Feldbus ausgestattet sein. Sensoren ohne integrierter Busschnittstelle werden über eine

Anschlussmodul zusammengefasst und dann an die Maschinensteuerung angekop-
pelt.

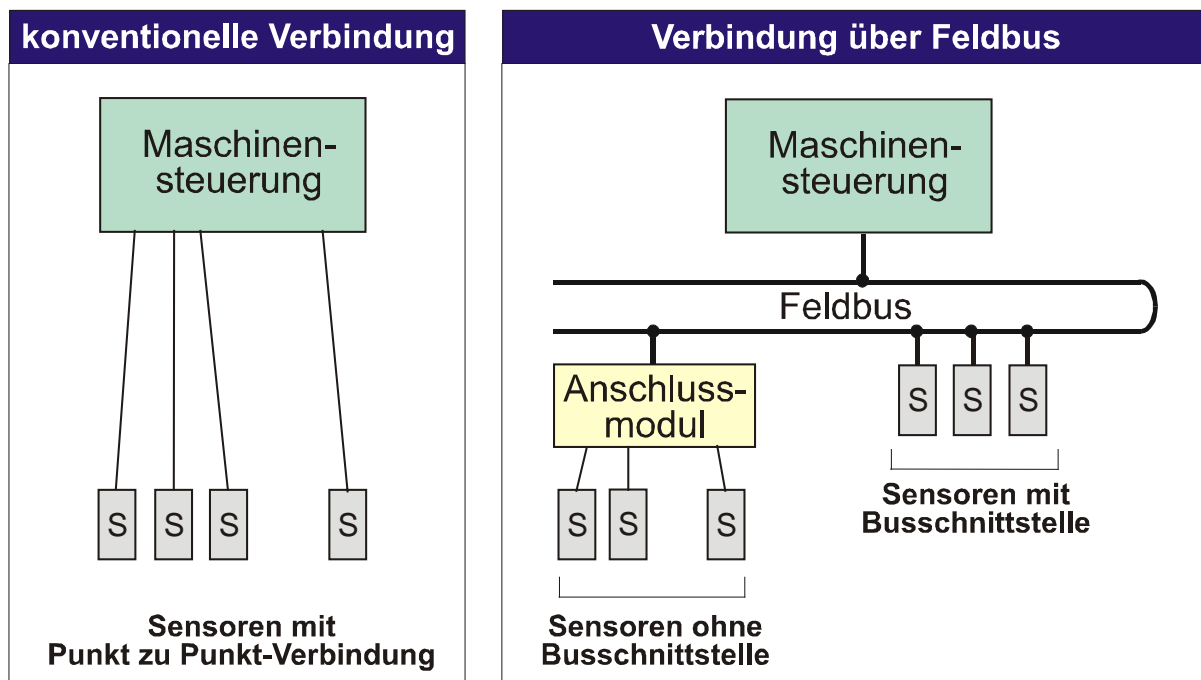


Bild 63: Ankopplungsmöglichkeiten von Sensoren an die Maschinensteuerung

Infolge steigender Qualitätsanforderungen wird der Bedarf an Überwachungsfunktionen immer höher. Bei einer steigenden Anzahl von Sensoren stößt die parallele Verdrahtung sehr schnell an ihre Grenzen, was ein wichtiges Argument für den Buseinsatz darstellt. Durch den Buseinsatz entstehen neben der Reduzierung des Verkabelungsaufwands und der Schaltschrankinstallation im Vergleich zur konventionellen Verdrahtung auch geringere Planungskosten. Diese Reduktion ist auch bei einer zukünftigen Erweiterung oder Anpassung einer Maschine bzw. Maschinenkomponente bemerkbar, da sich die Umbauten an einer Maschine/Komponente viel einfacher und kostengünstiger durchführen lassen.

Ein mit dem Feldbus in engem Zusammenhang stehender Trend ist die Dezentralisierung der Steuerungsfunktionen. Damit ist gemeint, dass die Feldgeräte (Sensoren, Aktoren) immer mehr Funktionen übernehmen, die früher zentral von der Steuerung bearbeitet wurden. Ein integrierter Sensor kann beispielsweise die Messwertaufbereitung (Verstärkung, Filterung) vornehmen. Der intelligente Sensor ist in der Lage eine Überwachung bezüglich einstellbarer Grenzwerte zu übernehmen, oder Regelaufgaben ausführen [106].

Im Gegensatz zu den obengenannten Vorteilen, die eine Busverbindung der Sensoren ermöglichen kann, bereitet deren Realisierung mehrere Schwierigkeiten. Hier geht es in erster Linie um ein mangelndes Marktangebot an bestimmten Feldkomponenten und um mangelndes Expertenwissen, das zur Abschätzung von Kosten und Aufwand nötig ist. Die Hardware, Software sowie Anschlussmodule für die häufig genutzten Feldbusse stehen in ausreichender Form zur Verfügung. Jedoch sind diese Komponenten für den Einsatz in Maschinenkomponenten meist zu groß und

damit nicht verwendbar. Das gleiche Problem besteht beim Einsatz integrierter und intelligenter Sensoren. Zur Realisierung einer intelligenten Maschinenkomponente ist die Verwendung einer Auswerteeinheit nötig. Controller, DSP und modulare Mikro-CPU-Einheiten sind für diesen Zweck prädestiniert. Ohne das entsprechende Expertenwissen sowohl in der Planung des Systems als auch in der Programmierung ist es aber nicht möglich diese zukunftsweisenden Technologien einzusetzen. Mechatronische Baugruppen bauen auf diesen Grundlagen auf und erfordern daher entsprechendes Know-How.

Optische Sensoren und Bildverarbeitungssysteme

Mit optischen Sensoren ist eine breite Palette von Messproblemen lösbar. Der Vorteil ist die Schnelligkeit der Messung bei hoher Genauigkeit. Das Messprinzip optischer Weg- und Winkelsensoren beruht darauf, dass eine Lichtquelle und ein lichtempfindliches Bauteil relativ zu einem Glasmaßstab bewegt werden, auf dem sich Striche in äquidistanten Abständen befinden. Die Anzahl der Striche, die überfahren werden, ist ein Maß für den zurückgelegten Weg. Durch die hohe erreichbare Genauigkeit werden diese Sensoren als Wegmesssysteme in Werkzeugmaschinen eingesetzt. Wird der Glasmaßstab kreisförmig auf eine Scheibe aufgebracht und rotiert diese um ihren Mittelpunkt, so entsprechen die überfahrenen Striche einer Winkeländerung. Einsatzbereiche sind die Winkel- und Drehzahlmessung in elektrischen Antrieben. Neben diesen inkrementellen Impulsgebern, die nur Weg- bzw. Winkeländerungen messen können, gibt es noch absolute Impulsgeber. Bei diesen ist die Winkelposition als digitale Information auf der Scheibe enthalten. Damit steht nach dem Einschalten oder nach einer Stromunterbrechung die genaue Position als digitales Bit-Muster zur Verfügung.

Die Vervielfachung der Rechenleistung von PCs und deren Preisverfall in den letzten Jahren hat industriellen Bildverarbeitungssystemen zu einer größeren Verbreitung geholfen. Früher wurden zur Bildverarbeitung speziell angepasste Prozessoren verwendet, wo heute billigere Standardkomponenten bessere Möglichkeiten für die Leistungsfähigkeit und Bedienfreundlichkeit der Software ergeben. Bildverarbeitungssysteme werden in folgenden Bereichen eingesetzt:

- Objekterkennung (Objektidentifikation durch Codierung oder Objektmerkmale)
- Lageerkennung (Position und Orientierung eines Objektes)
- Vollständigkeitsprüfung (Sonderfall der Objekterkennung)
- Form- und Maßprüfung (messtechnisches Erfassen geometrischer Größen)
- Oberflächeninspektion (Welligkeit, Rauigkeit, Farbe, Oberflächenfehler)

Vor allen Dingen die Software stellt das Kernstück von Bildverarbeitungssystemen dar. Sie ist dem jeweiligen Anwendungsfall angepasst und dominiert daher die Kosten derartiger Systeme [101].

5.2.4 Sensoren zur Kraftmessung

Für die Prozessüberwachung an der Drehmaschine eignen sich Kraftsensoren mit kleinen Abmessungen, da durch die Geometrie des Werkzeughalters der Bauraum begrenzt ist. Kraftsensoren sind als Dehnungsmessstreifen oder als piezoelektrische Sensoren verfügbar. Tabelle 5 zeigt Kraftsensoren mit verschiedenen Wirkprinzipien und deren Einsatzbereich. Aus technischen und Platzgründen ist die Auswahl der

möglichen Kraftsensoren für den Einsatz in der Prozessüberwachung bei der Drehbearbeitung begrenzt. Unter Betrachtung der Sensorsignalgenauigkeit, Einbaufähigkeit, Marktverbreitung als auch Kostenverursachung haben sich piezoelektrische und piezoresistive Sensoren bei der Auswahl als günstig erwiesen. Durch den technischen Fortschritt im Bereich der Miniaturisierung der piezoelektrischen Sensoren wird es möglich, die Sensoren in Standard-Werkzeughalter einzubauen. Nebenbei besitzen diese Sensorarten die Möglichkeit, die Zerspankraft in allen drei Komponenten mit hoher Genauigkeit aufzulösen. Dies ist aber Ursache für hohe Kosten des Sensors und der damit beschränkten Verbreitung in der Industrie.

Sensorprinzip	physikalischer Effekt	Wirkprinzip	Einsatzbereich
elektrisch : piezoelektrisch	Ladungstrennung	piezoelektrischer Effekt, je nach Kristallachsenorientierung	kleine bis mittlere μN - kN
piezoresistiv	Widerstandsänderung	Widerstandsänderung durch Dehnung des aufgeklebten Messgitters	allgemein einsetzbar, auch in der Präzisionsmesstechnik
kapazitiv	Kapazitätsänderung	kraftabhängige Abstandsänderung bewirkt Kapazitätsänderung im Kondensatorplatten	Einsatz in mikromechanischer Sensor-konfiguration
mechanisch: Feder	Zusammenhang zw. Kraft und Dehnung	$F=fc$, Federkonstante c bestimmt die Auslenkung	Kraftmessdose, Federwaage
optisch: spannungsoptisch	Induzierte Spannungsdoppelbrechung	Intensitätsmessung oder Zählen von Interferenzstreifen	in Verbindung mit LWL-Technik
Druckmessfolie	kraftabhängiger Farbumschlag	Zerplatzen von mikroverkapselten Farbstoffen je nach Pressung	Messung der Pressungsverteilung in Trennfugen von Gehäusen etc.
Magnetisch/ elektromagnetisch: magnetoresistiv	Widerstandsänderung	last- bzw. dehnungsabhängiges Magnetfeld wirkt auf Widerstandsstrukturen	kleine Kräfte
Schwingdrahtaufnehmer	Frequenzänderung durch Zugkraft	Schwingensaiten wird elektromagnetisch angeregt und Frequenzänderung gemessen	Wägetechnik aber auch zur Bauwerksüberwachung

Tabelle 5: Übersicht über physikalische Wirkprinzipien zur Kraft- und Gewichtskraftmessung [44]

Mittels piezoresistiver Sensoren (DMS) besteht die Möglichkeit, durch einen einfachen Aufbau Kräfte kostengünstig zu messen. Im Vergleich zu piezoelektrischen Sensoren bieten sie aufgrund ihrer Geometrie, leichten Aufbringung und Größenauswahl der DMS-Typen wesentliche Vorteile, wobei man mit Einschränkungen in der Signalgüte rechnen muss.

5.2.5 Piezoresistive Sensoren

Ziel der Anwendung der DMS-Technik ist es, über die auf der Bauteiloberfläche auftretenden Verformungen (Dehnung / Stauchung) sowie mit Hilfe der Grundlagen der Festigkeitslehre, die im Werkstoff durch die äußeren Belastungen hervorgerufenen Spannungen zu ermitteln.

Für einen Draht der Länge L und der Querschnittsfläche A gilt für den elektrischen Widerstand R [40]

$$R = R(\rho, L, A) = \frac{\rho L}{A} \quad (10)$$

mit dem spezifischen Widerstand ρ

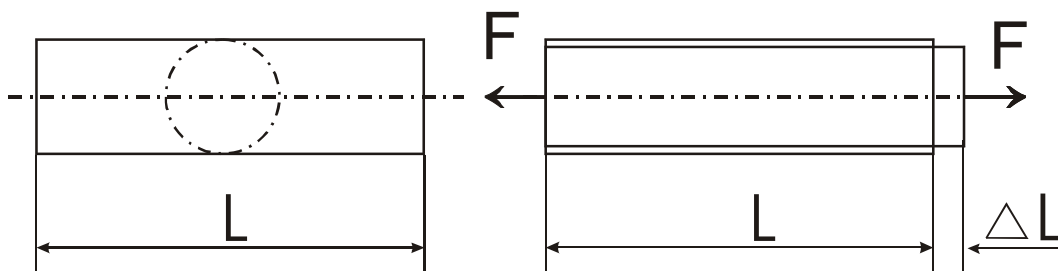


Bild 64: Dehnung des Drahtes bei Belastung

Bild 64 zeigt die Belastung des Drahtes durch eine Kraft F , dabei ändert sich die Länge, der Querschnitt A , der spezifische Widerstand und somit der Widerstand R . Dann gilt [40]

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} + \frac{dA}{A} \quad (11)$$

bzw. in Form von Differenzen

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta A}{A} \quad (12)$$

Für einen Draht mit kreisförmigem Querschnitt $A = \frac{\pi D^2}{4}$ kann für $\frac{\Delta A}{A} = \frac{2\Delta D}{D}$, bzw. unter Einbezug der Querkontraktionszahl ν

$$\frac{\Delta D}{D} = -\nu \frac{\Delta L}{L} \quad (13)$$

und damit für Querschnittsänderung

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\nu \frac{\Delta L}{L} \quad (14)$$

geschrieben werden.

Das Einsetzen dieser Gleichungen in die Gleichung der Widerstandsänderung ergibt

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{\Delta L}{L} + 1 + 2\nu \right) \frac{\Delta L}{L} \quad (15)$$

mit k als Dehnungsempfindlichkeit

$$k = \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{\Delta L}{L} + 1 + 2\nu \quad (16)$$

und der Dehnung $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ erhält man die Hauptgleichung der DMS-Technik

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \quad (17)$$

Der Dehnungsempfindlichkeits-Faktor ist abhängig vom verwendeten Drahtwerkstoff und beträgt bei Konstantan $k \approx 2$, bei Stahl $k \approx 4$ sowie bei Halbleitern $k \approx 50-200$. Durch diese Widerstandsänderung die proportional zu der Dehnung ist, wird es möglich die Kraft zu messen, die ein Bauteil beansprucht [40].

Wie in Bild 65 zu sehen ist, besteht ein DMS aus einem Messgitter, dünnem Widerstandsdraht der mäanderförmig gewickelt ist oder aus einer dünnen Folie aus dem Widerstandsmaterial herausgeätzt ist. Das Messgitter ist auf einem dünnen Kunststoffträger befestigt und mit Anschlüssen versehen.

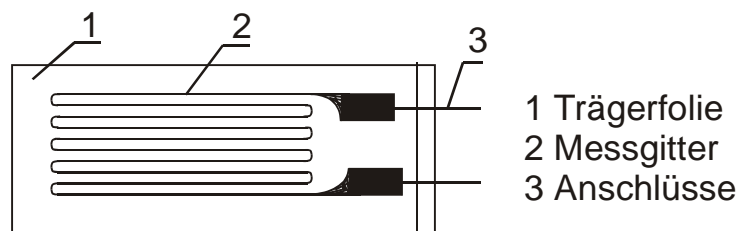


Bild 65: DMS mit Foliengitter

5.2.6 Piezoelektrische Sensoren

Der piezoelektrische Aufnehmer zählt zur Gruppe der aktiven Aufnehmer; er besteht im Prinzip aus Plättchen oder Stäben, die in geeigneter Lage zur Kristallachse herausgeschnitten sind. Die feingeläpten Quarze werden zu einer Säule zusammengefasst und meist durch eine Federhülse vorgespannt [46].

Der Quarz (SiO_2) besitzt die Eigenschaft, bei mechanischer Beanspruchung an bestimmten Kristallflächen elektrische Ladungen zu erzeugen, was als Piezoeffekt bezeichnet wird. Die Deformation des Kristallgitters ist der elektrischen Feldstärke genau proportional und bewirkt eine Dehnung oder Stauchung des Kristallkörpers. Man unterscheidet je nach Lage der Quarzkristallachsen zur einwirkenden Kraft folgende Piezoeffekte [46]:

- Longitudinaleffekt,
- Transversaleffekt,
- Schub- oder Schereffekt

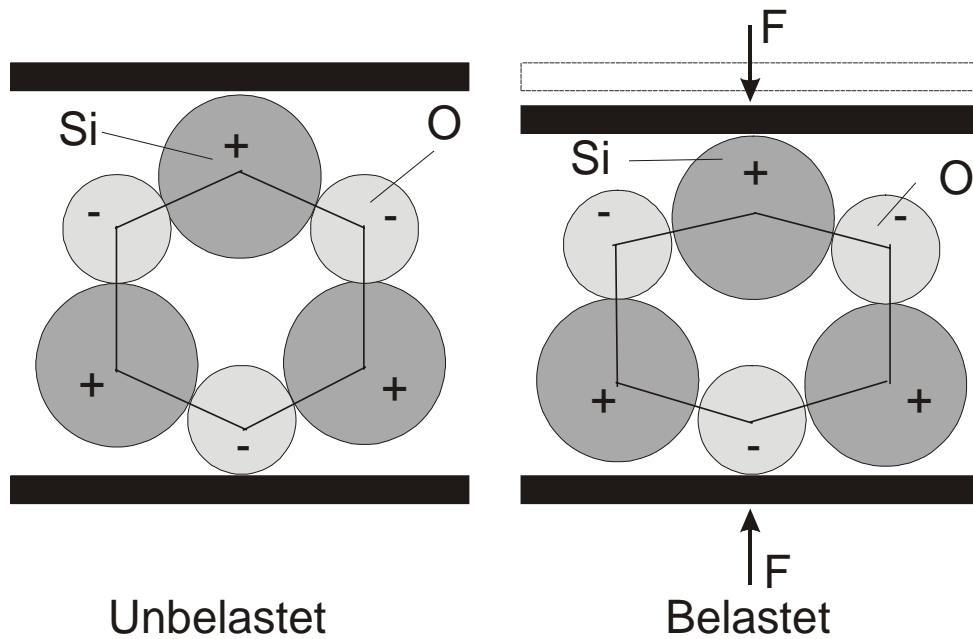


Bild 66: Prinzip des longitudinalen Piezoeffekts [46]

Die Größe der entstehenden Ladung hängt beim longitudinalen Piezoeffekt nicht von den geometrischen Abmessungen der Quarzscheiben, sondern allein von der aufbrachten Kraft F ab. Um die Ladungsausbeute zu erhöhen, werden mehrere Scheiben mechanisch in Reihe und elektronisch parallel geschaltet.

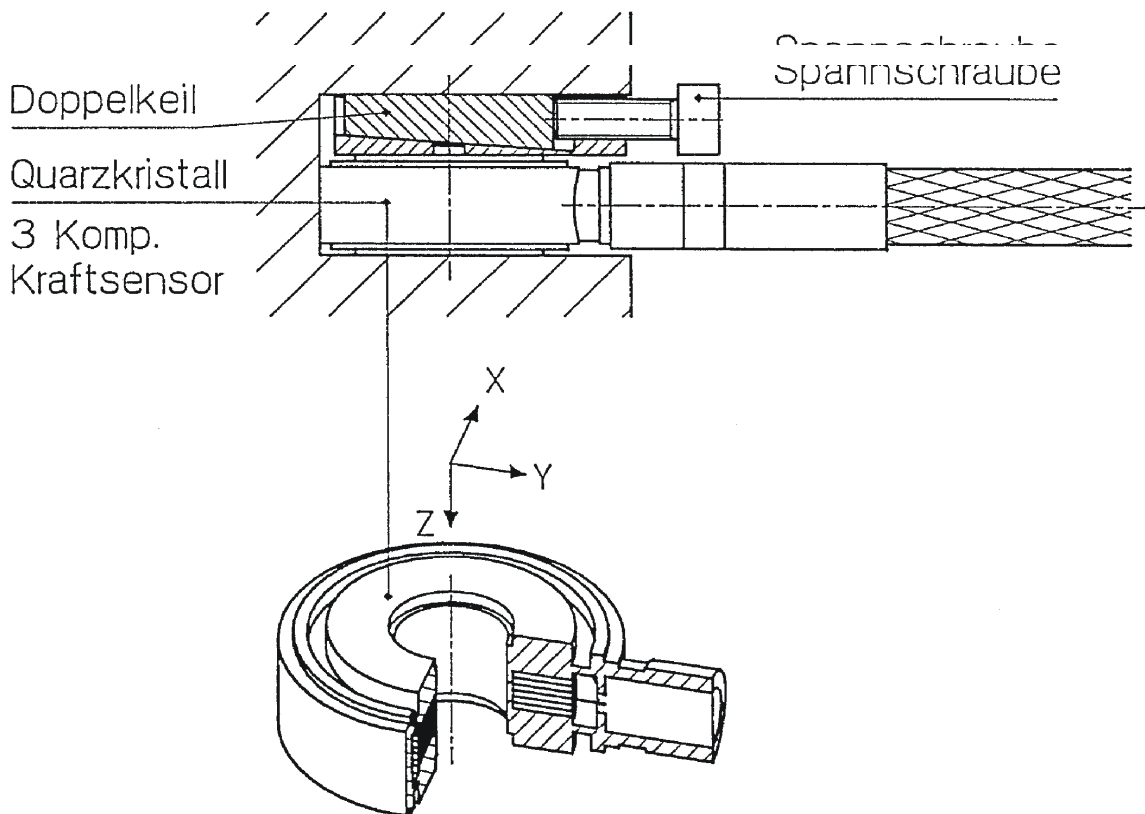


Bild 67: Mehrkomponenten-Kraftsensor und Montage mit einem Doppelkeil [112]

Für die Messung der Zerspankraft eignen sich Mehrkomponenten-Kraftsensoren, die im wesentlichen aus einem Stapel von Quarzkristall-Scheiben, die in ein Stahlgehäuse eingebaut sind bestehen. Durch die Verwendung verschiedener Quarzschnitte und Orientierungen der Scheiben, können mehrere Kraftkomponenten gleichzeitig gemessen werden.

Im Prinzip misst ein solcher Mehrkomponenten-Kraftsensor, die durch äußere Kräfte (Bearbeitungskräfte) erzeugten Dehnungen. Diese werden in axialer Richtung, d.h. in Richtung der Vorspannkraft, sowie als Schub um zwei dazu orthogonalen Achsen gemessen. Dieses ermöglicht, dass man mit dem Mehrkomponenten-Kraftsensor eine genaue Auflösung der Zerspankraft in seine räumlichen Komponenten ermitteln kann. Das Bild 67 zeigt den Einbau eines Mehrkomponenten-Kraftsensors und das Aufbringen der nötigen Vorspannkraft über einen Doppelkeil und eine Spannschraube. Das Kapitel 7.5.1 beschreibt die Anwendung dieser sehr präzisen Sensoren in einen Kraftmesssystem für die Drehbearbeitung.

5.3 Eigenschaften der Kraftmessung mit DMS

5.3.1 Verfahren zur Applikation von DMS

Voraussetzung für eine genaue Messung von piezoresistiven Sensoren ist es, eine feste Verbindung mit dem Messobjekt zu gewährleisten, um dessen Verformung ohne Verluste auf den DMS übertragen zu können. Für die Befestigung von DMS sind folgende Verfahren im Gebrauch [40]:

- Kleben
- Direktstrukturierung der Oberfläche
- Befestigung mit keramischen Mitteln.

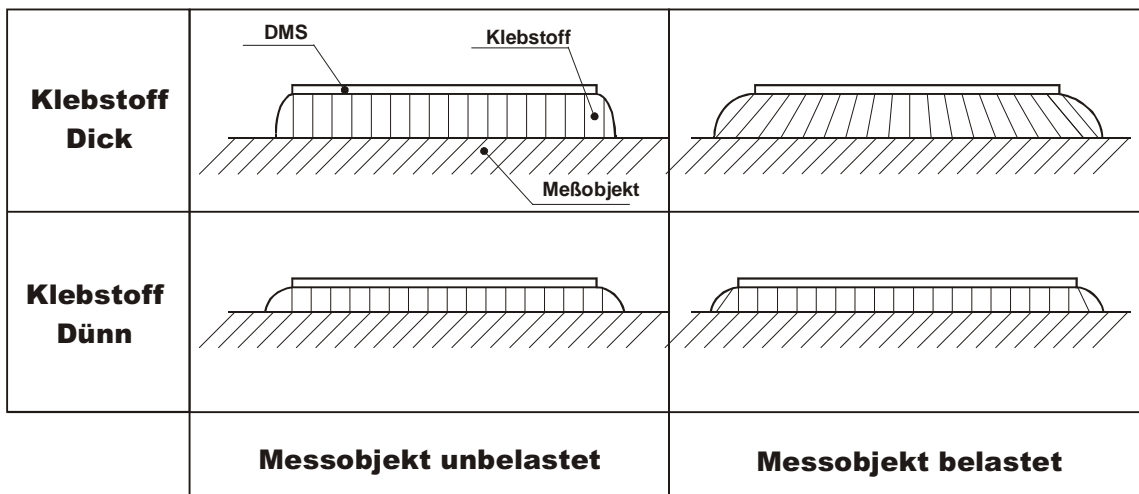


Bild 68: Dehnungsübertragung auf den DMS durch den Klebstoff [40]

In Hinblick auf die Anwendung hat sich das Kleben von DMS gegenüber den anderen Verfahren durch seine Vorteile wie:

- Verbindung von verschiedenen Werkstoffen
- keine Beeinflussung der zu verbindenden Werkstoffen

- geringe Feuchtigkeitsaufnahme
- hoher Isolationswiderstand zwischen DMS und Bauteil durchgesetzt.

Der verwendete Klebstoff muss die Dehnung des Messobjektes vollständig auf den DMS übertragen, da nur in diesen Fall die tatsächliche Dehnung des Messobjektes gemessen wird. Die zur Dehnung des DMS erforderliche Kraft wird von dem Messobjekt über die Klebstoffschicht übertragen, wobei eine Schubspannung in der Klebstoffschicht entsteht. Durch die Elastizität des Klebstoffs entsteht eine Verzerrung der Schicht (Bild 68) die wiederum zu unvollständigen Dehnungsübertragung führt. Dies wird durch Verwendung von hartem Klebstoff und dünnen Klebstoffschichten vermieden.

Um eine ausreichende Haftung zu erreichen, müssen die zu verklebenden Bauteile vorbehandelt werden.

5.3.2 Aufbau einer Wheatstoneschen Brückenschaltung

Für eine Messung mit DMS wird immer eine Wheatstonesche Brückenschaltung benötigt. Das Bild 69 zeigt eine Darstellungsweise der Wheatstoneschen Brückenschaltung. Legt man an die beiden Brückenspeisepunkte 2 und 3 eine Brückenspeisepannung U_B an, dann teilt sich diese in den beiden Brückenhälften R_1, R_2 und R_3, R_4 jeweils im Verhältnis der Brückenwiderstände auf, d. h. jede Brückenhälfte bildet einen Spannungsteiler [40].

Die am Brückeneckpunkt 1 anstehende Teilspannung u_1 errechnet sich zu

$$u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} * U_B \quad (18)$$

die am Brückeneckpunkt 4 anstehende Teilspannung u_4 zu

$$u_4 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} * U_B \quad (19)$$

Die Differenz zwischen den beiden Teilspannungen ist die Brückenausgangsspannung:

$$U_A = u_1 - u_4 = U_B \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (20)$$

Damit wird die auf die Brückenspeisepannung bezogene Brückenausgangsspannung:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (21)$$

oder

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (22)$$

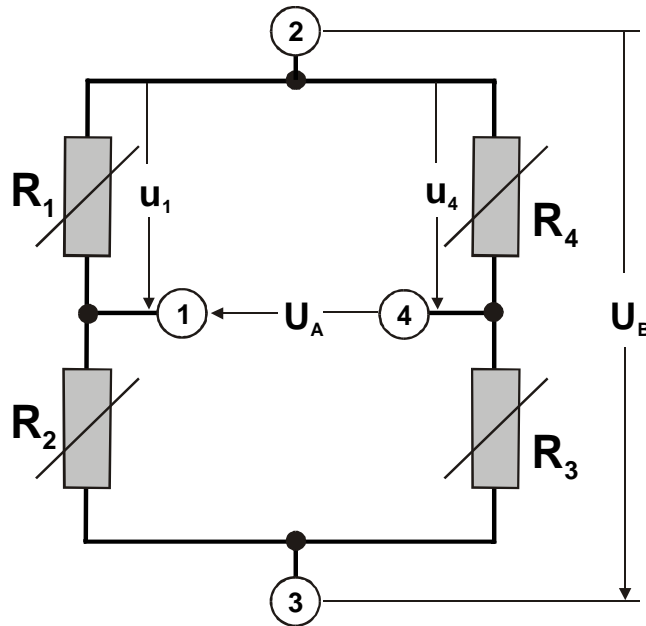


Bild 69: Prinzip einer Wheatstoneschen Brückenschaltung

Es existieren zwei Zustände, in welchen $U_A = 0$ ist:

- a) Alle Brückenwiderstände sind gleich groß
- b) Widerstandsverhältnisse beider Brückenhälften sind gleich

In der DMS-Technik sind die Beträge der Widerstandsänderung der metallischen DMS meist sehr klein und man benutzt die Näherungsgleichung:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (23)$$

Die Näherungsgleichung zeigt, dass die relative Widerstandsänderung jedes Brückenarms für die Brückenverstimmung maßgeblich ist und nicht die absolute Widerstandsänderung. Durch Umstellen der Näherungsgleichung erhält man:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (24)$$

Je nachdem, wie viele aktive DMS in der Wheatstoneschen Brückenschaltung verwendet werden, wird unterschieden zwischen:

- Vollbrücke, mit vier aktiven DMS
- Halbbrücke, mit zwei aktiven DMS
- Viertelbrücke, mit einem aktiven DMS

Das Bild 70 zeigt verschiedene Brückenschaltungen, die in der DMS-Technik angewendet werden.

Die Vollbrückenschaltung wird wegen ihrer günstigen Eigenschaften (automatische Kompensation von Störeffekten) vorzugsweise im Messgrößenaufnehmerbau angewandt. Die Viertelbrücke wird überwiegend in der experimentellen Spannungsanaly-

se verwendet. Der wesentliche Unterschied zwischen den verschiedenen Brückenschaltungen liegt in der Höhe der Messsignale und der Temperaturempfindlichkeit.

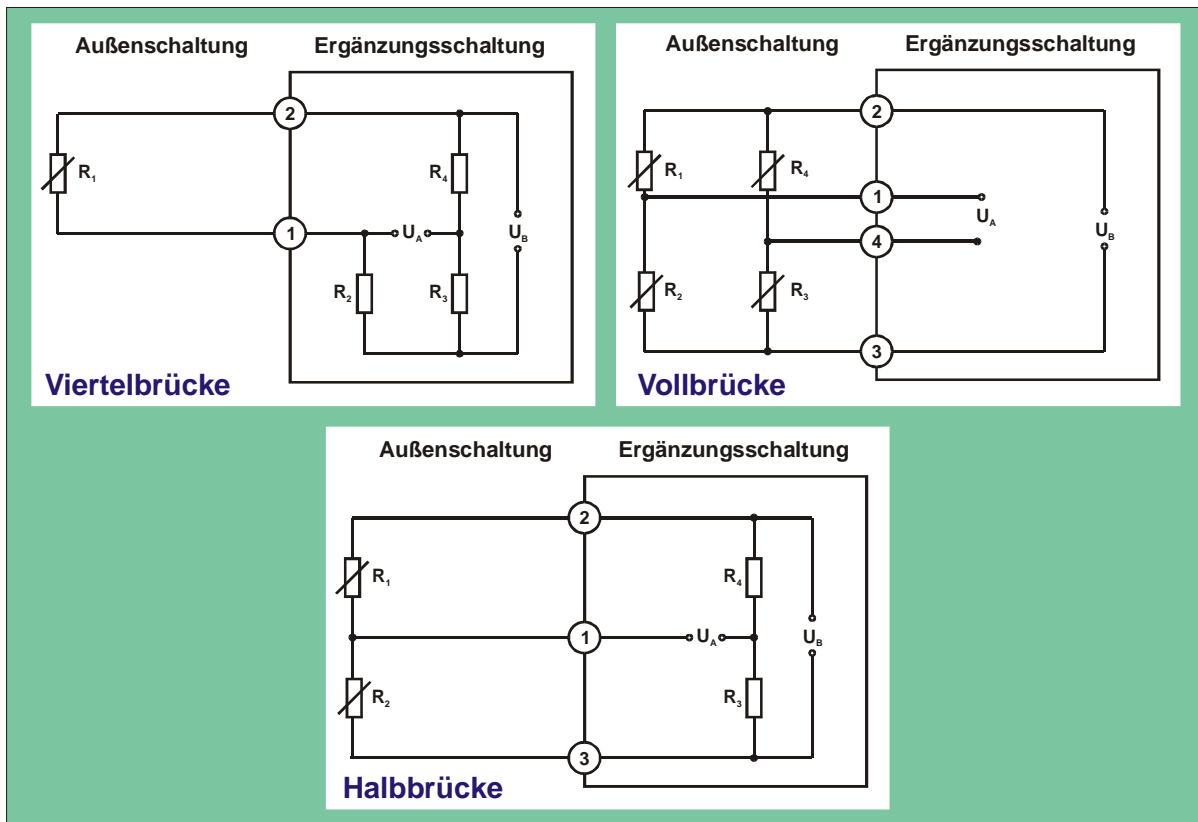


Bild 70: Anwendungsformen der Wheatstoneschen Brückenschaltung in der DMS-Technik [40]

5.3.3 Besonderheiten der 3D-Kraftmessung

Bestimmung der Matrixelemente

$$U_i = f_i(F_x, F_y, F_z)$$

		Schnittkraft	Vorschubkraft	Passivkraft
Sensor 1	$U_1 = n_{11} F_1 + n_{12} F_2 + n_{13} F_3$			
Sensor 2	$U_2 = n_{21} F_1 + n_{22} F_2 + n_{23} F_3$			
Sensor 3	$U_3 = n_{31} F_1 + n_{32} F_2 + n_{33} F_3$			
				$n_{31} = \frac{U_3}{F_1}$

$$\text{Schnittkraft} \quad F_1 = m_{11} U_1 + m_{12} U_2 + m_{13} U_3$$

$$F_2 = m_{21} U_1 + m_{22} U_2 + m_{23} U_3$$

$$F_3 = m_{31} U_1 + m_{32} U_2 + m_{33} U_3$$

Für die Berechnung der Kräfte aus den Sensorsignalen wird der Kehrwert der Matrix benötigt

$$\bar{U} = \bar{M} \bar{F} \longrightarrow \bar{F} = \bar{M}^{-1} \bar{U}$$

Bild 71: Zusammenhang zwischen Kraft und Sensorsignal [99]

Für die Ermittlung der Kräfte bei der Drehbearbeitung mit DMS-Technik sind drei Sensoren notwendig. Die Sensorsignale bestehen aus Spannungsänderungen, die auf Dehnungen und Stauchungen zurückzuführen sind. Aus den Folgenden mathematischen Zusammenhängen zwischen einer aufgetragenen Kraft und den gemessenen Sensorsignalen, kann mit einer 3x3-Matrix auf die Kenngrößen des Messsystems geschlossen werden.

In Bild 71 ist zu erkennen, dass jede Kraft von allen drei Sensorsignalen abhängt, d. h. jeder Sensor hat einen unterschiedlich gewichteten Einfluss auf eine Kraft. Dieser Zusammenhang ist in der Systemmatrix beschrieben. Zur präzisen Ermittlung dieser Komponenten muss eine Kraftkomponente aufgebracht werden, während die anderen Null bleiben. In folgender Beziehung wird beispielhaft das Element bestimmt, das den Anteil der Schnittkraft F_1 auf das Signal des Sensors 3 berücksichtigt:

$$\text{Sensor 3: } U_3 = n_{31} F_1 + n_{32} F_2 + n_{33} F_3$$

$F_1 = 1000 \text{ N}$
 $F_2 = F_3 = 0 \text{ N}$

\rightarrow

$n_{31} = \frac{U_3}{F_1}$

Weiterhin können die Kennlinien aller Sensoren ermittelt werden. Hier ist zu erkennen, dass die Signale über den gemessenen Bereich linear sind. Die neun Elemente der Systemmatrix entsprechen der Steigung der Kennlinien.

Aus den neun Matrixelementen der Systemmatrix kann man die optimale Position des Sensors bestimmen. Von jedem Sensor wird eine lineare Abhängigkeit erwartet und zwar für alle Zerspankraftkomponenten. Es wurde nachgewiesen, dass eine geringe Änderung des Sensorsignals über den Messbereich im Vergleich zu den anderen Komponenten, ungünstig für die Rückrechnung auf Kräfte ist [99]. In der Mathematik spricht man von schlecht konditionierten Gleichungssystemen:

Für das lineare Gleichungssystem $\overline{\overline{M}} \overline{\overline{F}} = \overline{\overline{U}}$ sei angenommen, dass $\det \overline{\overline{M}} \neq 0$, das System also lösbar ist. Ist die Determinante von $\overline{\overline{M}}$ nun aber nahe null, so werden numerische Lösungen unzuverlässig. Wichtig ist die Auswirkung von kleinen Fehlervektoren auf die Lösung des Gleichungssystems. Zur Beurteilung des Verhaltens eines linearen Gleichungssystems gibt es eine Reihe von Konditionsmaßen, die auf die Matrizennormen zurückgehen [133][146].

Auf der Grundlage der Hilbert- oder Spektralnorm, die die aussagekräftigste aber wegen Eigenwertberechnung auch aufwendigste Norm ist, wurde die Konditionszahl $k_0 = \frac{x_{\min}}{x_{\max}}$ definiert. x_{\min} bzw. x_{\max} sind der minimale bzw. der maximale Singulärwert der Systemmatrix $\overline{\overline{M}}$. Bei diesen Normen wird die Gaußsche Transformation $B = \overline{\overline{M}}^T \overline{\overline{M}}$ gebildet, die sich wegen rein reeller Matrixkoeffizienten zu $B = \overline{\overline{M}} \overline{\overline{M}}$ vereinfacht. Diese positiv (semi-)definite Matrix weist ihrer Eigenschaft nach positiv reelle Eigenwerte λ_i auf. Die Quadrate der Singulärwerte x_i^2 einer Matrix $\overline{\overline{M}}$ sind die Eigenwerte der Gaußschen Transformation $\overline{\overline{M}} \overline{\overline{M}}$.

Die Konditionszahl $k_0 = \frac{x_{\min}}{x_{\max}}$ bzw. die Singulärwerte erlauben auch die Abschätzung einer oberen Schranke der Fehlerauswirkungen bei schlecht konditionierten Gleichungssystemen.

chungssystemen, wie es $\overline{\overline{M}} \overline{F} = \overline{U}$ ist. Gehen die Vektoren \overline{U} in $\overline{U} + \overline{f_U}$ und \overline{F} in $\overline{F} + \overline{f_F}$ erhält man $\overline{\overline{M}} \overline{f_F} = \overline{f_U}$ bzw. $\overline{f_F} = \overline{\overline{M}}^{-1} \overline{f_U}$. Durch den Übergang zur Spektralnorm (Schrankennorm der Kehrmatrix) lässt sich eine obere Schranke für den Betrag des Kraft-Fehlervektors $\overline{f_F}$ angeben, hervorgerufen durch einen kleinen Spannungs-Fehlervektor $\overline{f_U}$ (nach [133]).

$$\|\overline{f_F}\| \leq \frac{1}{k_0} \frac{\|\overline{f_U}\|}{x_{\max}} = \frac{\|\overline{f_U}\|}{x_{\min}} \quad (25)$$

Anschaulicher und konkreter ist allerdings das einfache Einsetzen von Permutationen des Fehlervektors $\overline{f_U}$ in die Gleichung $\overline{M} \overline{f_F} = \overline{f_U}$. Unter Permutationen des Fehlervektors $\overline{f_U}$ sind die positiven und negativen Variationen mit dem maximalen Spannungsmessfehler zu verstehen. Die Koeffizienten der Systemmatrix des Sensorsystems werden aus 3 Kalibriermessungen bestimmt [133].

Das Bild 72 zeigt, dass das Auftreten einer geringen Änderung des Sensorsignals in der Systemmatrix zu erheblichen Fehlern führen kann. Bei Geraden, die sich unter einem kleinen Winkel schneiden, führt der geringe Ordinatenversatz der Geraden 2 zu einem erheblichen Versatz des Lösungspunktes des Gleichungssystems. Diese Fehler in der Systemmatrix führen zur Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Zerspankraft, deshalb ist es notwendig, eine optimale Sensorposition zu bestimmen.

Beispiel im 2-dimensionalen

Gleichungssystem $\overline{\overline{M}} \overline{F} = \overline{U}$

$$\begin{pmatrix} m_{1x} & m_{1y} \\ m_{2x} & m_{2y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix}$$

Gleichung 1 $m_{1x} F_x + m_{1y} F_y = U_1$

Gleichung 2 $m_{2x} F_x + m_{2y} F_y = U_2$

Fehlerbeaufschlagung $\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} U_1 + \Delta U_1 \\ U_2 \end{pmatrix}$

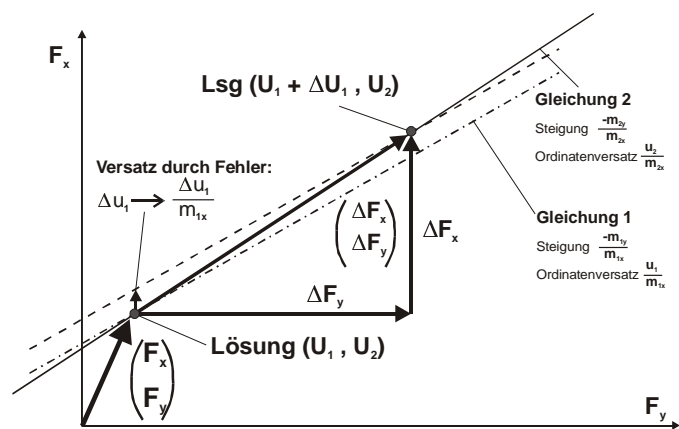


Bild 72: Verdeutlichung der Fehlerauswirkung schlecht konditionierter Gleichungssysteme [99]

Die erwarteten Messergebnisse sollten einen ähnlichen Verlauf haben wie er in Bild 73 links dargestellt ist. Sobald die Änderung des einen Sensorsignals für nur eine Kraftkomponente zu gering ist, kann nur unter großem Genauigkeitsverlust auf die aufgebrachten Kräfte zurückgerechnet werden. Ein nahezu senkrechter Kennlinienverlauf wie bei der Kraft F1 in Bild 73 bei Sensor 3 ist sehr ungünstig, da einer großen Kraftänderung nur ein kleiner Signalhub folgt. Das Ziel der Optimierung der Sensorpositionen war vor allen Dingen, auf eine gute Konditionierung der Systemmatrix zu achten.

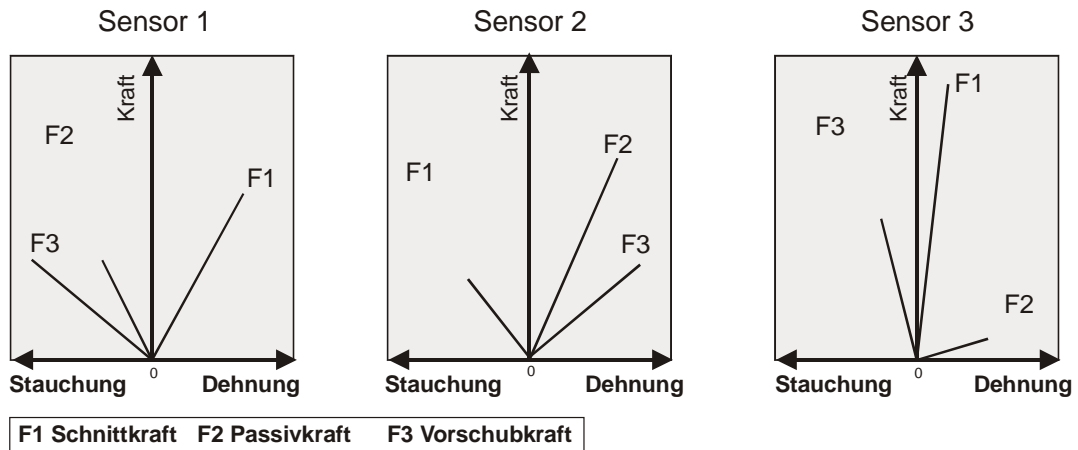


Bild 73: Zusammenhang zwischen Kraft und Sensorsignal

5.3.4 Kalibrierung eines Kraftmesssystems mit DMS

Um das Sensorsignalverhalten im Werkzeughalter zu ermitteln, ist es notwendig, definiert das Drehwerkzeug zu belasten. Hierzu bedient man sich einer Zugprüfmaschine, an der neben der Möglichkeit die Probe mit definierten Zugkräften zu belasten, auch die Möglichkeit besteht, Druckkräfte aufzubringen.

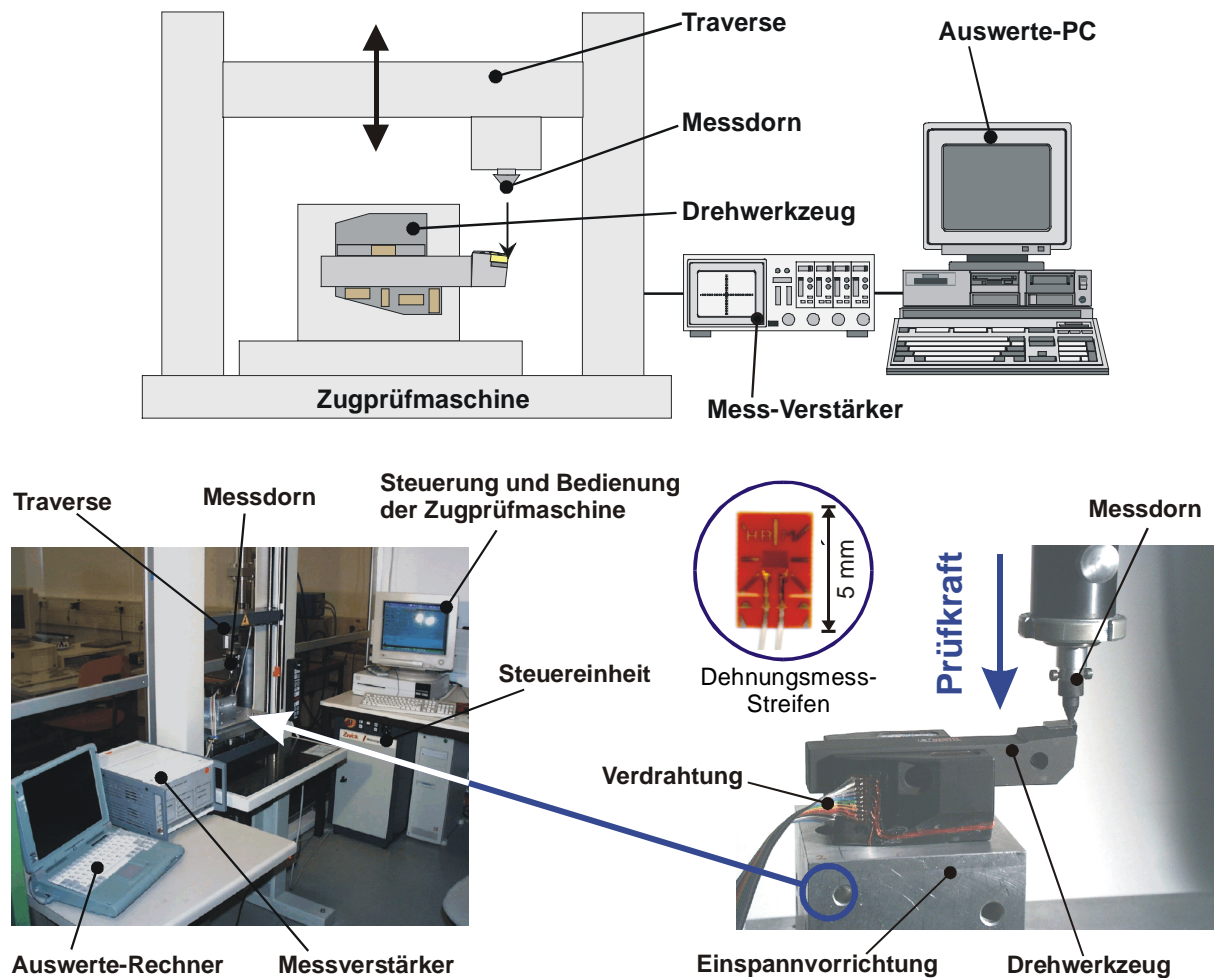


Bild 74: Belastung des Drehmeißel in der Zugprüfmaschine mit definierter Kraft

Dies wird bei den Versuchen genutzt und das Drehwerkzeug in Richtung der drei Zerspankraftkomponenten nacheinander belastet. Das Werkzeug wird in eine Vorrichtung einspannt, die speziell für diese Aufgabe konstruiert wurde, um dadurch eine Zerspankraftkomponente mit der gewünschten Intensität aufzubringen, wobei die anderen zwei Zerspankraftkomponenten null bleiben. Dies ist notwendig, um den Zusammenhang zwischen den aufgebrachten Kräften und den gemessenen Dehnungen, bzw. Stauchungen zu ermitteln. Die untere Hälfte in Bild 74 zeigt den Versuchsaufbau in der Zugprüfmaschine. Es ist die definierte Belastung des Drehmeißels in Vorschubrichtung dargestellt, wobei die Kraft in Schnitt- und Passivrichtung null ist.

Bei der Zugprüfmaschine ist nur die Möglichkeit gegeben, in einer Achse die Kraft aufzubringen, deshalb ist eine Vorrichtung erforderlich, die die Schneidplattenspitze für alle Belastungsrichtungen immer unter den Messdorn der Zugprüfmaschine positioniert. Die Vorrichtung besteht aus einer Platte, die fest auf der Zugprüfmaschine eingespannt wird und einen Würfel trägt, der in drei Positionen auf der Platte befestigt werden kann. Auf dem Würfel ist ein Aufnahmeschaft für den VDI-Werkzeughalter und verschiedene Bohrungen für die Passsstifte aufgebracht. Die Passsstifte auf der Platte und die Bohrungen auf dem Würfel sind so konstruiert, dass der Messdorn der Zugprüfmaschine genau in Richtung der Zerspankraft angreift.

Bei der Bearbeitung greifen die Kräfte an der Kante der Wendeschneidplatte an und erschweren dadurch die Messung mit Standard-Wendeschneidplatten. Es wurden spezielle Einsätze angefertigt, die ein Platzieren des Messdorns genau an der Position der realen Schneidenspitze ermöglicht.

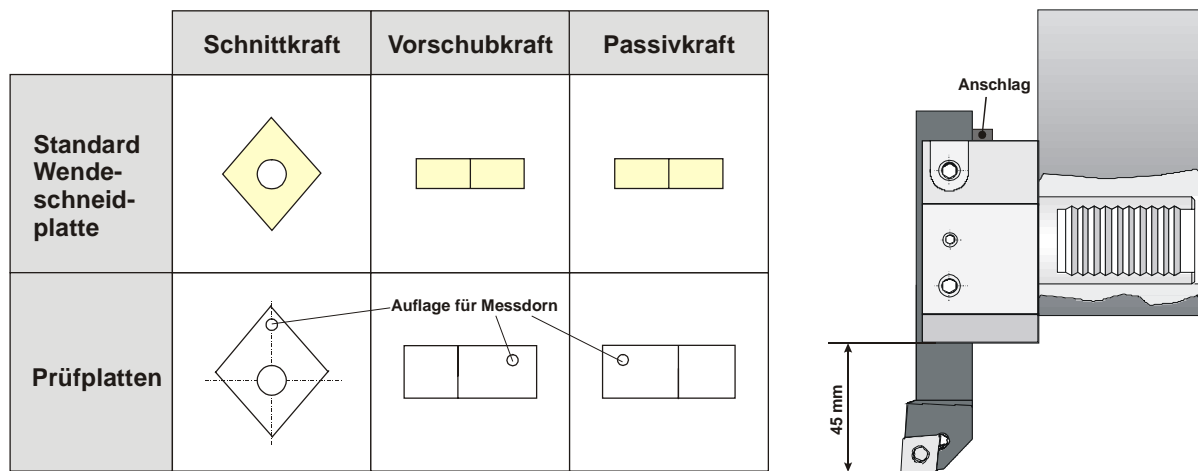


Bild 75: Ausrüstungselemente für Messungen in der Zugprüfmaschine

Neben der Vorrichtung und der speziellen Anfertigung der Wendeschneidplatten ist eine exakte Einspannlänge des Drehmeißels notwendig. Dabei wird für die Kraftmessung auf der Sensorplatte das DMS-Prinzip verwendet. Dies setzt aber voraus, dass alle Werkzeuge das gleiche Biegeverhalten bei gleicher Kraft vorweisen. Vor allen Dingen ist die Einspannlänge der wesentliche Parameter. Eine größere Einspannlänge bewirkt einen längeren Hebelarm und somit eine größere Sensordehnung/-stauchung bei gleicher Belastung.

In Bild 75 rechts ist zu sehen, dass die erforderliche Einspannlänge des Drehmeißels im Halter 45 mm beträgt. Die Einspannlänge ist von der unteren Fläche des Werkzeughalters d. h. von der Drehmeißelauflage bis zur Schneidplattenspitze gemessen. Ein Anschlag am Meißel stellt die gleiche Einspannlänge, auch bei unterschiedlichen Werkzeugen des gleichen Typs sicher.

Dieses Vorgehen gilt ebenfalls für das in Kapitel 7 beschriebene multisensorielle Überwachungssystem, das eine Anwendung der Mechatronik für intelligente Drehmeißel darstellt.

6 Analyse von Schwingungssignalen

6.1 Vergleich verbreiteter Signalauswerteverfahren

Für die Auswertung von Schwingungssignalen existiert eine große Anzahl unterschiedlicher Verfahren. Prinzipiell kann unterschieden werden zwischen:

- Kennwertüberwachungen und
- Diagnoseverfahren

Bei der Kennwertüberwachung wird aus dem Schwingungssignal ein für die Schadenserkennung geeigneter Kennwert gebildet. Die zu überwachende Maschinenteile werden dann regelmäßig auf die Überschreitung eines vorgegebenen Alarms überprüft. Voraussetzung für eine zuverlässige Überwachung mit Kennwerten sind gleichbleibende Betriebsbedingungen, also gleiche Last und Drehzahl. Schwingungen anderer Maschinenteile können die Kennwertüberwachung erschweren, so dass die zu detektierenden Schäden nicht zu erkennen sind. Zu den Diagnoseverfahren der Schwingungsanalyse gehören unter anderem [26]:

- Amplitudenüberwachung
- Spektralanalyse
- Stochastische Verfahren
- Autokorrelation
- Cepstrumanalyse
- Hüllkurvenanalyse

6.1.1 Amplitudenüberwachung

Die Amplitudenüberwachung ist ein sehr einfaches Verfahren, in dem die Frequenz keine Rolle spielt. Hier wird ausschließlich die Höhe des Ausgangssignals des Vibrationssensors betrachtet. Dieses Verfahren ist zum Erkennen von Kollisionen geeignet, wenn sichergestellt ist, dass unabhängige Ereignisse, wie Werkzeugwechsel nicht als Kollisionen aufgefasst werden und so Fehlalarme auslösen.

6.1.2 Spektralanalyse

Bei den Untersuchungen im Frequenzspektrum des Schwingungssignals werden die Amplituden bewertet. Die Amplitude wird bei einem Schadensfall erhöht. Für die Überwachung von Wälzlagerschäden ist diese Methode ungeeignet, da der Schaden nur im Endstadium erkannt wird [26].

6.1.3 Stochastische Verfahren

Wahrscheinlichkeitskenngrößen des Schwingungssignals, wie beispielsweise Streuungsmaße und höhere Momente der Wahrscheinlichkeitsdichte, können Hinweise auf mögliche Wälzlagerschäden geben. Bei diesem Verfahren werden die Mittelwerte des Schwingungssignals, wie das quadratische Mittel zur Überwachung eingesetzt. Der Crest-Faktor oder der Kurtosis-Faktor sind Kennwerte, die Abweichungen der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Schwingungssignals bewerten. All diesen Kennwerten ist gemeinsam, dass sie keine Aussage über Schadensort und Schadensart zulassen [26].

6.1.4 Autokorrelation

Eine Korrelationsfunktion gibt die Ähnlichkeit zwischen zwei Signalen in Abhängigkeit von der zeitlichen Verschiebung der Signale zueinander wieder. Die Fourier-Transformation der Autokorrelationsfunktion ist identisch mit dem Leistungsdichtespektrum. Die Ähnlichkeit der Signale wird bei der normierten Autokorrelation mit einer Zahl zwischen +1 und -1 bemessen. Der Wert +1 steht für die größte Ähnlichkeit, der Wert -1 für die größte Unähnlichkeit. Für den Zeitpunkt $t=0$ ist die normierte Autokorrelationsfunktion demnach immer 1. Einmalig auftretende Signalanteile tauchen in der Autokorrelationsfunktion nicht mehr auf. Auch völlig regellos auftretende Anteile sind zu vernachlässigen, wenn ihre Werte gegenüber denen des Nutzsignals klein sind. Die periodisch oder über einen längeren Zeitraum auftretenden Signalanteile bleiben dagegen erhalten. Dieses Verhalten der Autokorrelationsfunktion kann dazu genutzt werden, periodische Signalverläufe in einem durch Rauschen gestörten Signal zu erkennen.

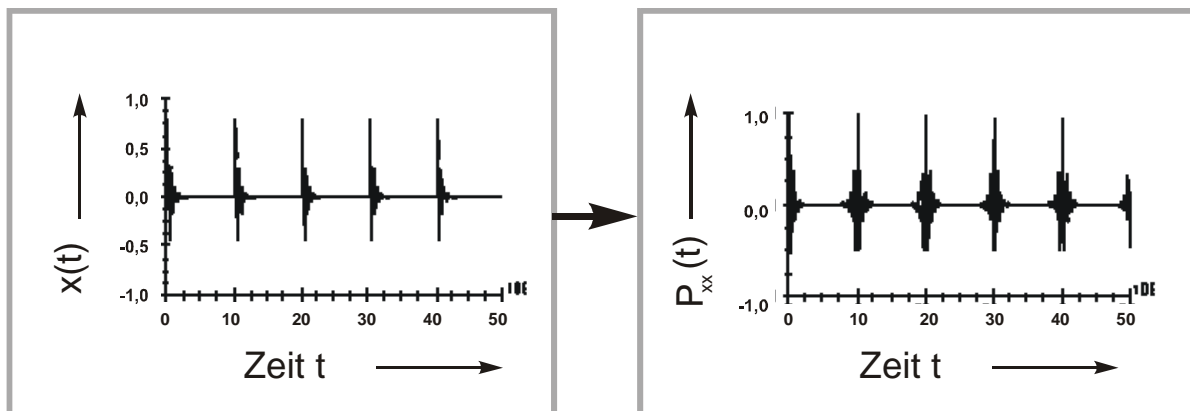


Bild 76: Durch Stoßfolge angeregte Resonanzschwingung und zugehörige normierte Autokorrelationsfunktion [26]

Bild 76 zeigt ein Beispiel der Signalauswertung mit Hilfe einer normierten Autokorrelation. Ein wesentlicher Nachteil dieses Verfahrens ist, dass bei stark gestörten Signalen oder schwachen Schäden die Erkennung des eigentlichen Signals nicht möglich ist.

6.1.5 Cepstrumanalyse

Der Begriff Cepstrum ist definiert als die Zeitfunktion, die durch Fourier-Syntese aus einem logarithmierten Spektrum entsteht. Das Cepstrum hebt jede Änderung oder Periodizität im Spektrum stark hervor. Ein häufig verwendetes Cepstrum ist das Leistungscpstrum. Hierbei wird das Leistungsspektrum logarithmiert und einer inversen Fourier-Transformation unterzogen. Bei der Auswertungen wird die Ordinate des Cepstrums als Quefrenz und die Abszisse als Gamnitude bezeichnet. Bei einem Schaden ist eine deutliche Steigerung der Gamnitude zu erkennen. Das Bild 77 zeigt ein Beispiel der Cepstrumanalyse an einen Schwingungssignal bei Wälzlagerschäden.

Das Cepstrum ist der Autokorrelation sehr ähnlich. Beides sind Zeitfunktionen, die durch Fourier-Syntese aus Spektren gewonnen werden können. Durch die Logarith-

mierung bei der Bildung des Cepstrums tauchen in der Praxis teilweise erhebliche Probleme auf, beispielsweise führen Nullstellen im Spektrum zu $\log(0)$. Starke Rauschanteile des Spektrums lassen sich im Cepstrum nicht sinnvoll interpretieren und stören eine Analyse erheblich.

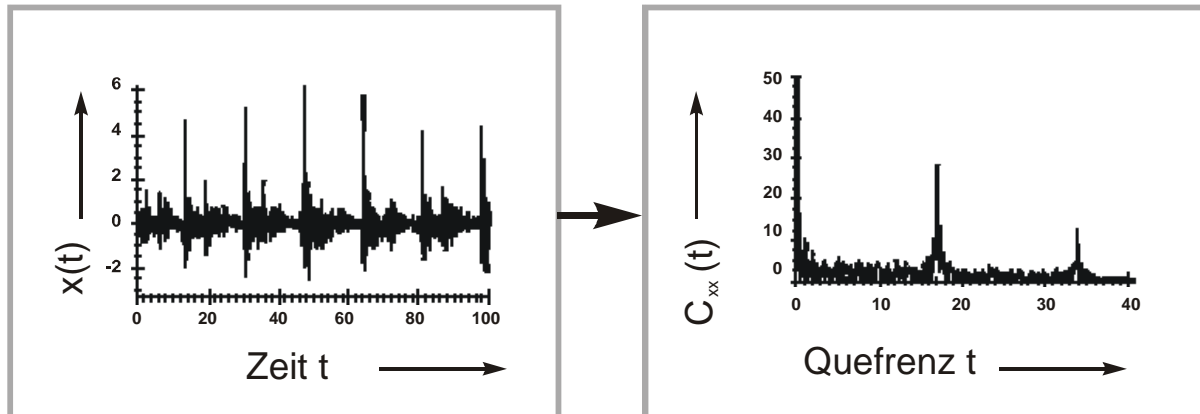


Bild 77: Schwingungssignal eines starken Wälzlagerschadens und das zugehörige Leistungscepstrum [26]

6.1.6 Hüllkurvenanalyse

Bei der Hüllkurvenanalyse wird für ein Signal nach einer geeigneten Filterung die Einhüllende des Signals gebildet und mit Hilfe der Fourier-Transformation das Spektrum erzeugt. Bei derartig gebildeten Frequenzspektren werden die Amplituden überwacht und bei einer Erhöhung dieser Amplituden ein bestimmter Schadensfall diagnostiziert. Das Bild 78 zeigt einen Signalverlauf vom Sensor bis zur Bildung eines Hüllkurvensignals.

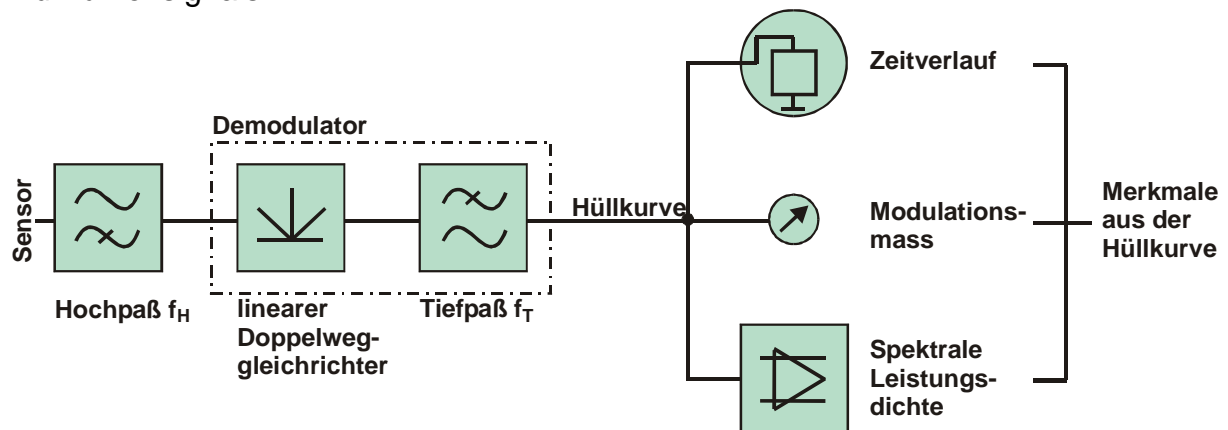


Bild 78: Verlauf eines Signals von der Entstehung bis zur Hüllkurve [27][53][119]

Die Bildung der Hüllkurve eines Signals kann zur Demodulation eines amplitudenmodulierten Signals verwendet werden und kann durch unterschiedliche Verfahren erfolgen, wie beispielsweise die Gleichrichtung mit Tiefpassfilterung. Der Sinn der Gleichrichtung bei der Demodulation ist die Trennung der Seitenbänder von der Trägerfrequenz. Die Gleichrichtung des Signals kann durch Einweggleichrichtung, Doppelweggleichrichtung oder durch Quadrierung erfolgen.

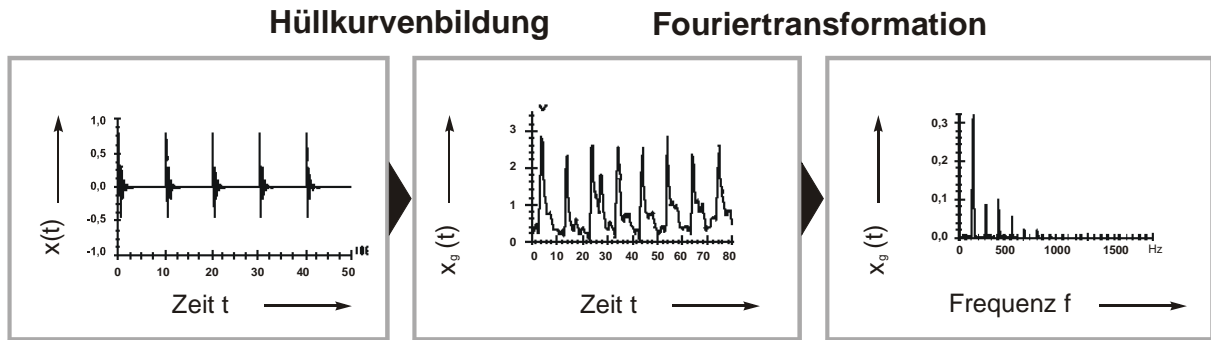


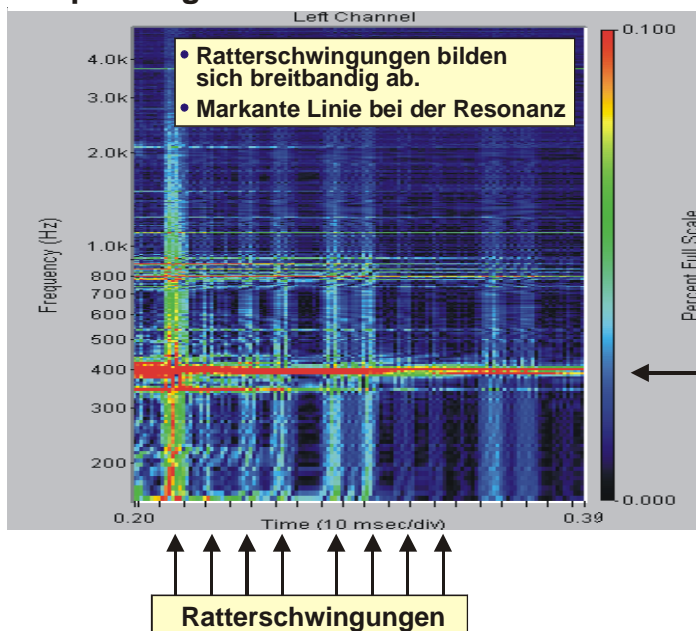
Bild 79: Durch Stoßfolge angeregte Resonanzschwingungen und die dazugehörige Hüllkurvenanalyse [25]

Das Bild 79 zeigt ein Beispiel der Hüllkurvenanalyse bei der Überwachung von Wälzlagerschäden. Da das Frequenzspektrum des Hüllkurvensignals eine exakte Erkennung und Bestimmung der Schäden selbst bei schwachen Signalen ermöglicht, hat sich dieses Verfahren überwiegend für Schwingungsüberwachungsaufgaben zur Schadensfrüherkennung durchgesetzt [27].

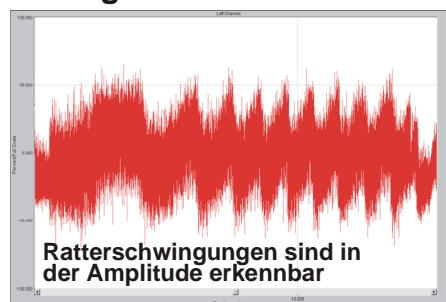
6.1.7 Schwingungen im Drehprozess

Schwingungen haben einen unerwünschten Einfluss auf den Drehprozess. Zum einen hinterlassen Schwingungen sichtbare Strukturen auf der Werkstückoberfläche und erhöhen erheblich die Rauigkeit, zum anderen werden die Werkzeugschneiden stärker beansprucht und verschleißten wesentlich schneller.

Frequenzsignal



Zeitsignal



Pfeifen (Resonanz)

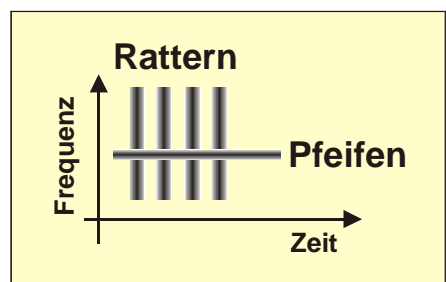


Bild 80: Unterschied zwischen Ratterschwingungen und Pfeifen

Bei dieser Form von Schwingungen spricht man in der Regel vom „Pfeifen“. Es existiert eine zweite Form, das „Rattern“, das die mechanischen Komponenten der Maschine stärker beansprucht, da die Schwingungsamplituden extreme Formen annehmen können.

In Bild 80 rechts unten sind die Unterschiede dargestellt, wie sich diese beiden markanten Schwingungsformen im Frequenzspektrum über die Zeit abbilden. Das Pfeifen äußert sich als Schwingen bei einer Frequenz und gleicher Amplitude. Die Ursache ist meist die Resonanz mit der Eigenfrequenz des Werkzeugs. Rattern ist eine stark wechselnde Amplitude über ein breites Frequenzspektrum. Die dynamischen Eigenschaften des gesamten Maschinenaufbaus sind hier ausschlaggebend [121]. Im dargestellten Frequenzspektrum im Bild ist gleichzeitiges Pfeifen und Rattern deutlich zu erkennen. Die horizontale Linie bei 400 Hz und 800 Hz ist resonantes Pfeifen, während die senkrechten Linien eine pulsierende Amplitude beschreiben. Auch das Auswerteverfahren für die Schwingungssignale ist ebenfalls unterschiedlich zu wählen. Das Rattern kann mit dem Hüllkurvenverfahren zuverlässig erkannt werden, wogegen das Pfeifen mit der Spektralanalyse ausgewertet wird.

6.2 Darstellung von Schwingungen im Zeit- und Frequenzbereich

Maschinenschwingungen äußern sich durch zeitlich veränderliche Bewegungen einzelner Maschinenpunkte, die sich entweder regelmäßig wiederholen, in einem einmaligen Vorgang abklingen bzw. aufklingen oder aber ohne feste Richtlinien verlaufen [3]. In Bild 81 ist eine Klassifizierung der wichtigsten Schwingungssignale dargestellt. Dabei sind die Schwingungssignale in determinierte und stochastische Signale unterteilt worden. Während die determinierten Signale alle durch mathematische Funktionen beschrieben werden können, sind die stochastischen Signale nicht eindeutig bestimmt. Die determinierten Signale können noch in periodische und nichtperiodische Signale gegliedert werden. Alle Signale in Bild 81 sind im Zeitbereich, d. h. die Amplitude wird über die Zeit dargestellt.

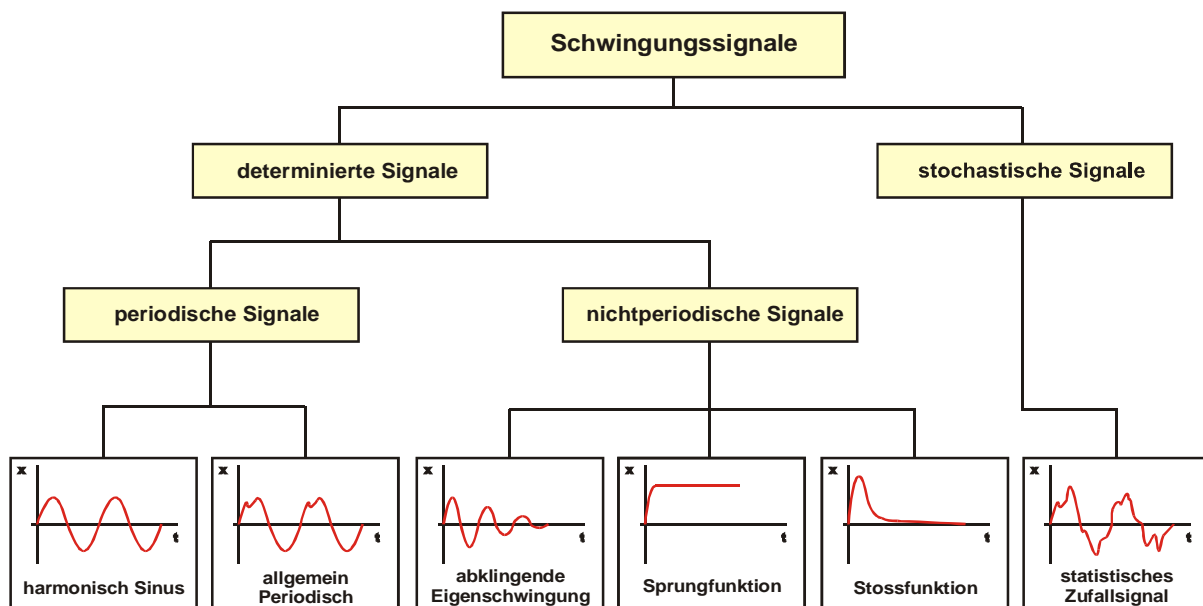


Bild 81: Klassifizierung von Schwingungssignalen [129]

Für eine bessere Interpretation der Schwingungssignale ist die Darstellung im Frequenzbereich aussagekräftiger. Die Eingangsgröße $F(t)$ und die Ausgangsgröße $x(t)$ wird im Frequenzbereich als $F(\Omega)$ und $x(\Omega)$ dargestellt, wobei:

$$\Omega = 2\pi f \quad (26)$$

die Kreisfrequenz ist. Diese Art der Darstellung bietet gewisse Vorteile wie beispielsweise die Erkennung der Frequenzanteile einer Schwingung. Die Methoden der Spektralanalyse werden seit langem in vielen verschiedenen Gebieten der Technik und der Wissenschaft angewandt und gehören zu den Standardwerkzeugen der Signalanalyse. Sie basieren auf der Tatsache, dass sowohl die zeitkontinuierlichen als auch die zeitdiskreten Systeme auf verschiedene Arten dargestellt werden können, zum Beispiel als Folge von Sinusfunktionen. Ein zeitdiskretes Signal erhält man aus einem zeitkontinuierlichen durch Abtastung. Die unterschiedlichen Prozesszustände bewirken Änderungen im Signal und seinem Frequenzspektrum [125].

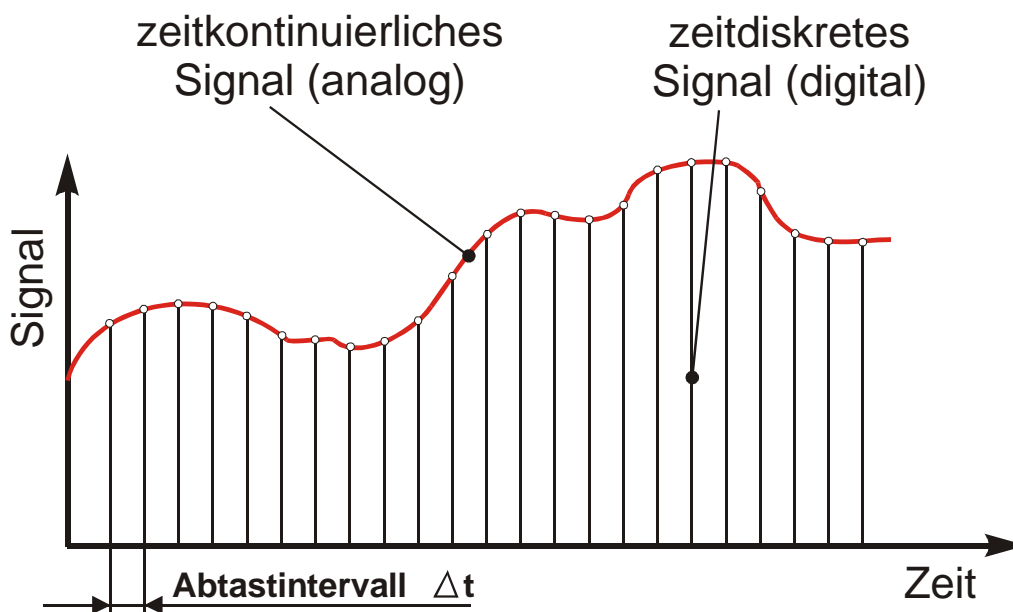


Bild 82: Unterschied zwischen zeitkontinuierlichem und zeitdiskretem Signal

Für die Transformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich sind folgende Methoden möglich:

- Diskrete-Fourier-Transformation (DFT),
- Fast-Fourier-Transformation (FFT),
- Kurzzeit Fourier-Transformation (STFT),
- Wavelet-Transformation etc.

Obwohl es heutzutage von der Rechenleistung her möglich ist, die Diskrete-Fourier-Transformation (DFT) durchführen zu lassen, wird sie kaum eingesetzt. Die Wavelet-Transformation bietet eine feinere zeitliche Auflösung, die spektrale Auflösung ist aber dafür in der Regel gröber. Von den aufgezählten Möglichkeiten wird in der Praxis die Fast-Fourier-Transformation (FFT) am häufigsten eingesetzt [56].

6.3 Spektralanalyse mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT)

6.3.1 Grundlagen

Der Grundstein für die Fourier-Transformation liegt in der mathematischen Darstellung der periodischen Funktionen als Summe von ganzzahlig harmonischen, sinusförmigen Schwingungen. Eine periodische Funktion $f(t)$ kann man im Allgemeinen durch eine Fourier-Reihe [9][31]:

$$f(t) = \sum_{v=1}^{\infty} [c_v \cos(v\omega_0 t + \varphi_v)] \quad (27)$$

darstellen, wobei ω_0 die Grundkreisfrequenz und c_v die Fourier-Koeffizienten sind. Man kann diese Gleichung auch in kompakter Form schreiben:

$$f(t) = \sum_{v=-\infty}^{\infty} C_v e^{jv\omega_0 t} \quad (28)$$

Ein periodisches Signal mit der Periode T besteht aus einer Summe von Teilschwingungen mit Frequenzen im Abstand $\Delta\omega = \omega_0 = 2\pi/T$. Mit $\omega_0 = \Delta\omega = 2\pi\Delta f$ lautet die Gleichung:

$$f(t) = \sum_{v=-\infty}^{\infty} \frac{C_v}{\Delta\omega} e^{jv\Delta\omega t} \Delta\omega \quad (29)$$

Aus $\omega_0 = \Delta\omega = 2\pi\Delta f$ ergibt sich $T\Delta f = 1$ und man erhält:

$$\frac{C_v}{\Delta f} = \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jv\Delta\omega t} dt \quad (30)$$

Im Grenzfall $T \rightarrow \infty$ wird aus dem periodischen Signal ein nichtperiodisches, und man erhält mit $v\Delta\omega = \omega$ die von ω abhängiger Funktion:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (31)$$

Die Gleichung (27) ist die Fourier-Transformation der nichtperiodischen Funktion $f(t)$. Bei der digitalen Signalverarbeitung ist in der Praxis das Signal zeitbegrenzt, da unendliche Zeitreihen nicht behandelt werden können und auch nicht zur Verfügung stehen. So entsteht dabei ein endlich abgetastetes Signal und dadurch eine endliche Fourier-Transformation. Weiterhin wird bei dieser endlichen Fourier-Transformation nur eine begrenzte Anzahl ausgewählter Frequenzen berechnet [9]. Dadurch entsteht aus der endlichen Fourier-Transformation eine diskrete Fourier-Transformation, wobei man die diskreten Frequenzen bezogen auf die Abtastfrequenz $\omega = (2\pi k)/N$ ($k=0, 1, 2, \dots, N-1$) wählt. Die Gleichung der Diskreten Fourier-Transformation wird folgendermaßen dargestellt:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (k=0, 1, \dots, N-1) \quad (32)$$

Um den Rechenaufwand zu reduzieren wurden Algorithmen entwickelt, die man unter der Bezeichnung Fast-Fourier-Transformation zusammenfasst. Besonders schnelle FFT-Algorithmen existieren für Zeitreihen, deren Umfang einer Zweierpotenz $N = 2^i$ ($i \in \mathbb{N}$) entspricht [9].

Für die Anwendung der Fast Fourier-Transformation in der Praxis sind noch weitere Kenntnisse über die Charakteristik dieser Transformation erforderlich.

6.3.2 Abtastung und das Abtasttheorem

Zeitkontinuierliche Signale werden durch die zeitkontinuierliche Fourier-Transformation in den Frequenzbereich abgebildet. In der digitalen Signalverarbeitung liegt ein Signal immer abgetastet vor, wobei dafür die zeitdiskrete Fourier-Transformation verwendet wird [9].

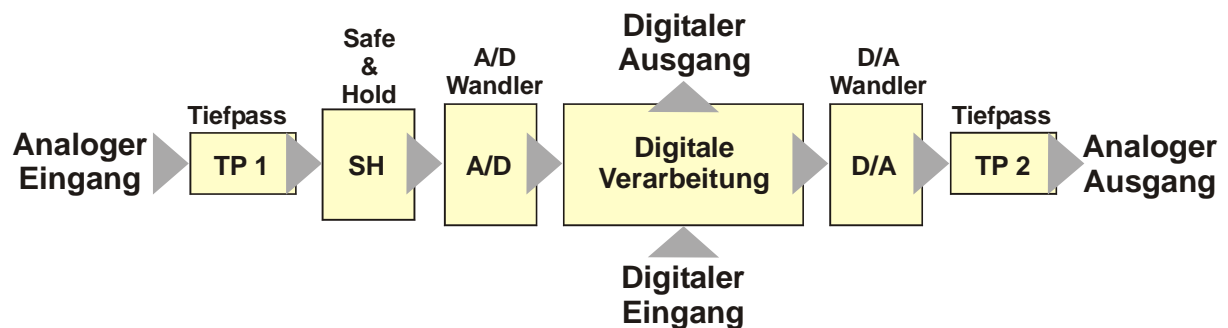


Bild 83: Blockschaltbild einer digitalen Signalverarbeitung [31]

In Bild 83 ist das Blockschaltbild einer digitalen Signalverarbeitung dargestellt. Ein analoges Signal wird durch einen analogen Tiefpass gefiltert. Anschließend wird das Signal mit der Abtasthalteschaltung SH (Safe&Hold-Glied) zeitdiskretisiert und über eine Abtastperiodendauer T festgehalten. Die Abtastwerte werden dann amplitudenquantisiert (A/D-Umsetzer). Die so gewonnene binäre Zahlenfolge gelangt dann zu der digitalen Verarbeitungseinheit. Sind für weitere Anwendungen digitale Signale erwünscht, so steht ein digitaler Ausgang nach der Signalverarbeitung zur Verfügung. Benötigt man dagegen für die Weiterverarbeitung ein analoges Signal, so muss das Signal nach dem D/A-Wandler noch einen analogen Tiefpass durchlaufen [9]. Die Voraussetzung für eine eindeutige zeitdiskrete Signaldarstellung ist, dass das Spektrum des analogen Signals bandbegrenzt ist. Wenn die Bandbegrenzung nicht vorliegt, muss sie durch ein analoges Vorfiltern erzwungen werden [31]. In der Praxis werden deshalb zeitkontinuierliche Signale vor der Abtastung immer durch eine Tiefpassfilterung bandbegrenzt [9].

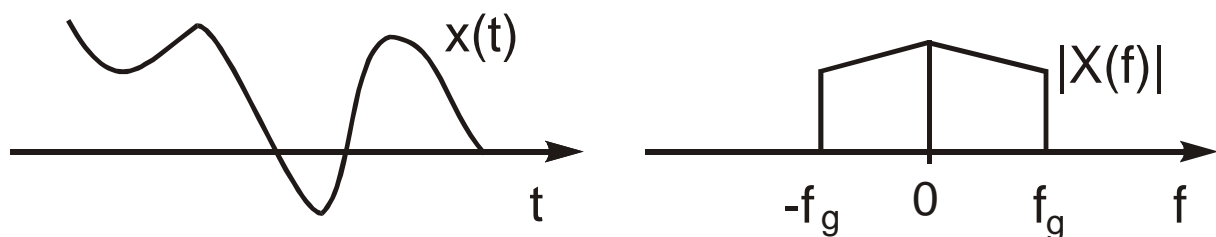


Bild 84: Zeitverlauf und Amplitudenspektrum eines bandbegrenzten Signals [31]

Das Bild 84 zeigt ein Beispiel für den zeitlichen Verlauf $x(t)$ und das Amplitudenspektrum $|X(f)|$ eines mit der oberen Grenzfrequenz f_g bandbegrenzten Signals [31]. Daraus ist zu erkennen, dass sich das Signal nicht sprunghaft ändern kann, da nur Schwingungen bis zu bestimmten Frequenzen im Signal enthalten sind. Deshalb ist es für die vollständige Beschreibung des Signals ausreichend, in gewissen periodischen Zeitabständen Abtastwerte zu entnehmen.

Weiterhin ist es wichtig, das **Abtasttheorem** bei der Abtastung zu berücksichtigen. Nach dem Abtasttheorem ist eine analoge bandbegrenzte Signalfunktion $x(t)$ vollständig bestimmt, wenn sie in äquidistanten Zeitabständen:

$$T_{abt} < \frac{1}{2f_{max}}, \quad (33)$$

das heißt, mit einer Frequenz abgetastet wird welche mehr als das Doppelte der maximal auftretende Signalfrequenz beträgt [97]. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass nur bis maximal zu Hälfte der Abtastungsfrequenz ein Spektrum ermittelt werden kann. Wird so abgetastet, dass die Bedingung des Abtasttheorems nicht eingehalten wird, so wird dem Signal nicht die gesamte darin enthaltene Information entnommen [31]. Dabei ergibt sich eine Überlappung der Frequenzbänder, das sogenannte Aliasing.

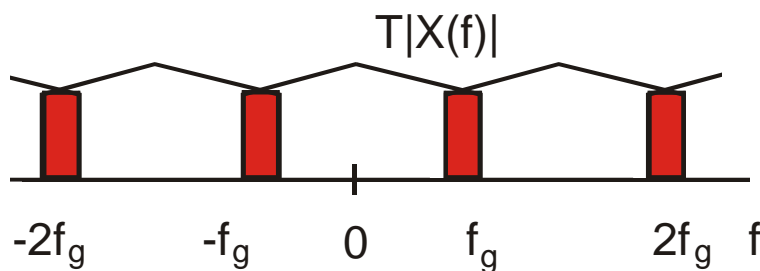


Bild 85: Überlappung der Frequenzbänder – Aliasing [31]

Bild 85 zeigt schematisch die Überlappung der Frequenzbänder bei zu niedriger Abtastfrequenz. In den Überlappungsbereichen müssen die einzelnen Anteile des Spektrums vor der Betragsbildung zuerst komplex addiert werden. Das ursprüngliche Analogsignal lässt sich nicht unverzerrt wiedergewinnen.

6.3.3 Fensterfunktion und deren Einfluss auf das Spektrum

Die Gleichung der Diskreten-Fourier-Transformation hat folgenden Aufbau:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (k=0,1,\dots,N-1) \quad (34)$$

Die Diskrete-Fourier-Transformation wird nicht mehr auf das Eingangssignal x_n , sondern auf ein Signal $x(k)$ angewendet. $x(k)$ ist im Zeitfenster $n=0,1,\dots,N-1$ gleich x_n und sonst null. Man spricht dann von Fensterung. Die Fensterung entspricht einer Multiplikation des Eingangssignals x_n mit einer sogenannten Fensterfunktion $w(n)$ (z. B. Rechteck-Fenster). Das Spektrum $X(k)$ ist aufgrund dieser Fensterung im

Allgemeinen nicht mehr gleich dem Spektrum der unendlichen Diskreten-Fourier-Transformation, da nur ein Teil des Signalverlaufs von x_n berücksichtigt wird. $X(k)$ ergibt sich aus der Faltung des Spektrums der unendlichen Diskreten-Fourier-Transformation mit dem Spektrum $W(n)$ der Fensterfunktion $w(n)$. Die digitale Auswertung des Spektrums $X(k)$ kann nur für endlich viele Frequenzpunkte M erfolgen. Diese Fensterung ist auch für die Fast-Fourier-Transformationen gültig [97].

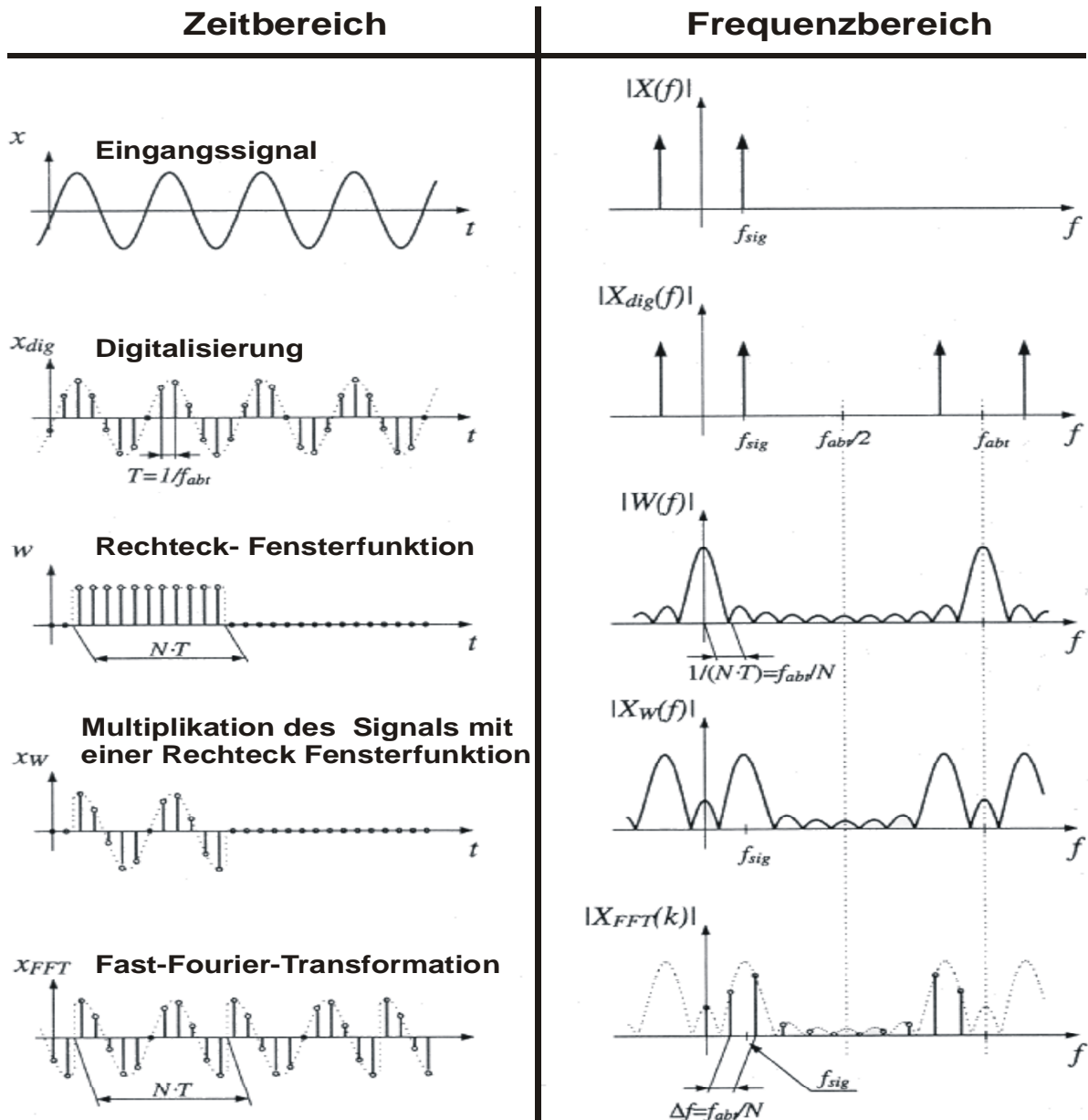


Bild 86: Darstellung der Signale und Spektren [97]

In Bild 86 ist der beispielhafte Verlauf eines sinusförmigen Signals der Frequenz f_{sig} und dessen Spektrum dargestellt. Das Signal wird durch eine Abtastung mit der Frequenz $f_{abt} = 6,66 f_{sig}$ digitalisiert. Vom digitalisierten Signal wird entsprechend der Triggerbedingung nur ein Abschnitt (hier $N=11$) gespeichert. Das Signal wird mit der rechteckigen Fensterfunktion multipliziert und die Fast-Fourier-Transformation auf diesen Signalausschnitt angewendet.

In der Fast Fourier-Transformation treten zusätzlich zwei negativ vorkommende Effekte auf:

Leckeffekt Dieser tritt beispielsweise bei einem reinen Sinussignal auf, das mittels der FFT transformiert wird. Dabei kann es vorkommen, dass keine der diskreten Frequenzen der Sinusfrequenz entspricht. Es können Spektrallinien angezeigt werden, die im Eingangssignal nicht vorhanden sind.

Lattenzauneffekt Dieser ist ein Amplitudenfehler. Dieser Fehler ist eine Folge des Leckeffekts, wobei man davon ausgeht, dass die größte angezeigte Spektrallinie die Amplitude des Eingangssignals ist.

Die Frequenzauflösung ist hauptsächlich durch die Fensterung bzw. die Anzahl der Punkte, die der Fast-Fourier-Transformation zugefügt werden, definiert. Dabei hat auch die Fensterlänge Einfluss auf das Spektrum. Erhöht man die Fensterlänge, dann wird das Spektrum der Fensterfunktion entsprechend gestaucht. In Bild 87 ist die Auswirkung auf die Breite der "Hauptkeule" in Abhängigkeit von der Fensterlänge dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass diese Breite indirekt proportional zu Fensterlänge N ist [97].

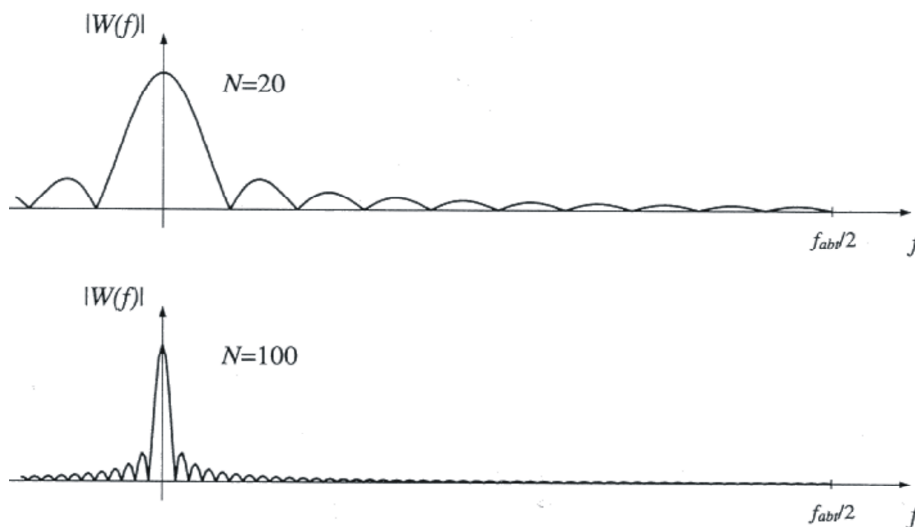


Bild 87: Der Betrag des Amplitudengangs einer rechteckförmiger Fensterfunktion in Abhängigkeit von der Fensterlänge N [97]

Neben der Fensterlänge kann man auch die Form der Fensterfunktion und somit ihren Amplitudengang beeinflussen. Je nach Messaufgabe ist die die am besten geeignete Fensterfunktion zu wählen. In Bild 88 sind die wichtigsten Formen der Fensterfunktionen und deren Spektrum dargestellt.

Die wichtigsten Formen der Fensterfunktionen sind:

Rechteckfenster Dies kann für Signale verwendet werden, bei denen kein Leckeffekt auftritt. Dieses ist bei synchronisierten Messungen mit periodischen Signalen gegeben.

- Hanning-Fenster** Dieses Fenster ist universell einsetzbar. Aus Bild 88 ist zu erkennen, dass die Hauptkeule relativ schmal und die Frequenzauflösung gut ist. Ein Nachteil des Hanning-Fensters ist die große Amplitudenunsicherheit von 15%, die die Anwendung dieses Fensters auf Messungen mit einer geringen Genauigkeitsanforderung beschränkt.
- 3-Term-Fenster** Dieses ist optimiert auf maximale Nebenkeulendämpfung. Die hohe Dämpfung führt zu einer größeren Amplitudenunsicherheit.
- Flat-Top-Fenster** Dieses Fenster ist geeignet für sehr genaue Messaufgaben, weil dabei mit einer Amplitudenunsicherheit von 0,028% gerechnet wird. Entsprechend ist die Breite der Hauptkeule größer als bei anderen Fensterformen.

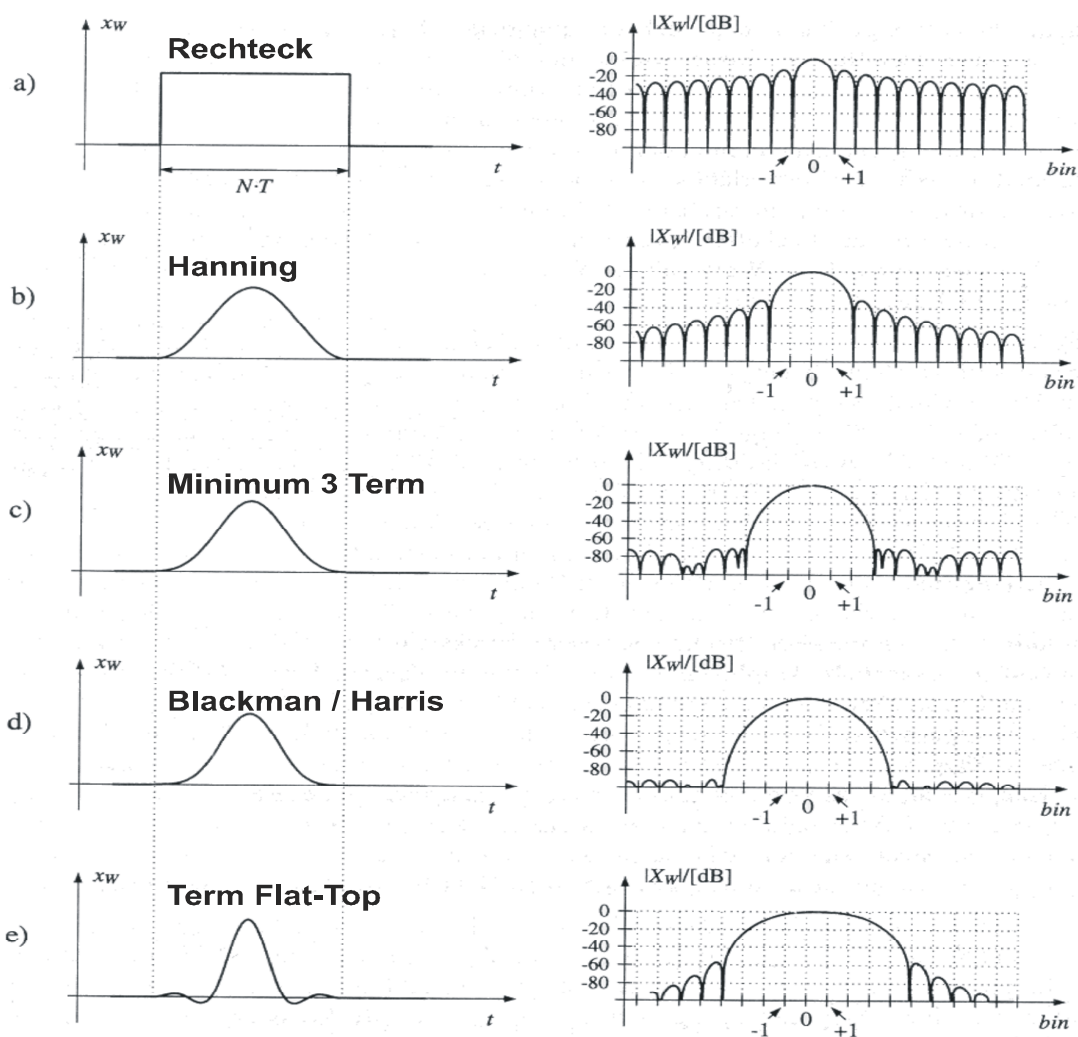


Bild 88: Für die FFT verwendete Fensterfunktionen [97]

In Tabelle 6 sind die Kennwerte der Fensterfunktionen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Rechteckfenster die höchste Nebenkeule und somit die geringste Dämpfung der Nebenkeulen hat. Die maximale Amplitudenunsicherheit und somit auch die maximale Breite der Hauptkeule weist das Flat-Top-Fenster auf.

Fensterfunktion	Höchste Nebenkeule [dB]	4 dB/6 dB Bandbreite [bin]	60 dB Bandbreite [bin]	max. Amplituden- Unsicherheit [%] / [dB]	Breite der Hauptkeule [bin]
Rechteck	-13	0,9 / 1,2	60 (40dB)	36 / 3,9	2
Hanning	-32	1,4 / 2,0	14	15 / 1,42	4
Minimum 3-Term	-71	1,6 / 2,3	6	12 / 1,12	6
Blackman/Harris	-94	1,9 / 2,6	8	9 / 0,81	8
Flat-Top	-57	4,3 / 5,2	12	0,028 / 0,002	10

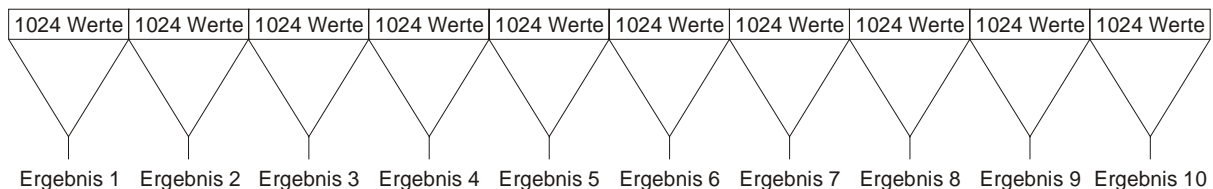
Tabelle 6: Die wichtigsten Kennwerte einiger Fensterfunktionen [97]

Die in Bild 88 und Tabelle 6 verwendete Einheit „bin“ bezeichnet N Stützpunkte im Frequenzraum, die sich nach einer FFT aus N Stützpunkten im Ortsraum abbilden. 0 bin entspricht dem Offset, 1 bin der Grundschiwingung, 2 bin der 1. Oberschwingung, 3 bin der 2. Oberschwingung usw.

Neben diesen aufgezählten Fensterfunktionen ist noch die Hamming-Fensterfunktion zu erwähnen. Bei dieser Anwendung ist mit einer 18% Amplitudenunsicherheit zu rechnen und einer sehr guten Dämpfung der Nebenkeulen. Diese Fensterfunktion wurde für einige Spektralanalysen der durchgeführten Messungen verwendet.

Die Fensterlänge bei der Fast-Fourier-Transformation ist durch die Zweierpotenz $N = 2^i (i \in \mathbb{N})$ vorgegeben. Liegt für die Fourier-Transformation eine größere Datenmenge vor, so wird diese nach Bild 89 zusammengefasst. Der Wert 1024 ist willkürlich gewählt worden, wobei man statt dessen jede Zweierpotenz wählen kann.

Zusammenfassen der Messwerte in Fenster (hier: 1024 Werte)



Überlappung der einzelnen Fenster von 50%

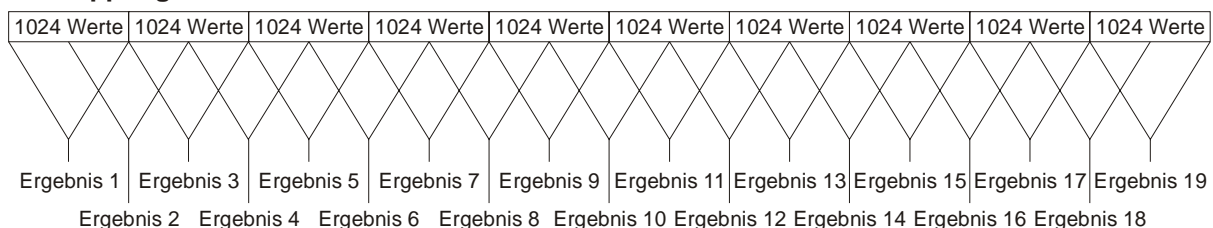


Bild 89: Erhöhung der Genauigkeit der FFT durch Überlappung

Um die Genauigkeit zu erhöhen kann man dazu übergehen, die betrachteten Bereiche zu überlappen. Dabei erreicht man eine feinere Auflösung, wobei der Rechenaufwand steigt. Die Darstellungen im Bild zeigen den Unterschied zwischen der Fast-Fourier-Transformation ohne Überlappung und mit einer Überlappung von 50%.

7 Entwicklung eines multisensoriellen Überwachungssystems für das Drehen

7.1 Aufbau und Struktur des Werkzeugüberwachungssystems

Kern der neuartigen Werkzeugüberwachung ist ein mechatronisches System zur Signalaufnahme der Kräfte in den drei Raumachsen, der Vibrationen (mit einem Mikrosystem) und der Temperatur in der Nähe der Wirkstelle am Klemmhalter. Um ein möglichst ungestörtes Signal zu erhalten wird der Abstand von Sensorik und Verstärker so klein wie möglich gehalten. Aus diesem Grund wurde ein 4-Kanal-Verstärker und A/D-Umsetzer als integrierte Schaltung realisiert, die auf dem Drehwerkzeug die Sensordaten verstärkt und sie seriell der benötigten Telemetrie zur Verfügung stellt. Auf der eingesetzten offenen Maschinensteuerung (SINUMERIK 840D) mit einem echtzeitfähigen digitalen Signalprozessor (DSP) übernimmt ein neuronales Netz die Auswertung der Sensorsignale durch Vergleich mit einem Prozessmodell. Das Erkennen von Kollisionen zwischen Werkzeug und Werkstück oder Maschinenkomponenten, die Brucherkennung sowie eine VerschleißEinstufung mit entsprechender Nachregelung der Werkzeugposition ist möglich.

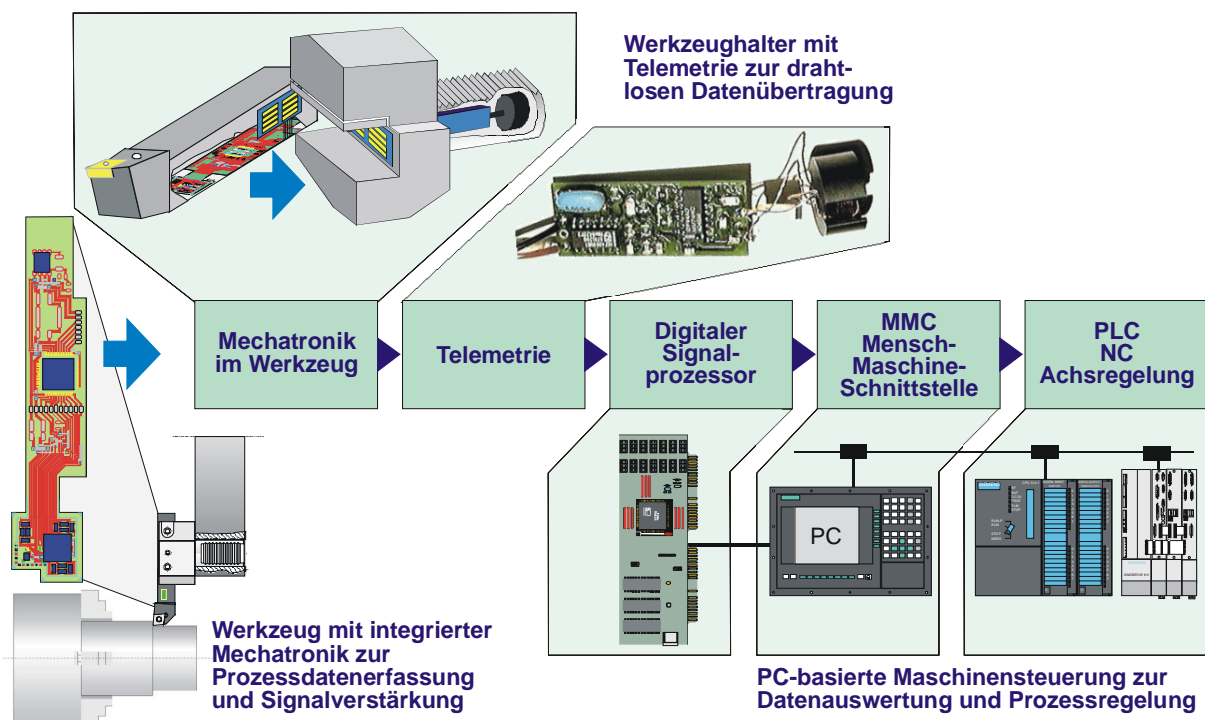


Bild 90: Hardwareaufbau und Struktur des Werkzeugüberwachungssystems

Das Messsystem ist auf der Unterseite des Klemmhalters appliziert und wird im Bereich der Sensoren lasergeschweißt, um einen optimalen Kraftfluss vom Klemmhalter auf die Sensorplatte zu erreichen. Weiterhin ist eine analoge Signalvorverarbeitung, eine Analog/Digital-Umsetzung und ein permanenter Speicher (EEPROM) für werkzeug- und sensorspezifische Daten integriert. Im Bereich vor der Einspannstelle ist mit den größten Dehnungen und Stauchungen zu rechnen (Bild 92). Dies ist

eine Voraussetzung für die Kraftsensorik auf Basis von Dehnungsmessstreifen (DMS) in Dickschichttechnologie. Ein wesentlicher Schwerpunkt ist die Messung von zwei unterschiedlichen Größen: der Zerspankraft und die Vibration in der Nähe der Prozessstelle. Die Temperatursensorik hat den Zweck die Temperaturdrift der DMS und des Vibrationssensors auszugleichen. Für eine Aussage über das Prozessverhalten ist das Temperatursignal zu träge. Ein wesentliches Ziel war es, eine zuverlässige Signalauswertung zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurde multisensoriell gemessen. Versuche haben gezeigt, dass nur eine einzige physikalische Größe oft eine Fehlinterpretation zulässt. Eine Reihe von Fehlalarmen hätte zur Folge, dass der Anwender als letzte Konsequenz das Überwachungssystem stilllegt.

7.2 Beschreibung der Komponenten der Sensorplatine

Auf Basis umfangreicher Voruntersuchungen mit konventioneller Sensorik wurden in Simulationen für die Außenbearbeitung beim Drehen der richtige Sensortyp und der optimale Anbringungsort ermittelt. Die Sensoren sind im Bereich der Einspannstelle des Klemmhalters im Werkzeughalter angebracht, da an dieser Stelle die elastischen Verformungen ihr Maximum erreichen.

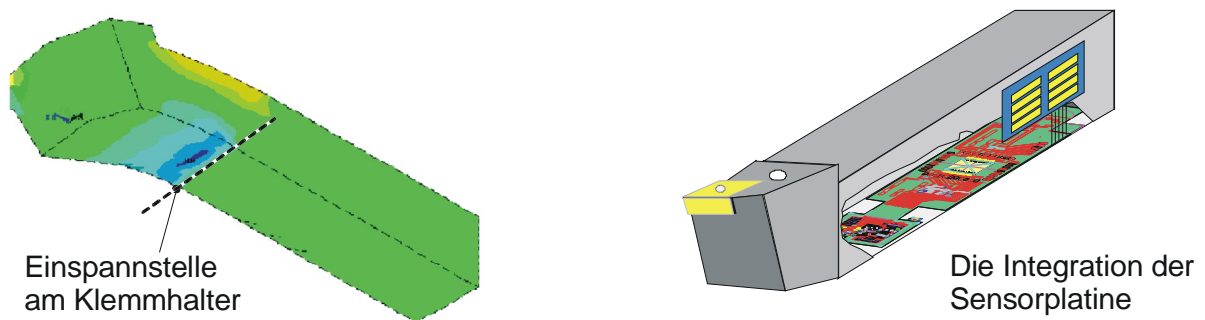


Bild 91: Einbauposition der Sensorplatine [100]

Die Kraftsensoren sind in Dickschichttechnologie ausgeführt und arbeiten nach dem piezoresistiven Effekt. Die Messbrücken bestimmen an drei verschiedenen Orten die unter Last hervorgerufenen Dehnungen, welche eine Widerstandsänderung bewirken. Der resultierende Spannungsabfall wird über eine Brückenschaltung abgegriffen. An jedem Sensorort verursachen alle drei Krafrichtungen anteilig Dehnungen. In den Signalen der Sensoren liegen demnach die zu extrahierenden Kraftanteile vermischt vor. Die mathematische Beschreibung führt zu einem linearen Gleichungssystem, um die drei Kräfte in Schnitt-, Vorschub- und Passivrichtung zu ermitteln

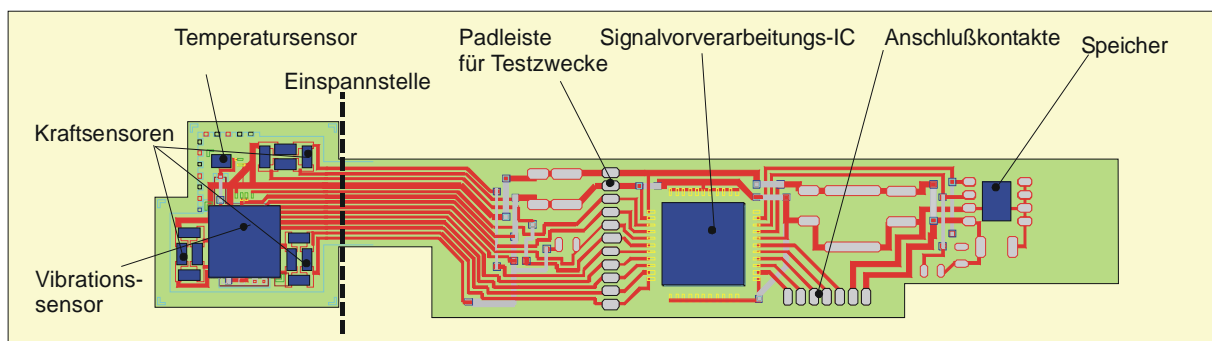


Bild 92: Layout der Sensorplatine [100]

Die bei der Realisierung der Kraftsensorik aufgetretenen Probleme, wie z. B. zu starker Temperaturgang, konnten in mehreren Entwicklungsstufen eliminiert werden. So wurden die piezoresistiven Widerstände von ursprünglich einer Halbbrücke zu einer Vollbrücke in der endgültigen Fassung verschaltet. Für die Kraftsensoren war das erste Ziel, die Anzahl der benötigten Dickschichtwiderstände möglichst gering zu halten. Letztlich war die Empfindlichkeit der Halbbrückenschaltung zu gering und der Temperaturgang zu groß. Die Temperatur wurde zusätzlich durch einen direkt neben den Kraft- und Vibrationssensoren aufgebundenen Temperatursensor erfasst. Mit diesem Messwert erfolgte die Kompensation des verbleibenden Temperaturgangs durch den Integrierten Schaltkreis (IC) zur Signalaufbereitung.

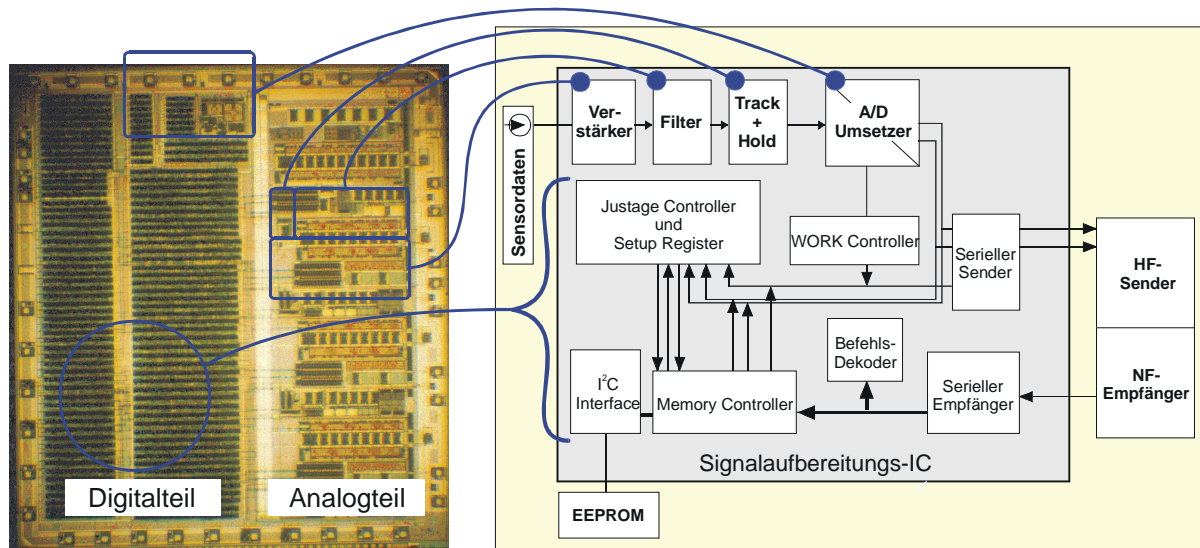


Bild 93: Fotografie und Blockschaltbild des Signalaufbereitungs-IC's [100]

Die analogen Komponenten des Signalaufbereitungs-IC (Bild 93) bestehen aus Schaltungen zur Aufnahme und Verstärkung der Sensorsignale, Filtern zur Bandbegrenzung, Abtasthaltegliedern und einem A/D-Umsetzer. Sie bereiten die Ausgangssignale der drei Kraftsensoren, des Vibrations- und des Temperatursensors auf. Der Analog/Digital-Umsetzer (ADU) arbeitet nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation mit Ladungsumverteilung. Er hat eine Auflösung von 10 Bit und eine maximale Abtastrate von 100 kHz. Die Sensorsignale werden im Zeitmultiplex an den ADU angelegt. Es resultiert eine Abtastrate von 16 kHz für jeden Kraftsensor, 32 kHz für den Vibrationssensor und 8 kHz für den Temperatursensor.

Ein serieller Sender ist für die Übertragung der digitalisierten Messdaten an den Hochfrequenz-Sendechip der Transponder-Einheit zuständig. Der serielle Empfänger dient zum Datenempfang des PC der CNC-Steuerung. Dies sind entweder Steuerbefehle an das mechatronische Sensorsystem oder Daten, die im EEPROM der Sensorplatine abgelegt werden und auch Daten zur Werkzeugidentifikation, Kalibrierdaten der Sensoren sowie Daten bekannter Verschleißgrößen.

7.3 Drahtlose Daten- und Energieübertragung

Die Energieversorgung der Sensorplatine erfolgt über die magnetische Feldkopplung zweier Induktivitäten. Sender- und Empfängerspule werden durch Kapazitäten zu

Resonanzkreisen ergänzt. Im Senderkreis wird dem niederfrequenten Trägersignal das Datensignal mit Phasenumtastung (Phase-Shift-Keying) aufmoduliert. Der Empfängerkreis ist auf die Trägerfrequenz 125 kHz abgestimmt. Eine Nachlaufsynchronisationsschaltung regeneriert den Takt von 5 MHz und das Datensignal. Nach Gleichrichtung und Siebung im Empfängerkreis steht die Eingangsspannung für einen linearen Spannungsregler zur Verfügung, der einen Laststrom von 100 mA an das Sensorsystem abgeben kann (Bild 94).

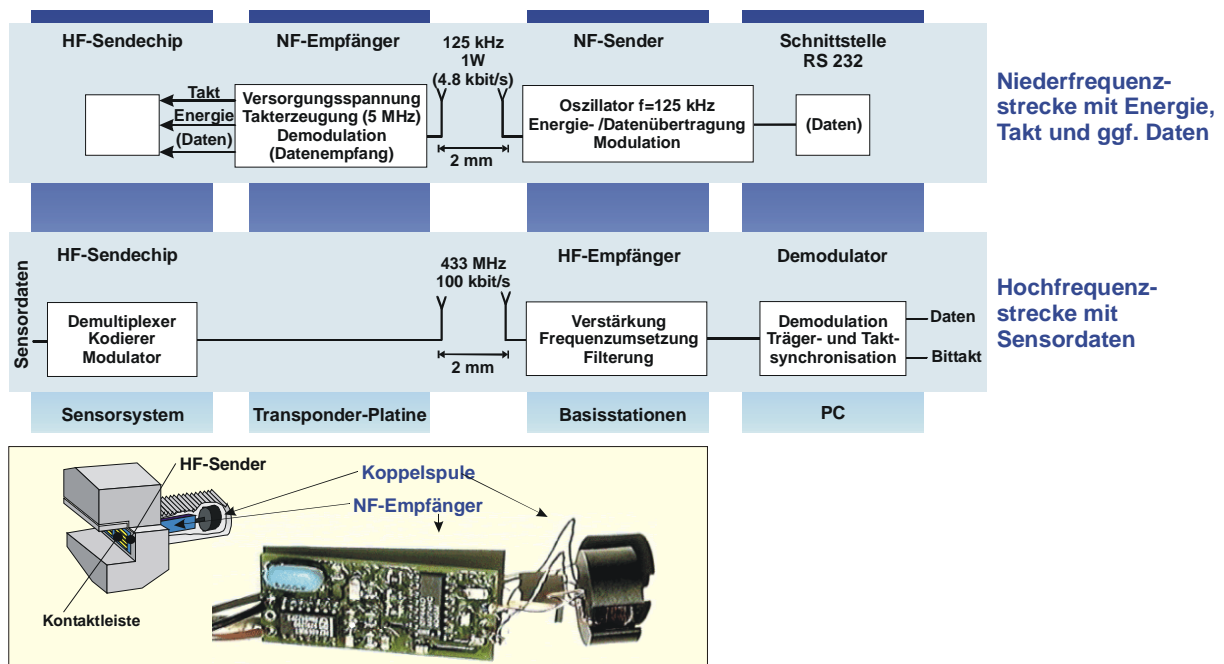


Bild 94: Aufbau der Hochfrequenz- und Niederfrequenzstrecke [100]

Die Hochfrequenz-Strecke ist für die Übertragung von Sensordaten zur Auswertestelle der CNC-Steuerung zuständig. Die Übertragungsrate beträgt 100 kbit/s für alle Kanäle bei einer Trägerfrequenz von 433 MHz. Im HF-Sender, der in den Werkzeughalter integriert ist, wird der zu übertragende serielle Datenstrom zunächst für die FSK-Modulation (Frequenz Shift Keying) kodiert. Das modulierte HF-Sendesignal wird über eine Koaxialleitung zu einer Schleifenantenne (Bestandteil der Koppelspule) geführt und ausgesendet. Der Sender wurde in einer $0,8\ \mu\text{m}$ BiCMOS-Technologie implementiert und besitzt einfachen Aufbau und geringe Störanfälligkeit.

Die drei von den Sensoren kommenden analogen Signale werden in drei ADU's (Analog/Digital Umsetzer) mit je 10 Bit Auflösung digitalisiert. Die 10 Bit breiten ADU-Ausgangsdaten werden in Speicher geschrieben und zusammen mit der Startcodierung und der Quersumme seriell ausgegeben. Dieser Datenstrom wird auf den FSK-Eingang der Oszillatorschaltung geführt und im 433 MHz ISM-Band (Industrial Scientific Medical) über eine Antenne zum Empfängerteil übertragen. Auf dem Demodulator-Board wird das Ausgangssignal des HF-Empfängers ins Basisband umgesetzt und demoduliert. Am Boardausgang stehen der serielle Datenstrom und das Bittakt-Signal wieder zur Verfügung.

Das Sendeteil besteht aus drei Elementen:

- 0,8 µm-BiCMOS-ASIC
(Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor - ASIC)
- 433 MHz Resonator
- Antenne

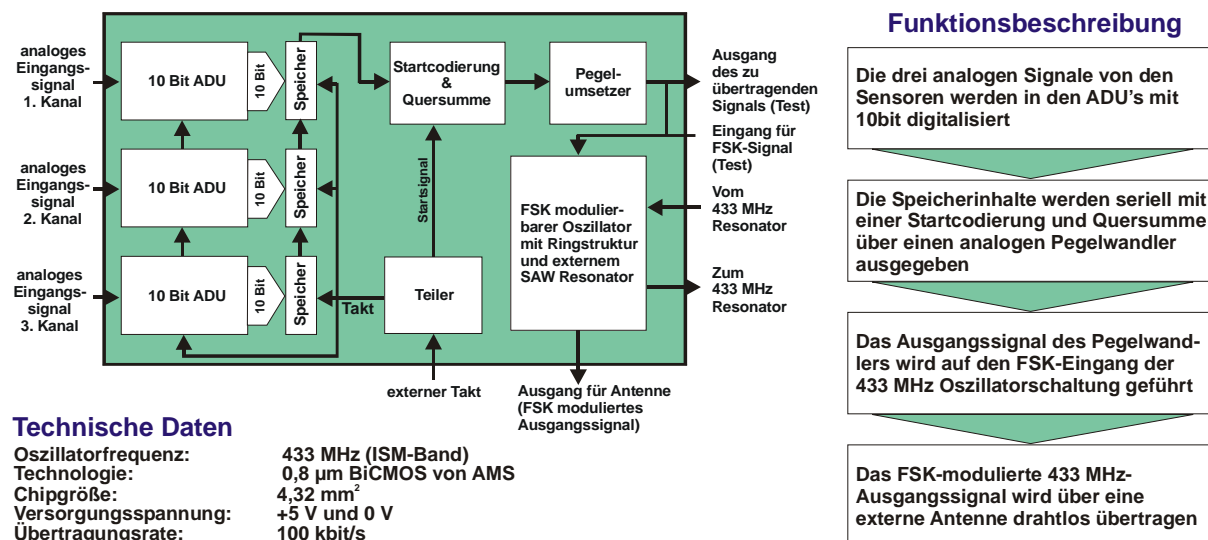


Bild 95: Blockschaltbild des SAW-Oszillators mit FSK-Logik und drei ADU's

In Bild 95 ist das Blockschaltbild des Sende-ICs dargestellt. Das ASIC besteht aus zwei Blöcken:

- drei 10 Bit ADU's und Logik zur seriellen Datenausgabe
- FSK modulierbarer 433 MHz Oszillator

7.4 Signalauswertung und Maschinenregelung

Die Ablaufsteuerung bearbeitet die durch die Signalauswertung erfassten kritischen Ereignisse und greift entsprechend direkt in den Zerspanprozess ein oder informiert den Bediener. Spezielle Eigenschaften dieses Systems sind die Erkennung eines Schneidenausbruchs mit dem automatisierten Wechsel auf ein Schwesterwerkzeug, die Erkennung einer Kollision mit selbständigem Abschalten der Maschine und die Beobachtung des Verschleißverhaltens des eingesetzten Werkzeugs mit entsprechender Bedienerführung und Steuerung der Maschine. Die Hauptaufgaben der Ablaufsteuerung sind die Koordination der Systemkomponenten und der Transfer der Daten zwischen Mikrosystem, DSP-Board und CNC-Steuerung. Die Offenheit der PC-basierten Maschinensteuerung SIEMENS SINUMERIK 840D wird hier genutzt.

Von der Ablaufsteuerung erfolgt die zyklische Aktivierung der Neuronalen Netze zur Verschleißgradeinstufung und Bruchvorhersage. Ausgabewerte bzw. geschätzte Verschleißgrößen der Verschleißgradeinstufung werden dem DSP-Board zur Kollisionserkennung und der Handlungsentscheidung zur Verfügung gestellt. Ergebnisse der Handlungsentscheidung werden von der Ablaufsteuerung als Hinweise an den Benutzer ausgegeben oder in Form von Signalen an die CNC-Steuerung übergeben.

Zwischen der Bestückung des Revolvers mit Werkzeugen und der internen Verwaltung in der Ablaufsteuerung sind entsprechende Synchronisationsmechanismen notwendig, um aktuelle Daten zwischen dem PC und den Speicherbausteinen der eingesetzten Werkzeuge mit intelligenter Sensorik abzugleichen.

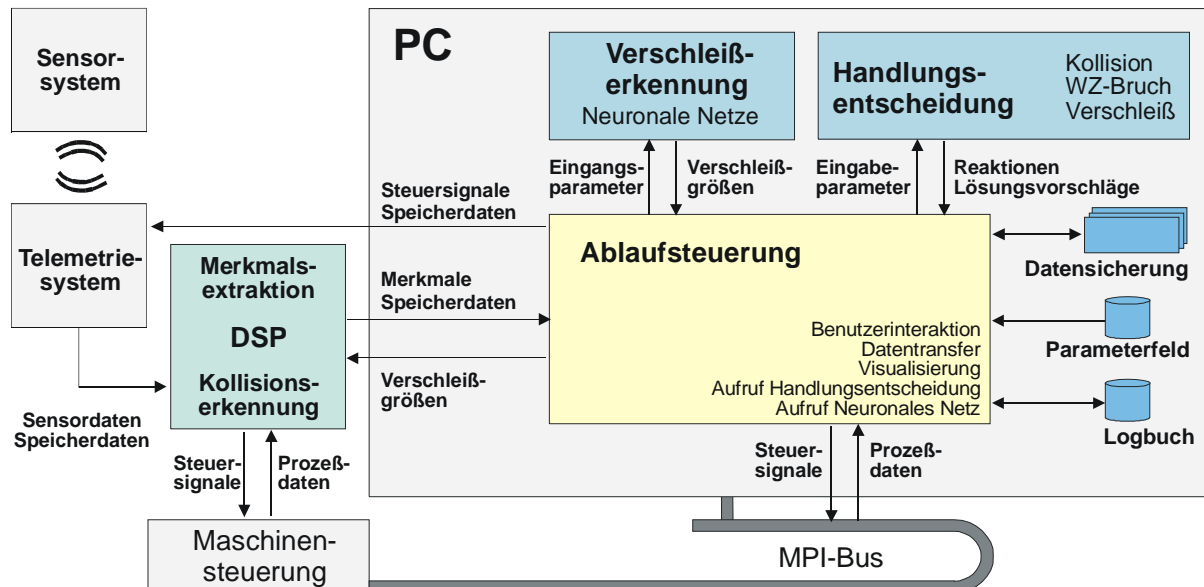


Bild 96: Struktur der Software zur Ablaufsteuerung des Überwachungssystems der Maschinensteuerung [28]

7.5 Varianten zur Sensorintegration

7.5.1 Prozessdatenerfassung mit piezoelektrischen Sensoren

Piezoelektrische Sensoren eignen sich aufgrund ihrer hohen Präzision und der Messung direkt im Kraftfluss hervorragend für die Erfassung von Kräften und Schwingungen. Die Piezokristalle können so eingestellt werden, dass sie nur eine Kraft-richtung messen. Diese Eigenschaft ermöglicht den Aufbau eines 3-Komponenten-Kraftsensors, indem 3 Kristallebenen gestapelt werden, die jeweils Kräfte in einer Raumachse messen (Bild 97). Die Fa. KISTLER Instrumente bietet ein 3D-Kraftmesssystem für das Drehen an. Die gesamten Schnittkräfte werden von vier 3-komponenten-Kraftsensoren aufgenommen. Die Vermeidung eines Kraftnebenschlusses ermöglicht die direkte Kraftmessung, ohne einer Datenaufbereitung über eine Matrixumrechnung, wie sie bei der DMS-Technik notwendig ist. Die Hemmnisse

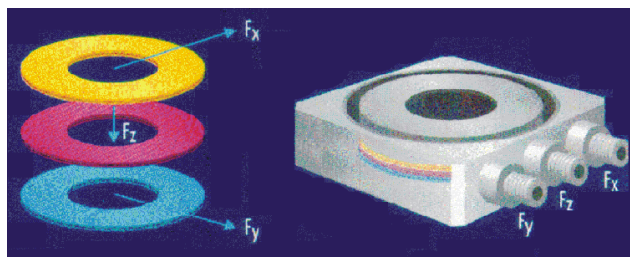


Bild 97: Aufbau eines piezoelektrischen 3-D-Kraftsensors [83]

für eine große Markverbreitung dieses eingesetzten piezoelektrischen Messsystems liegen im sehr hohen Preis, dem unkonventionell großen Aufbau und der verdrahteten Verbindung zum Verstärker. Im Folgenden ist der Vergleich eines 3D-Kraftmesssystems mit einem konventionellen Drehwerkzeug abgebildet. Das hochwertige Kraftmesssystem fand daher sein Einsatz-

gebiet größtenteils im Laborbereich. Im Rahmen dieser Dissertation wurde dieses System zur Referenzdatenerfassung verwendet.

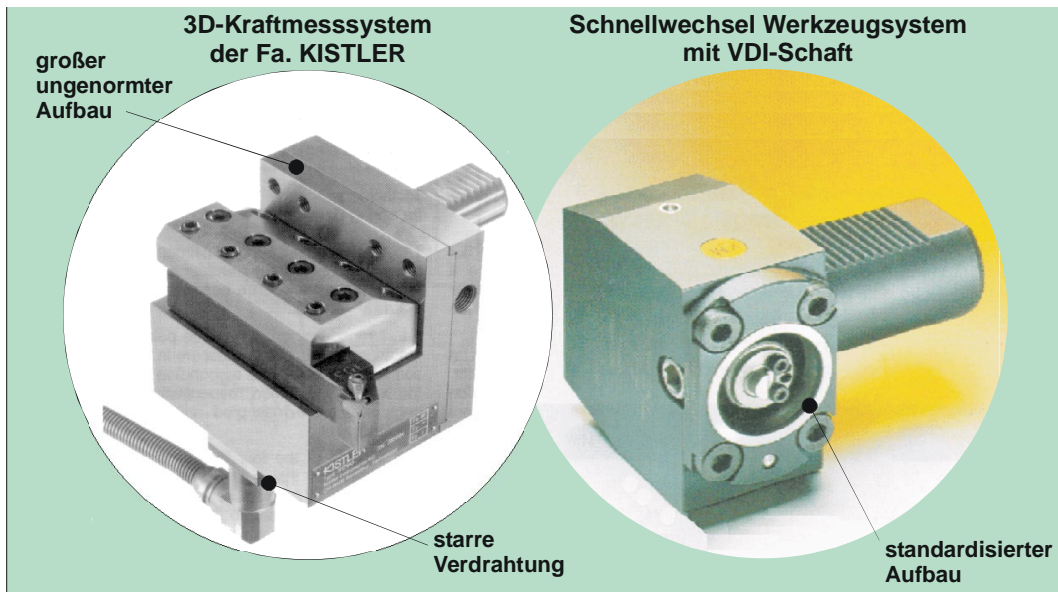


Bild 98: Vergleich eines 3D-Kraftmesssystems mit einem konventionellen Drehwerkzeug (Bilder: [81][83])

Es wurde ein Konzept erarbeitet, das einerseits die konstruktiven Nachteile berücksichtigt und andererseits durch Anwendung neuer sehr kleiner 3-Komponenten-Sensoren und Miniatur-Ladungsverstärkern autark arbeitet (Bild 99). Die konstruktiven Nachteile werden verbessert, indem konsequent auf bestehende, auf dem Markt verbreitete Systeme gesetzt wird. Zu nennen sind hier vor allen Dingen die Werkzeug-Wechselsysteme der Firmen SANDVIK Coromant [72] und Kennametal Hertel [81].

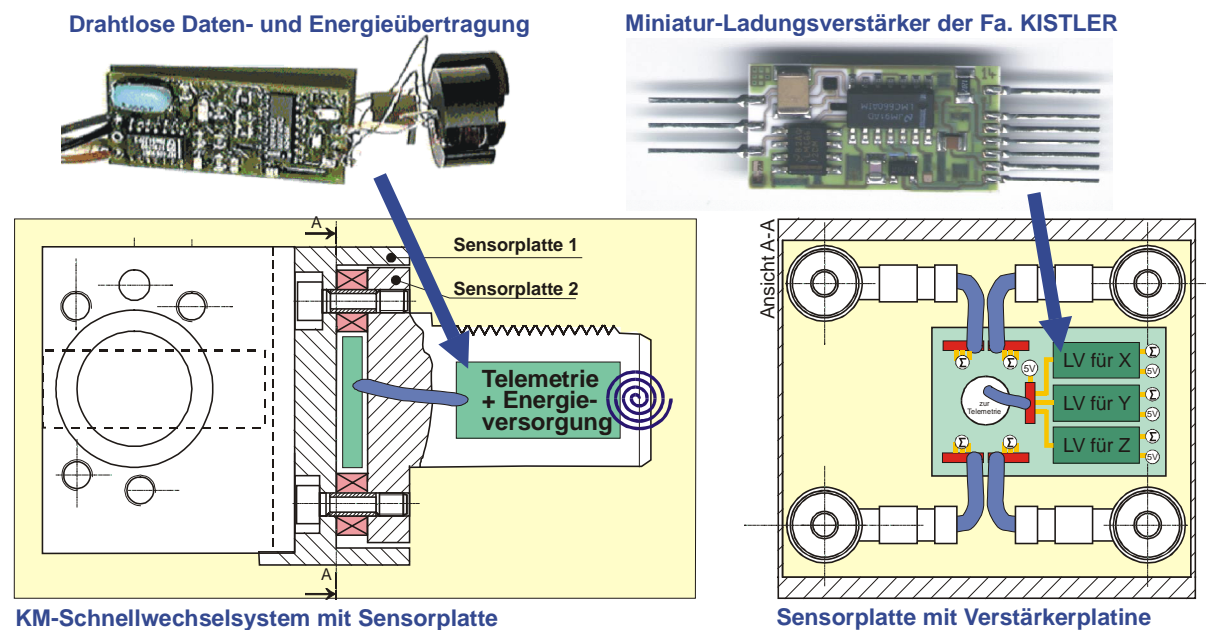


Bild 99: Konzept einer Integration von piezoelektrischen Sensoren in Werkzeugsysteme mit drahtloser Daten- und Energieübertragung (Bilder: [81][83])

Beide Systeme beruhen auf dem Prinzip von Werkzeugköpfen, die schnell und mit großer Wiederholgenauigkeit getauscht werden können. In Bild 99 ist das neu konzeptionierte Messsystem skizziert. Der Werkzeughalter wurde dem KM-System von Kennametal Hertel entnommen, die Sensorplatte wurde selber konzipiert. Darin befinden sich die vier 3-Komponenten-Kraftsensoren, die direkt mit je einem Miniatur-Ladungsverstärker verbunden sind. Die Energieversorgung der Ladungsverstärker und die Versorgung der integrierten Schaltung zur A/D-Wandlung der Sensordaten und der Modulation auf ein Trägersignal erfolgt auf induktivem Weg. Die drahtlose Energieversorgung besitzt generell den Nachteil, dass nur Abstände im Millimeterbereich zwischen Sender und Empfänger realisierbar sind. In Bild 90 ist das Einbauverhältnis dargestellt. Eine Spule befindet sich im Schaft des Werkzeuges, die Gegenspule fest auf der Rückseite des Werkzeug-Scheibenrevolvers. Spule und Gegenspule werden auf diese Weise immer im konstanten Abstand zueinander geführt.

Die Übertragung der Sensordaten ist unkritisch hinsichtlich des Abstandes zwischen Sender und Empfänger. Der Empfänger kann an einer beliebigen Stelle im Maschinenraum angebracht werden, sofern das Signal nicht durch Abschattungseffekte und Störungen der elektrischen Achsantriebe beeinträchtigt wird. Die Daten werden zur Absicherung einer störsicheren Übertragung digital gesendet.

7.5.2 Prozessdatenerfassung mit piezoresistiven Sensoren

In Kapitel 7.2 wurde ein Konzept umgesetzt, in der die Sensorik direkt auf dem Drehmeißel angebracht ist. Zusätzlich wurden Alternativen zur Sensoranbringung untersucht, da die Anbringung von Sensoren auf dem Halter eine Kontaktierung zum Meißel einspart, die in der täglichen Handhabung und im Einsatz sehr störanfällig ist. Weiterhin steigt die Flexibilität zum Einsatz des sensorbestückten Werkzeugs für unterschiedliche Werkzeugformen.

Analog zur 3-D Kraftmessung auf dem Drehmeißel mit der Sensorplatte werden insgesamt 3 Dehnungsmessstreifen auf dem Werkzeughalter angebracht. Über eine Kalibriermatrix können aus den drei gemessenen Brückenspannungen die Prozesskräfte zurückgerechnet werden. Problematisch ist es, Sensorpositionen zu finden, die einerseits hohe Dehnungen oder Stauchungen bei einer anliegenden Kraft aufweisen und andererseits einen ähnlichen Signalhub besitzen, um nicht eine schlecht konditionierte Umrechnungsmatrix zu erhalten. In einem ersten Schritt wurden verschiedene DMS auf die Oberfläche eines VDI-Werkzeughalters geklebt, um das Dehnungsverhalten an unterschiedlichen Positionen zu bestimmen. In Bild 74 ist links der Versuchsaufbau in der Zugprüfmaschine dargestellt, um das Drehwerkzeug in den drei Achsen einer definierten Belastung auszusetzen. Mit einem Laptop wurde das Dehnungsverhalten aller Sensoren gespeichert und ausgewertet. In Bild 100 ist ein Auszug der Ergebnisse dargestellt. Es ist zu erwähnen, dass die Dehnungen auf den Körper des Werkzeughalters erwartungsgemäß sehr gering waren, da es sich um ein sehr steifes System handelt. Das Sensorverhalten äußert sich durch eine geringe Steigung der Brückenspannung der DMS. Die gesamte Prozesskraft wird über den Schaft in den Werkzeugrevolver abgeleitet und erzeugt an dieser Stelle Torsionsspannungen. Dies ist auch im Diagramm an der hohen Signalgüte der DMS zu erkennen, die am Schaft angebracht waren.

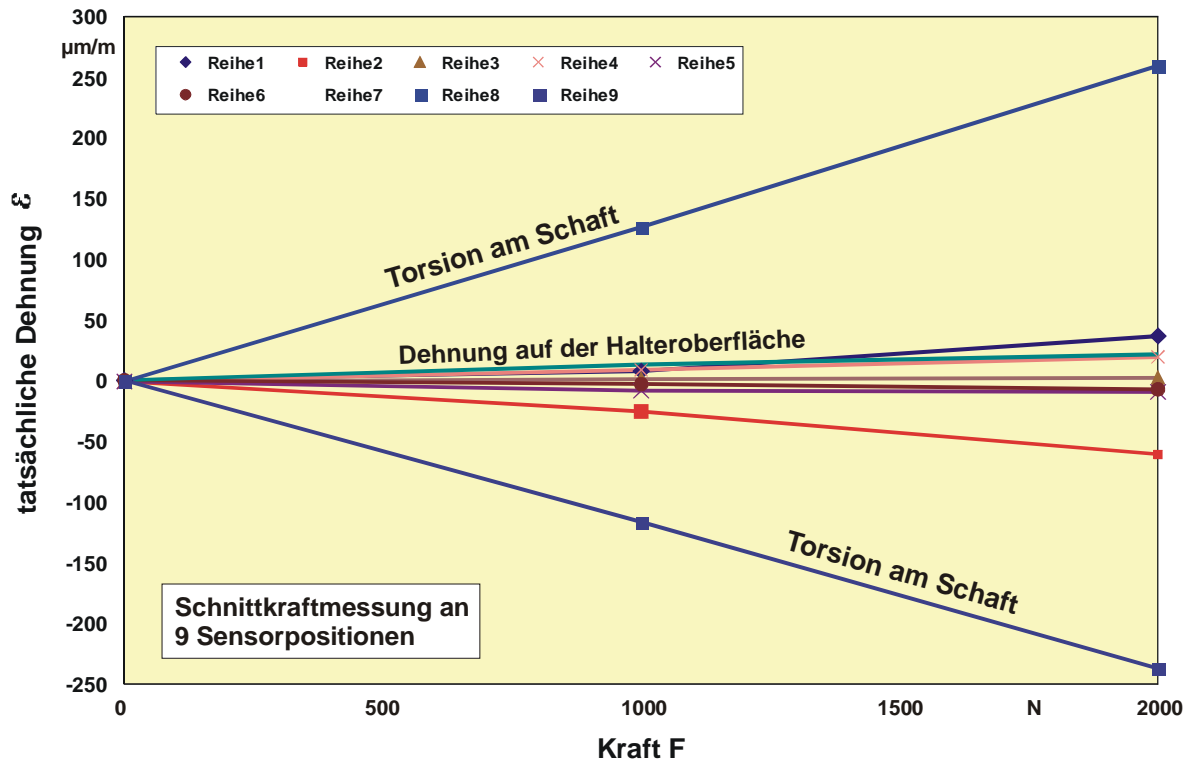


Bild 100: Messdaten eines Drehwerkzeugs mit DMS auf dem Prüfstand

Diese Sensoren eignen sich für eine sinnvolle Prozesskraftmessung. Leider ist es nicht möglich drei voneinander unabhängig wirkende Sensorpositionen mit einem ähnlichen Signalverhalten zu finden, was für eine 3-D Messung nötig wäre. Aus diesem Grund kann nur eine eindimensionale Kraftmessung realisiert werden. Dies ist allerdings auch mit einem Sensor direkt auf den Werkzeugrevolver möglich, der nur einmal montiert werden muss und verdrahtet werden kann.

8 Charakterisierung einer hydraulisch vorspannbaren Spindellagerung als Stellglied eines Regelkreises

8.1 Konzeption einer Prozessregelung über die Lagervorspannung

8.1.1 Motivation für die Eigenfrequenzregelung

Im Rahmen dieser Dissertation wurde das Frequenzverhalten eines Spindel-Lager-Werkzeug-Systems unter variabler Lagervorspannung untersucht und ein Algorithmus zur gezielten Lager-Einstellung entwickelt.

Die Ursache für schlechte Werkstückoberflächen sind oft Schwingungen, die durch eine Überlagerung der prozessinduzierten Schwingung mit einer maschinenspezifischen Eigenfrequenz entstehen. Folgen dieser auftretenden Schwingungen sind oft unbrauchbare Werkstücke, ein erhöhter Werkzeugverschleiß oder letztlich eine Verkürzung der Einsatzdauer des Spindel-Lager-Systems [67].

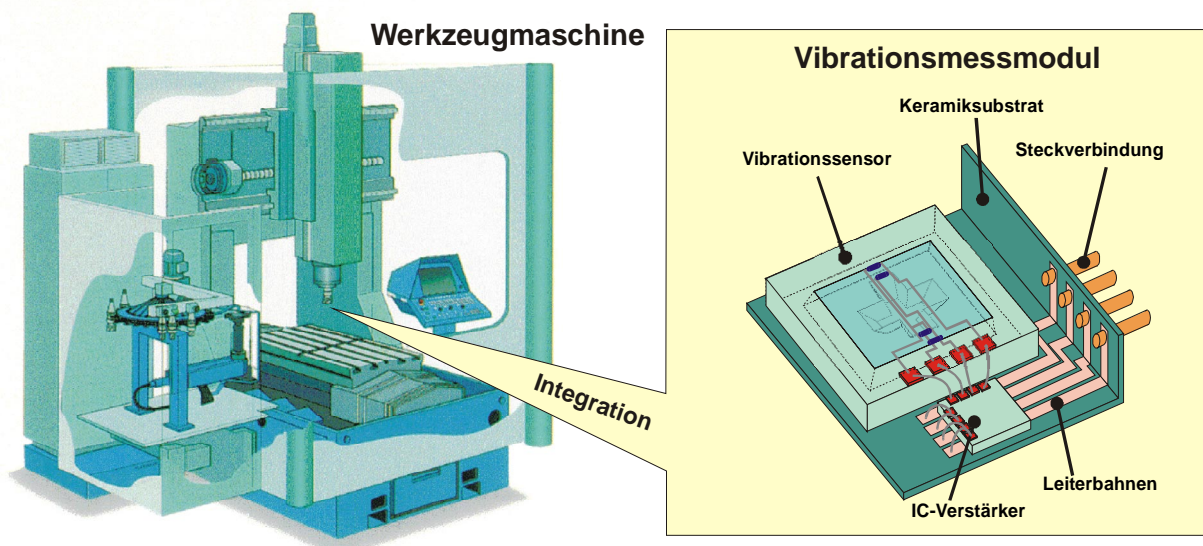


Bild 101: Konzeption einer Sensorintegration in Werkzeugmaschinen

8.1.2 Struktur des verwendeten Regelkreises

Liegt ein kritisches Schwingen vor, sind zwei Möglichkeiten vorhanden, die Vibrationen während der Bearbeitung zu beenden. Zum einen können Prozessparameter, wie Vorschub oder Drehzahl, verändert werden und damit auch die Frequenz der prozessinduzierten Schwingung. Dieser Weg ist oft nicht erfolgreich, da eine Änderung von Prozessparametern am Bearbeitungsergebnis sichtbare Marken hinterlässt sowie oftmals ohne Wirkung bleibt und für die rechnergestützte Signalauswertung mit einem sehr komplexen Prozessmodell gearbeitet werden muss. Die zweite Möglichkeit ist eine Verschiebung der Eigenfrequenz der Maschine oder speziell der Eigenfrequenz des Spindel-Lager-Systems. Der Struktur dieses Regelkreises zur Eigenfrequenz-Anpassung ist in Bild 102 dargestellt.

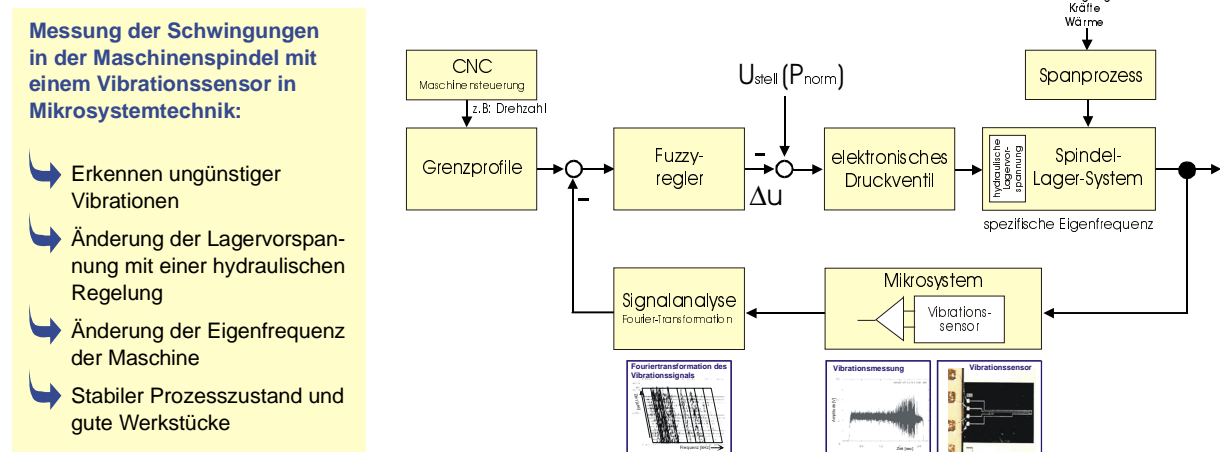


Bild 102: Strukturmodell des Regelkreises zur Eigenfrequenz-Anpassung

Die Schwingungen der Maschinenspindel werden über das Vibrationsmessmodul in Lagernähe in der Maschinenspindel erfasst. Die gemessenen Daten werden hinsichtlich kritischer Frequenzbereiche analysiert und das ermittelte Profil mit einem drehzahlabhängigen Grenzprofil verglichen. Bei Erkennung von ungünstigen Vibrationen wird die Vorspannung der hydraulisch änderbaren Spindellagerung solange (innerhalb eines Grenzbereichs) verändert, bis die gemessenen Schwingungen wieder unterhalb der Warngrenze liegen [56][59].

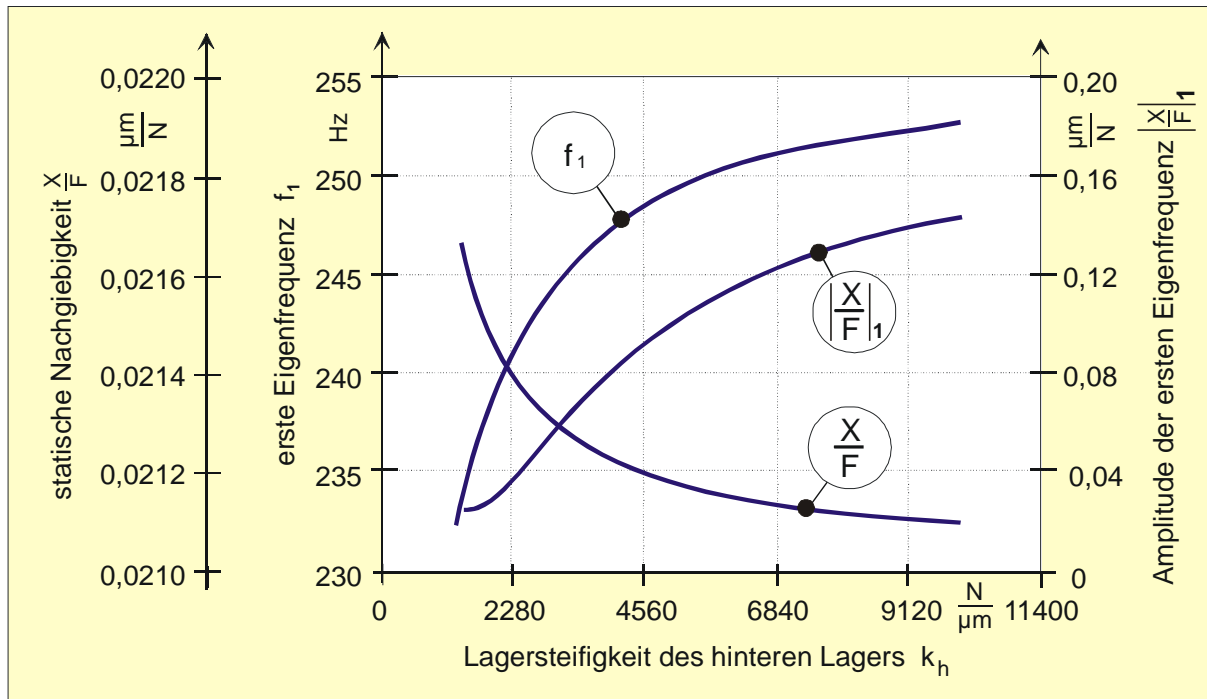
Mit der geänderten Lagervorspannung weist das Spindelssystem ein geändertes Dämpfungsverhalten und eine verschobene Eigenfrequenz auf. Die Resonanzerscheinung mit der prozessinduzierten Schwingung wird unterdrückt und ein stabiler Prozesszustand mit qualitativ guten Werkstücken wiederhergestellt.

8.1.3 Einfluss der Lagervorspannung auf die Spindeleigenschaften

Werkzeugmaschinen sind kostenintensive Fertigungsmittel. Infolge fehlerhafter Bedienung, Abnutzung oder ungünstig eingestellter Prozessparameter kann eine teure und zeitintensive Wartung erforderlich werden. Gerade die in jüngster Zeit wichtig werdenden Technologien der Hochgeschwindigkeitsfräsbearbeitung (HSC) und der Hartbearbeitung [74] zeichnen sich besonders durch höchste Anforderungen an den Aufbau der Werkzeugmaschine und die Antriebs- und Steuerungstechnik aus. Ausschlaggebend für die Qualität der gefertigten Werkstücke und für die Maschine selber ist vor allem eine hochwertige, aber oft anfällige Maschinenspindel.

In der aktuellen Literatur wird das Spindel-Lager-System als dominierende Schwachstelle bezüglich hoher Maschinenleistung und hoher Arbeitsgenauigkeit bezeichnet [58]. In Übereinstimmung mit Luderich [61] wird die Lagersteifigkeit als einer der Haupteinflussparameter auf das Spindelverhalten identifiziert. Die untersuchten Spindelcharakteristika, statische Nachgiebigkeit, erste Resonanzfrequenz und deren Amplitude zeigen nach Lee [58] folgendes Verhalten: Mit steigender Steifigkeit des Lagers sinkt die statische Nachgiebigkeit und die erste Resonanzfrequenz steigt an. Gleichzeitig nimmt die Amplitude der Resonanzfrequenz zu. Lee untersuchte mit der Strukturmodifikationsmethode (SMM) ein Spindel-Lager-System, das von den Ab-

messungen und Lagerkennwerten her der umgebauten Spindel in der Testmaschine sehr ähnlich ist. Ein weiteres Ergebnis dieser Simulation ist der Vergleich mit dem vorderen Lager. Im untersuchten Spindel-Lager-System hat die vordere Lagersteifigkeit einen größeren Einfluss auf die Bearbeitungsgenauigkeit als die Steifigkeit des hinteren Lagers. Von den Einbauverhältnissen her ist es aber nicht möglich, das in der Testmaschine eingebaute hydraulisch vorspannbare Lager, mit dem die Lagersteifigkeit ebenfalls veränderbar ist, vorne einzubauen. An dieser Stelle muss eine Verringerung der Einstellmöglichkeiten für die Bearbeitung in Kauf genommen werden, da das Lager hinten eingebaut wird.

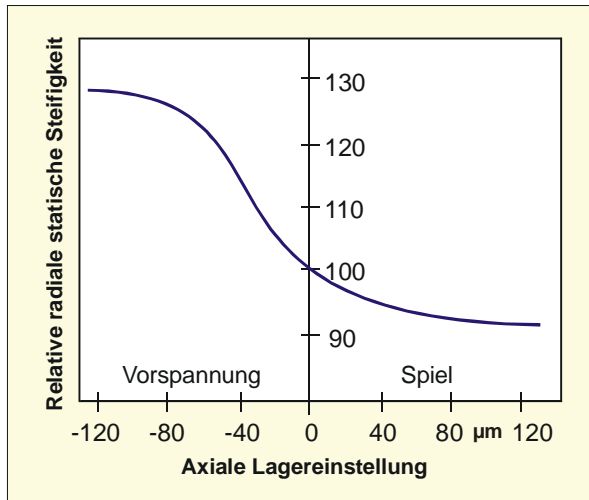


► Die Lagervorspannung beeinflusst die Amplitude und Position der Eigenfrequenz im Frequenzband

Bild 103: Simulation von Lagerkennwerten in Abhängigkeit zur hinteren Lagersteifigkeit [58]

Aus diesen Ergebnissen ist zu erwarten, dass durch eine Einstellung der Lagersteifigkeit optimale Betriebsbedingungen erreicht werden können. Als Kenngröße dient die Vibration der Spindel. Speziell die Erwärmung der Spindel durch die Lagerung und die Bearbeitung zieht eine permanent sich verändernde Lagervorspannung nach sich. Untersuchungen, die in Bild 104 wiedergegeben sind [8][144], bestätigen die Beeinflussung der Schnittqualität durch die Änderung der Vorspannung. Heute werden hauptsächlich Federpakete eingesetzt, um die Lagervorspannung einzustellen und konstant zu halten [78]. Neben dieser weit verbreiteten Methode existiert die Möglichkeit der hydraulischen Einstellung der Lagervorspannung, die aber im Augenblick nur wenig Anwendung findet. Vorteile liegen vor allem bei der flexiblen, leicht regelbaren Druckeinstellung. Der Grund für die geringe Verbreitung liegt in der mangelnden Erfahrung mit den Folgen der Einstellmöglichkeiten, den erhöhten Kosten für die Anschaffung sowie der problematischen Kompensation einer geometrischen Verlagerung der Spindel in axialer Richtung.

Einfluss der Lagereinstellung auf die statische Systemsteifigkeit der Spindel



Einfluss der Lagereinstellung auf die Werkstückformgenauigkeit und -oberflächenqualität

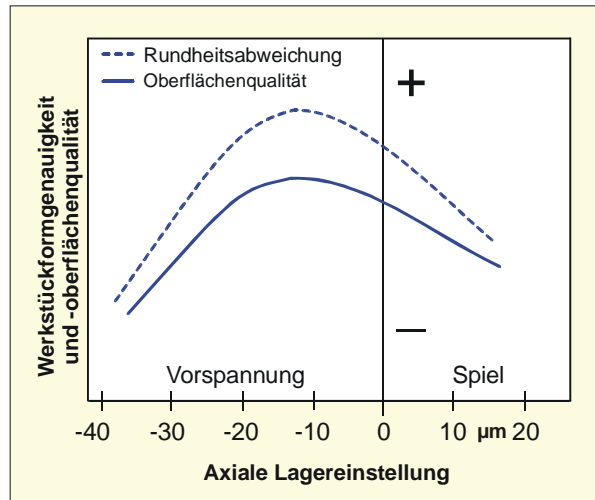


Bild 104: Beeinflussung des Spindel-Lager-Systems durch die Lagervorspannung [8]

Eine Erhöhung der Lagervorspannung bewirkt die Steigerung der Axialkraft des Spindel-Lagersystems. Diese Axialkraft ist verantwortlich sowohl für die Lebensdauer der Lager als auch für die Steifigkeit der Spindellagerung. Dieser Einfluss wurde für eine Hochgeschwindigkeitsspindel (HCS 230-24000/18) der Fa. GMN für zwei Drehzahlen simuliert. Das folgende Bild zeigt die Ergebnisse, die dabei ermittelt worden sind.

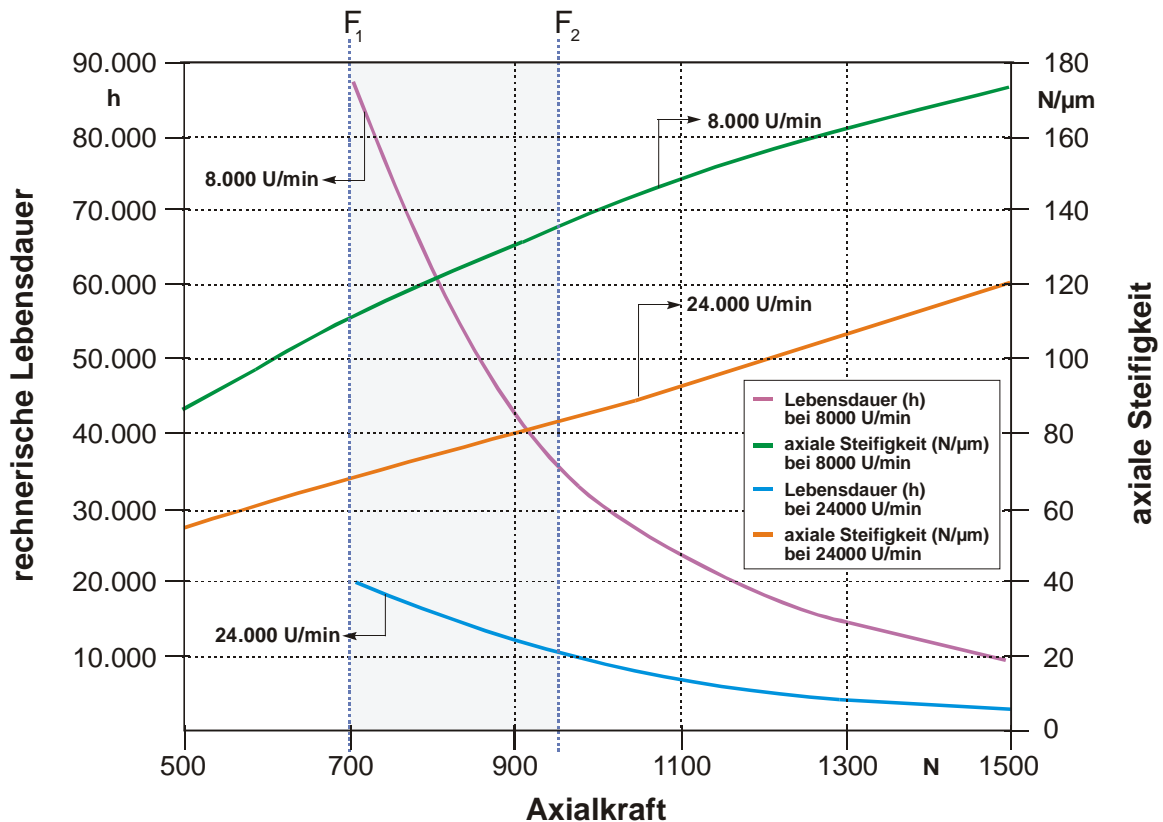


Bild 105: Einfluss der axialen Lagervorspannung auf die Steifigkeit und die Lebensdauer einer Spindellagerung [Quelle: GMN]

Aus dem Grafik ist zu erkennen, dass mit der Steigerung der Axialkraft bzw. der Lagervorspannung eine deutliche Reduzierung der berechneten Lebensdauer eintritt. Wird die Axialkraft von 700 N auf 950 N erhöht, so bewirkt dies bei der Drehzahl von 8.000 U/min eine Verringerung der Lebensdauer um ca. 2/3 und bei der Drehzahl von 24.000 U/min wird sie auf die Hälfte des Anfangswerten reduziert. Dabei ist zu bemerken, dass über den gesamten Vorspannbereich die erwartete Lebensdauer bei 8.000 U/min viermal so hoch ist, wie bei einer Spindeldrehzahl von 24.000 U/min. Im Gegensatz dazu wird die Steifigkeit der Spindellagerung mit der Erhöhung der Axialkraft gesteigert. Die Steifigkeit bei 24.000 U/min ist insgesamt ca. 1/3 niedriger, als bei 8.000 U/min.

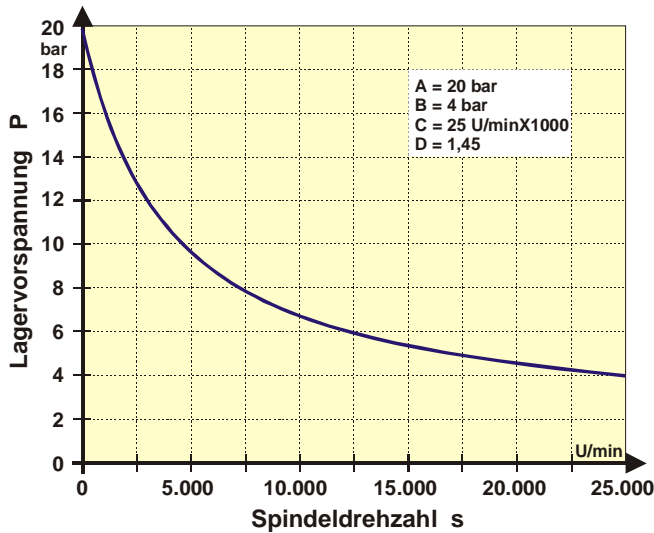
Die Anwender erwarten eine optimale Funktion der Spindel über den großen Einsatzbereich von 0 U/min bis 60.000 U/min. Aufgrund unveränderbarer Vorspannkraft während dem Einsatz werden heute Spindeln mit einem Kompromiss zwischen Lebensdauer und Steifigkeit ausgeliefert. Es herrscht ein Zielkonflikt zwischen hoher Lebensdauer der Lager und einer großen Steifigkeit des Gesamtsystems vor.

Alleine die Darstellung der Lebensdauer verweist auf ein bislang ungenutztes Potential von änderbaren Lagervorspannungen. Es wurde nachgewiesen, dass eine permanente Anpassung der Lagervorspannung an die Spindeldrehzahl eine sinnvolle Ergänzung zur Verlängerung der Einsatzdauer von Spindeln ist [35]. Aufgrund geringerer Schnittkräfte kann die Spindelsteifigkeit, bzw. die Lagervorspannung bei hohen Drehzahlen verringert und bis zur maximalen Vorspannung bei sehr kleinen Drehzahlen vergrößert werden. Ein Nachteil der Änderung der Lagervorspannung während der Bearbeitung ist der geometrische Versatz in axialer Richtung. Dieser Fehler kann in einer modernen Maschinensteuerung kompensiert werden.

Die Lagervorspannung beeinflusst nicht nur die Lebensdauer und die Spindelsteifigkeit, sondern auch die Eigenfrequenzen der Maschine. Anhand von Berechnungen der Fa. GMN ist bei zwei unterschiedlichen Vorspannkraften, einer Erhöhung der Axialkraft um 250 N, eine Verschiebung der ersten Eigenfrequenz um ca. 10 Hz ermittelt worden. Es ist daher festzustellen, dass die Axialkraft einen Einfluss auf die Spindeleigenschaften ausübt. Dieser Effekt macht sich in den Spindeleigenschaften während der Bearbeitung erst bei größerem Vorspannkraftunterschied bemerkbar.

Die Fa. GMN bietet für ihre Spindeln eine hydraulische Lagervorspannung als Ersatz für die Tellerfeder-Vorspannung an [76]. Das im folgenden Kapitel beschriebene und im Rahmen dieser Arbeit verwendete hydraulisch vorspannbare Kegelrollenlager der Fa. TIMKEN kann im Gegensatz zu den üblichen Schrägkugellagern mit höheren Vorspannkraften betrieben werden und besitzt eine höhere spezifische Steifigkeit.

Im folgenden Bild ist beispielhaft ein Druckverlauf über die Spindeldrehzahl angegeben. Die daneben aufgeführte Berechnung ist die Grundlage für eine Schaltungsentwicklung zur automatischen Drucksteuerung. Die zur Berechnung benötigten Grenzwerte sind lager- und spindelabhängig. Die minimale Vorspannkraft darf einen bestimmten Wert bei hohen Drehzahlen (hier: 4 bar) nicht unterschreiten, da die Wälzkörper über ihre Fliehkraft eine Kraft in axialer Richtung erzeugen, die von der Lagervorspannung kompensiert werden muss. Real kann die Lagervorspannung auf 0 N zurückgehen oder negative Werte annehmen.



$$P = \frac{A}{0,25*s + 1} * \left(1 + \frac{D*s}{C}\right) \quad (35)$$

Funktion Multiplikator

$$D = \left(\frac{B}{\text{Funktion}(C)}\right) - 1 \quad (36)$$

P = akt. Lagerdruck (bar)
 s = akt. Spindeldrehzahl (U/min X 1000)
 A = max. Lagerdruck (bar)
 B = min. Lagerdruck (bar)
 C = max. Spindeldrehzahl (U/min X 1000)
 D = Faktor im Multiplikator

Bild 106: Berechnung des idealen Vorspanndrucks an einem Beispiel

8.2 Integration des hydraulisch einstellbaren Lagers in die Drehmaschinen-spindel

8.2.1 Anpassung der Versuchsumgebung

Als Stellglied dieses Regelkreises dient ein hydraulisch vorspannbares Kegelrollenlager in der Maschinenspindel. Der Einbau dieses Kegelrollenlagers des Industriepartners TIMKEN in die Spindel erforderte eine Umkonstruktion des gesamten Spindelkastens und der Welle. (Bild 107).

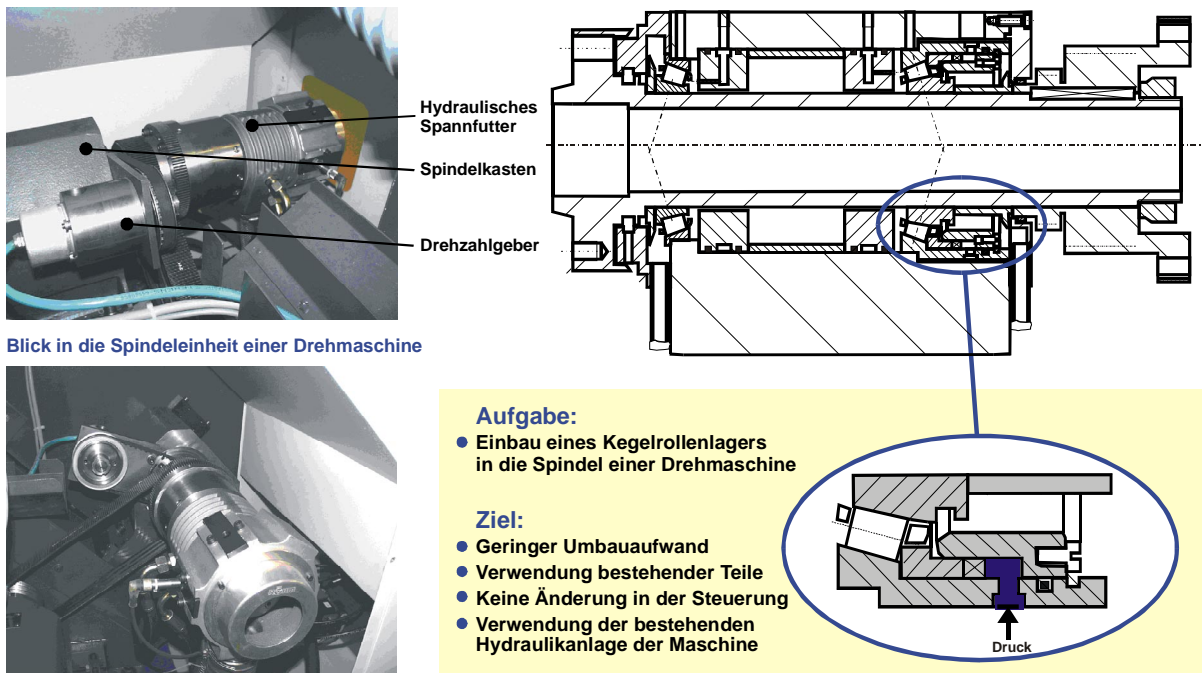


Bild 107: Konstruktion einer hydraulisch vorspannbaren Spindellagerung für ein Drehzentrum

Bei der Lagerung der Drehmaschinen­spindel werden überwiegend Kugellager eingesetzt. Diese zeichnen sich durch geringen Wartungsaufwand und großer Vielfalt aus und benötigen nur eine einmalige Schmierung. Andererseits weisen Kugellager eine geringe Dämpfung auf, wobei sich dies nachteilig für deren Einsatz als Spindellagerung auswirkt und sie damit sehr empfindlich auf prozessinduzierte Schwingungen reagieren. Ein günstigeres Dämpfungsverhalten ist bei Kegelrollenlagern nachgewiesen. Aufgrund der guten Eigenschaften des Hydra-Rip-Lagers der Fa. TIMKEN und der Möglichkeit, die Lagervorspannung zu variieren, zeigt sich die Integration dieses Lagers in die Drehmaschinen­spindel vorteilhaft. Für den Ersatz der bestehenden Kegelrollenlager durch die Kegelrollenlager sind einige Randbedingungen zu berücksichtigen [8]:

- Das Hydra-Rip-Lager hat durch seine Geometrie einen größeren Platzbedarf, wodurch ein kleinerer Lagerabstand entsteht
- Kegelrollenlager müssen mit einer Ölumlaufschmierung permanent geschmiert werden
- Eine hydraulische Vorspannung des Hydra-Rip-Lagers mit der Druckspanne von 0-20 bar muss eingerichtet werden
- Der axiale Kraftfluss, der für das Betreiben des Spannzylinders über eine Zugstange geführt wird, darf nicht über die Lager verlaufen

Der Lagerabstand beeinflusst die Spindeldurchbiegung und damit die statische Steifigkeit des Spindelkörpers. Die dynamische Steifigkeit des Systems wird von der Lagervorspannung beeinflusst und somit auch das Bearbeitungsergebnis. Die Maschinen­spindel einer Drehmaschine wurde entsprechend umgebaut.

8.2.2 Das hydraulisch vorspannbare Lager und dessen Charakteristik

Bei der Lagerung von Drehmaschinen­spindeln werden überwiegend Schrägkugellager eingesetzt. Diese zeichnen sich durch einen geringen Wartungsaufwand und eine große Vielfalt aus und benötigen nur eine einmalige Schmierung. Andererseits weisen Schrägkugellager eine geringere Dämpfung auf und reagieren damit empfindlicher auf prozessinduzierte Schwingungen. Ein günstigeres Dämpfungsverhalten ist bei Kegelrollenlagern nachgewiesen. Durch deren Einsatz in Spindellagerungen sind Verbesserungen für den gesamten Prozess und die Oberflächenqualität zu erwarten. Aufgrund der guten Eigenschaften des Hydra-Rip-Lagers und der Möglichkeit die Lagervorspannung zu variieren, zeigt die Integration dieses Lagers in eine Drehmaschinen­spindel Vorteile.

Die Spindel einer CNC-Drehmaschine wurde dahingehend verändert, dass die bisherigen Schrägkugellager durch Kegelrollenlager ersetzt werden. Dabei mussten die Einbaubedingungen für die Spindelkonstruktion unverändert bleiben, wie beispielsweise die Position des Antriebsriemens, die Geometrie und Lage des Spannzylinders oder der Arbeitsraum. Kegelrollenlager sind von den Abmaßen her größer als Schrägkugellager, wodurch ein kleinerer Lagerabstand entsteht. Der Lagerabstand beeinflusst die Spindeldurchbiegung und damit die statische Steifigkeit des Spindelkörpers. Die dynamische Steifigkeit des Systems wird von der Lagervorspannung beeinflusst und somit auch das Bearbeitungsergebnis.

An der hinteren Lagerstelle kommt das hydraulisch vorspannbare Hydra-Rip-Lager zum Einsatz. Für diese Anwendung ist eine Spezialanfertigung des Lagers notwendig, da die Standardausführungen nicht über den erforderlichen Durchmesser verfügen. Das Lager ist besonders gut für solche Anwendungsfälle geeignet, bei denen eine konstante Lagereinstellung über weite Drehzahl- und Lastbereiche erforderlich ist. Der regelbare Betriebsdruck erlaubt das Aufbringen einer konstanten Lagervorspannung auch bei sich ändernden Betriebsbedingungen wie die thermale Ausdehnung von Welle, Lager und Gehäuse während unterschiedlicher Bearbeitungsgänge /15/. Des Weiteren besitzt dieses Lager sehr gute Dämpfungseigenschaften bei einer gleichzeitig hohen Steifigkeit. In Bild 108 ist der Querschnitt eines Hydra-Rip-Lagers dargestellt [8].

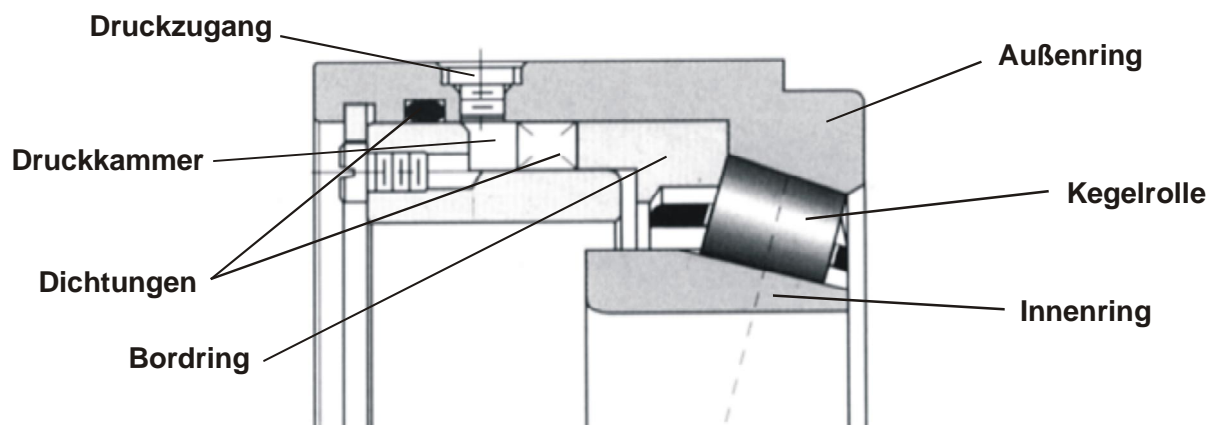


Bild 108: Querschnitt eines Hydra-Rip-Lagers [8]

Das besondere Kennzeichen dieses Hydra-Rip-Lagers ist der bewegliche Bordring, der über pneumatisch oder hydraulisch aufgebracht Druck die benötigte Lagervorspannung im Lager bewirkt, die unabhängig von den wechselnden Betriebszuständen ist.

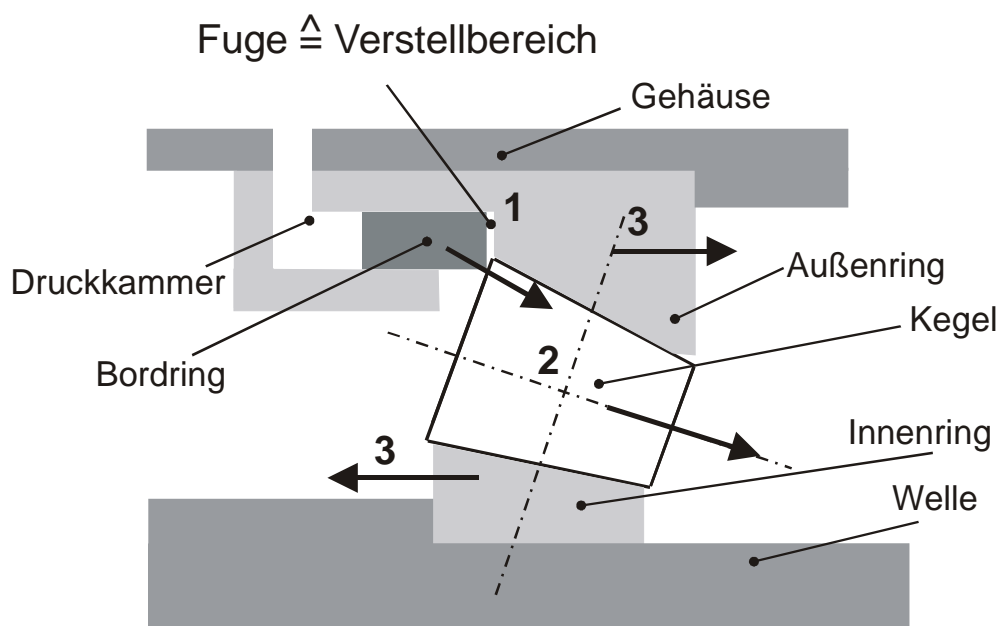


Bild 109: Funktionsweise der Lagervorspannung im Hydra-Rip-Lager

Durch einen höheren Druck in der Druckkammer wird der Bordring gegen die Kegelrolle gedrückt (1, Bild 109). Der Kegel will dann nach vorne ausweichen, wozu er durch die Kegelform Platz in radialer Richtung am Innenring braucht (2). Um diesen Platz bereitzustellen, würde der Innenring radial ausweichen (3). Dabei wird er aber durch die Lagerfestsetzung aufgehalten. Dadurch kommt es zu keinen Verschiebungen sondern nur zu einer Erhöhung der Vorspannung im Lagersystem. Zwischen Bordring und Außenring muss eine Fuge eingestellt werden. Diese bestimmt den Verstellungsbereich des Hydra-Rip-Lagers.

Als Charakteristik für das Kegelrollenlager sind die sogenannten G_1 - und K -Faktoren angegeben. G_1 beschreibt den Grad von Reibmoment/Wärmeentwicklung im Lager, der durch die innere Lagergeometrie beeinflusst wird. Je niedriger der G_1 -Faktor ist, desto geringer ist die Wärmeentwicklung. Der K -Faktor beschreibt das Verhältnis der radialen zur axialen Tragfähigkeit des Lagers. Für das Hydra-Rip-Lager sind K -Faktoren von 1,44 bis 1,65 angegeben und sind damit höher als bei einem einfachen Kegelrollenlager (1,15-1,35). Für die vordere Lagerstelle kam das Lager mit der Bezeichnung JP7010 B zum Einsatz. Die Charakteristik dieses Lager ist durch Faktoren $G_1=51,1$ und $K=1,27$ gegeben.

Bei Lagern mit hydraulisch einstellbarer Vorspannung wird die Axialkraft durch den Vorspanndruck erzeugt. Der Lagervorspanndruck wirkt dabei auf die Kreisringfläche des Bordrings. Die Axialkraft wird nach der folgenden Formel berechnet:

$$F_A = A * P_v \quad (37)$$

A – Kreisringfläche in mm^2 , P_v – Lagervorspannung in Pa

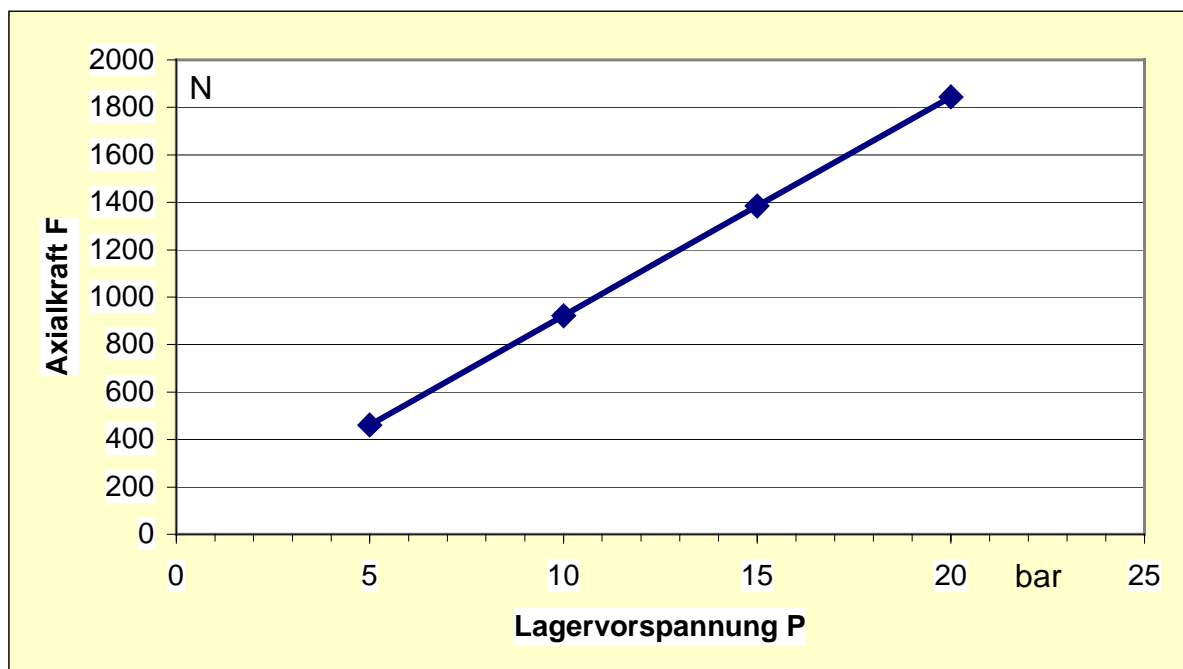


Bild 110: Axialkraft im Hydra-Rip-Lager in Abhängigkeit von der Lagervorspannung

Bei dem eingebauten Spindelsystem beträgt der Außendurchmesser des Bordrings $D=0,12$ m und der Innendurchmesser $d=0,115$ m. Das Bild 110 zeigt die graphische

Darstellung dieser berechneten Axialkraft für dieses eingesetzte Lager. Im direkten Vergleich mit der Vorspannkraft von Schrägkugellagern (Bild 105) ist zu erkennen, dass die Vorspannung bei Kegelrollenlagern größere Werte erreichen kann.

8.2.3 Realisierung der Lagerschmierung und des Vorspanndrucks

Ein wesentlicher Nachteil der Kegelrollenlager ist die erforderliche Ölumlaufschmierung, wodurch ein zusätzlicher Aufwand für die Konstruktion und den Betrieb verursacht wird [89]. Die geänderte Drehmaschine besaß vorher lebensdauerfettgeschmierte Schrägkugellager. Die vorhandene zentrale Hydraulikanlage, die einen Druck von 60 bar anbietet, musste für die Lagerschmierung und die Lagervorspannung erweitert werden. Es mussten Drosseln und leicht verstellbare Ventile eingebaut werden. Der optimale Arbeitsbereich für das Hydra-Rip-Lager war anhand von Untersuchungen bei einer Lagervorspannung von 3-20 bar erreicht, die Lagerschmierung benötigte bis zu 4 bar.

Kegelrollenlager haben aufgrund eines höheren Rollwiderstandes gegenüber Kugellagern eine größere Erwärmung zur Folge. Die Wärme wird größtenteils mit dem Öl abgeführt, eine Fettschmierung ist daher nur bedingt möglich. Kegelrollenlager erfordern daher eine permanente Ölschmierung. Das Bild 111 zeigt das Ergebnis von empirischen Messungen, um den Öldurchfluss einer Düse in Abhängigkeit vom Durchmesser und dem einstellbaren Druck zu ermitteln.

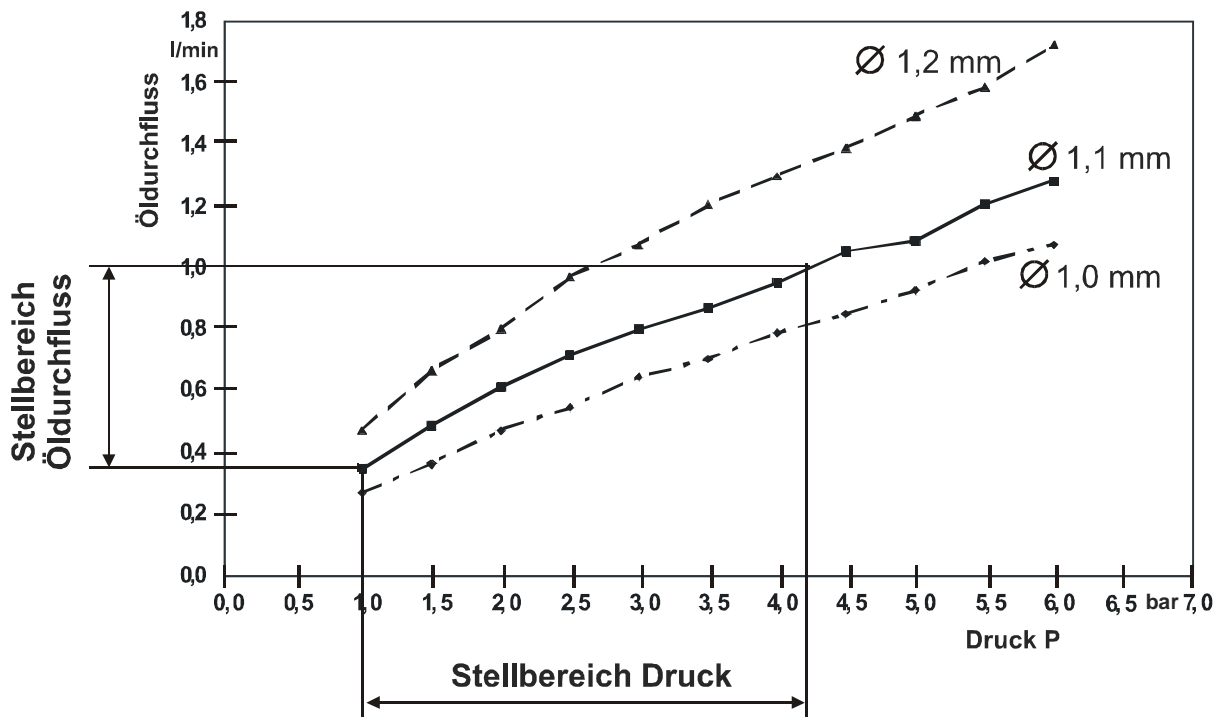


Bild 111: Öldurchfluss bei unterschiedlichen Düsendurchmesser (empirisch ermittelt)

Eine hohe Lebensdauer der Lager ist nur durch ausreichende Lagerschmierung zu erreichen. Diese wird vom Hersteller mit einen Öldurchfluss von 3 l/min je Lager angegeben. Die Ölzufuhr erfolgt über Ringe, die das Öl mit vorgegebenen Druck durch drei Düsen auf das Lager spritzen. Für die verwendete Konstruktion der La-

gerschmierung ist, laut Diagramm, ein Druck von 4,25 bar notwendig, um den erforderlichen maximalen Öldurchfluss zu erreichen.

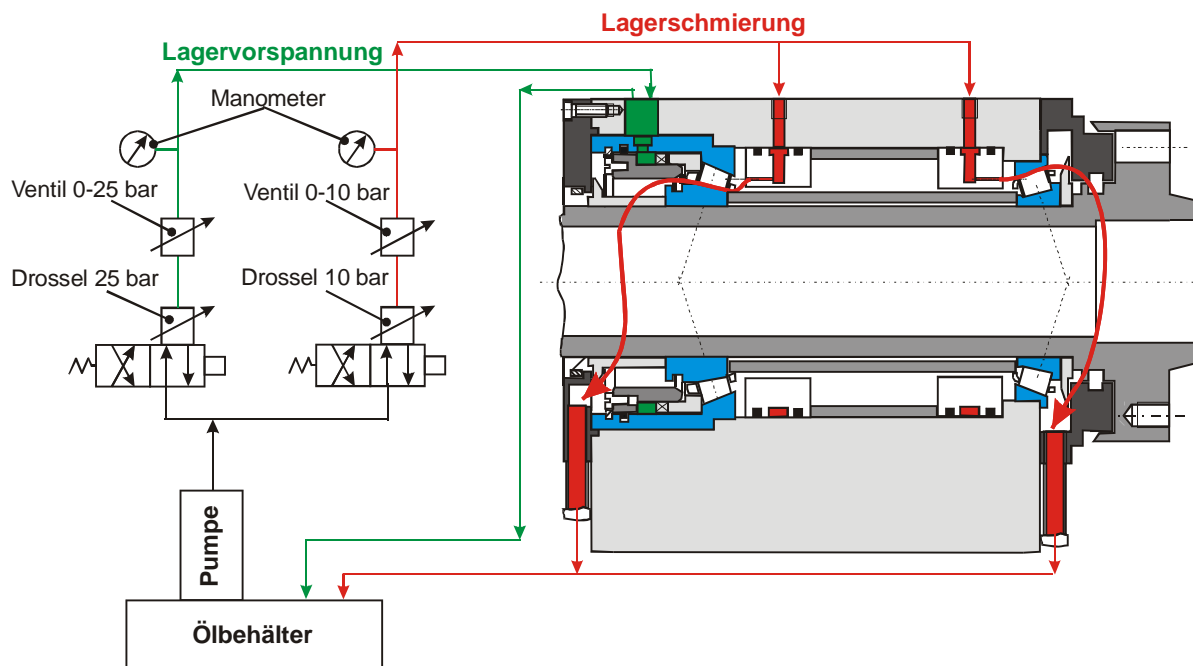


Bild 112: Realisierung der Lagerschmierung und des Vorspanndrucks

In Bild 112 sind sowohl die Realisierung der Druckdrosselung als auch der Ölkreislauf für die Lagerschmierung dargestellt.

Die Drehzelle besitzt einen zentralen Ölbehälter, durch den alle notwendigen hydraulischen Betätigungen der Drehmaschine vorgenommen werden. Dafür ist ein Druck von 40 bar eingestellt, der mittels einer Hydraulikanlage angeboten wird. Für die Lagerschmierung und Lagervorspannung sind niedrigere Drücke gewünscht. Es ist daher nötig, den von der Pumpe gestellten Druck auf den erforderlichen Druck zu drosseln. Dies erreicht man durch die Reihenschaltung einer Drossel, die den Druck von 40 bar auf 25 bar drosselt, mit einem Ventil, das die Einstellung der Lagervorspannung von 0-25 bar ermöglicht. Zur Überprüfung des eingestellten Druckes ist ein Manometer angeschlossen.

Der Druck für die Lagervorspannung wird nur durch Ölzufluss aufgebaut. Dies ermöglicht zwar einen schnellen Druckaufbau, aber dafür eine sehr träge Druckreduzierung. Um diesen Nachteil zu überwinden, ist ein schnelles Ausweichen des Öles bei einer Reduzierung des Druckes erforderlich, was durch eine zusätzliche Ölrückführung vom Ventil erzielt wird [123]. Ähnlich wie bei der Lagervorspannung wurde auch bei der Lagerschmierung die Druckdrosselung realisiert, allerdings mit dem Unterschied, dass die Drossel den Druck auf 10 bar herabsetzt und das zweite Ventil eine weitere Einstellung des Druckbereichs von 0-10 bar ermöglicht. Die Rückführung des Schmieröls in den Ölbehälter ist durch zwei Rohrleitungen mit einem ausreichenden Querschnitt gewährleistet.

8.2.4 Kräfteeinwirkung auf die Spindel

Prozesskräfte und Antriebskräfte werden von der Spindel aufgenommen. Es ist darauf zu achten, dass die elastische Verformung der Spindel verhindert wird. Die Belastung der Spindellagerung darf die Funktion der Lagervorspannung nicht beeinträchtigen.

Eine Spindel ist als einfaches Feder-Masse-Dämpfer-System darstellbar. Die Spindelwelle ist ein schwingungsfähiges System. Die Eigendämpfung ist relativ gering. Die wesentlichen Dämpfungsglieder sind die Lagerstellen. Folgende Parameter sind hervorzuheben und haben großen Einfluss auf die dynamischen und statischen Lagereigenschaften [75][132]:

- Anzahl der Lager
- Lagerabstand
- Größe und Qualität der Auflagefläche
- Nachgiebigkeit bzw. Steifigkeit
- Dämpfungseigenschaften
- Vorspannung

Ein Spindelmodell für die bereits besprochene Simulation setzt auf drei Faktoren auf. In der Simulation setzt sich die Welle aus Zylinderstücken mit unterschiedlichen Durchmessern zusammen. Aus Gesetzen der technischen Mechanik ergibt sich das Schwingungsverhalten der Konstruktion. Hier werden die obengenannten Einflüsse der Lagerstellen berücksichtigt. Bild 113 zeigt die Kraftkomponenten, die während der Zerspanung auf die umgebaute Spindel einwirken können.

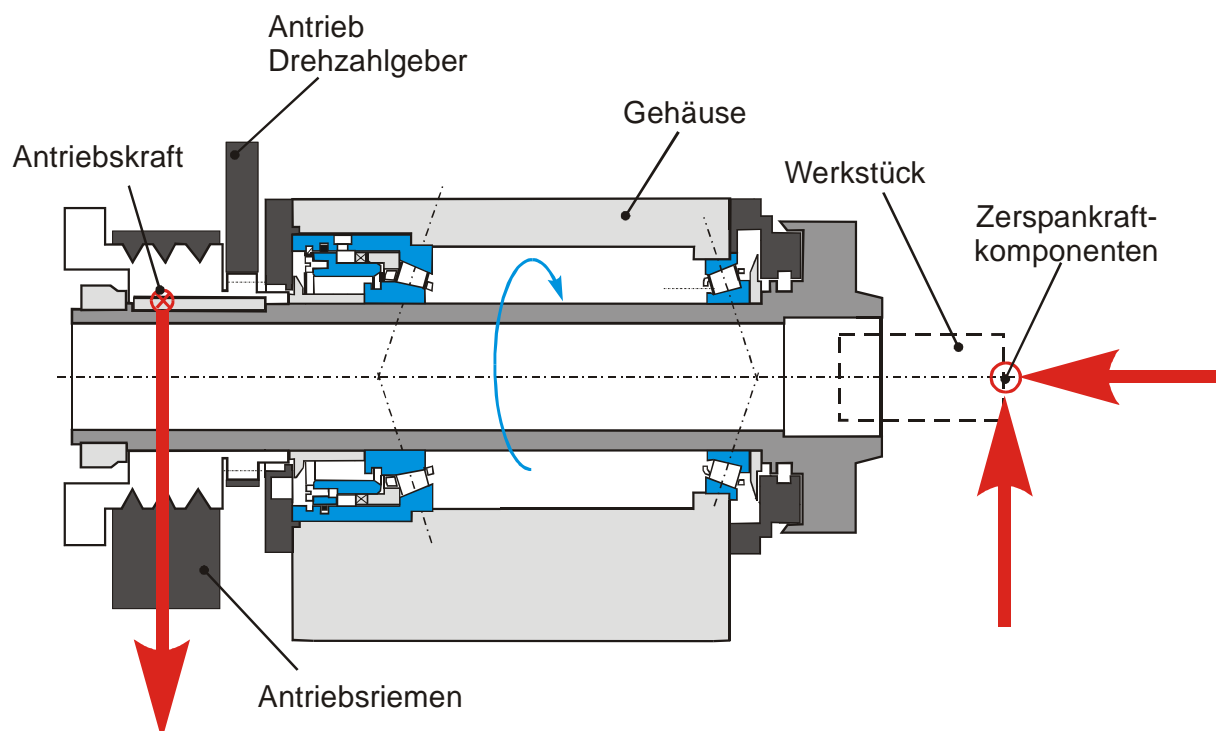


Bild 113: Spindelbelastung während der Drehbearbeitung

Auf einer Seite der Spindel wirkt die Zerspankraft, die für diese Drehmaschine bis zu 4.000 N betragen kann. Diese Kraft kann in drei Komponenten: die Schnittkraft, Vorschubkraft und die Passivkraft zerlegt werden. Die Bearbeitung verursacht Maschinenschwingungen, die sich über die Spindel in Form von Axial-, Tangential- und Radialkräften auf die Lager übertragen und von ihnen aufgenommen werden.

Die Lager bewirken eine Dämpfung dieser Schwingungen, so dass nur ein Teil der verursachten Schwingungen auf das Gehäuse übertragen wird. Dabei ist die Höhe der Dämpfung im Wesentlichen von den eingesetzten Lagern und deren Eigenschaften abhängig. Die eingesetzten Kegelrollenlager sind durch die guten Dämpfungseigenschaften bekannt. Somit ist nur ein Teil der Schwingungen, die in der Spindel durch den Zerspanvorgang entstehen, direkt an dem Gehäuse messbar.

Durch den Riemenantrieb wird vom Motor eine weitere Kraft auf die Spindel übertragen, die die Zerspannung erst möglich macht. Das Drehmoment dieser Kraft ist betragsmäßig gleich mit dem Drehmoment der Tangentialkraft, besitzt aber einen anderen Komponentenvektor [136].

8.3 Messaufbau für die Versuchsmaschine

8.3.1 Temperatur- und Geometriemessung

Für einen effektiven Einsatz der innovativen Spindellagerung in der Produktion, sind sowohl die genauen Eigenschaften dieser Spindel als auch deren Einsatzrandbedingungen erforderlich. Einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Spindel hat die Betriebstemperatur. Ebenso ist es von großer Bedeutung zu beurteilen, wie sich die Lagerung auf das Bearbeitungsergebnis, bzw. die Oberflächenbeschaffenheit der Werkstücke auswirkt.

Bei normalen Betriebsbedingungen wird der Hauptteil der durch die Lager erzeugten Wärme durch elastohydrodynamische Verluste im Rollen/Laufbahn-Kontakt erzeugt. Diese Wärme wird durch die Ölzirkulation des Schmierstoffs und durch das Gehäuse abgeführt. Durch die komplexe Bauart der Spindel ist es nicht möglich, die Betriebstemperatur direkt am Lager zu messen. Deshalb ist es sinnvoll die Temperaturmessungen am Ölabbfluss vorzunehmen und dabei einen Teil der abgeführten Wärme zu ermitteln. Weiterhin ist es wichtig die Temperaturerhöhung des Schmieröls durch die Ölzirkulation bei ruhender Spindel zu berücksichtigen, da dies die Messwerte beeinflusst [114].

Für die Temperaturmessung wird ein Temperatursfühler (Termophil Typ 4028) verwendet, der direkt in den Ölabbfluss eingesetzt wird. Das Messsignal des Fühlers wird im Anzeigegerät verstärkt, linearisiert und auf einer digitalen Temperaturanzeige dargestellt. Während des Betriebes ist eine Temperaturerhöhung der Spindel zu bemerken, die sich auf die axiale Positionierung auswirkt. Dieses axiale Verschieben der Spindel hat Einfluss auf die Bearbeitungsgenauigkeit in Z-Richtung. Es ist daher sinnvoll diese Größe zu ermitteln. Dafür wird zuerst die Spindel eine gewisse Zeit in Betrieb gesetzt bis sich die Temperaturerhöhung über die Länge der Spindel ausgebreitet hat [33]. Gemessen wird die Verschiebung der Spindel mit einer Messuhr während der Abkühlung.

8.3.2 Messaufbau für die Steifigkeitsmessung

Die statische Steifigkeit eines Spindel­systems ist das Verhältnis einer auf­gebrachten Belastung zu der dadurch hervorgeru­fenen Durchbiegung am Lastangriffspunkt.

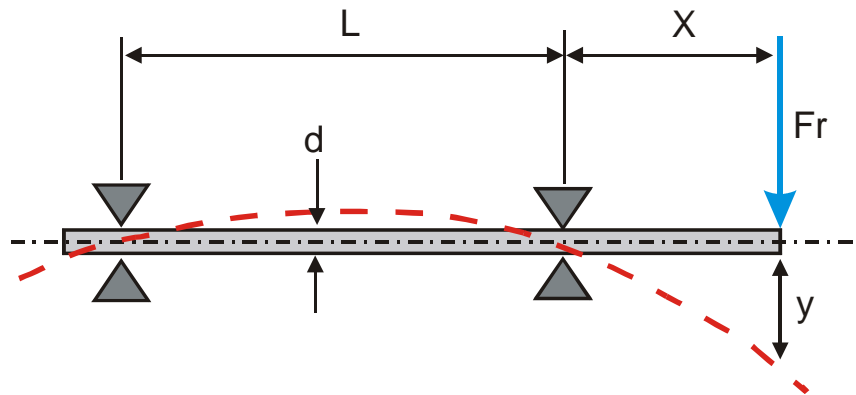


Bild 114: Prinzip­skizze einer Spindel mit einer 2-Punkt-Lagerung [8]

Die wichtigsten Einfluss­größen auf die statische Steifigkeit des in Bild 114 skizzierten Lager­systems sind der Lager­abstand L, die Krag­arm­länge X und der Spindel­durchmesser d.

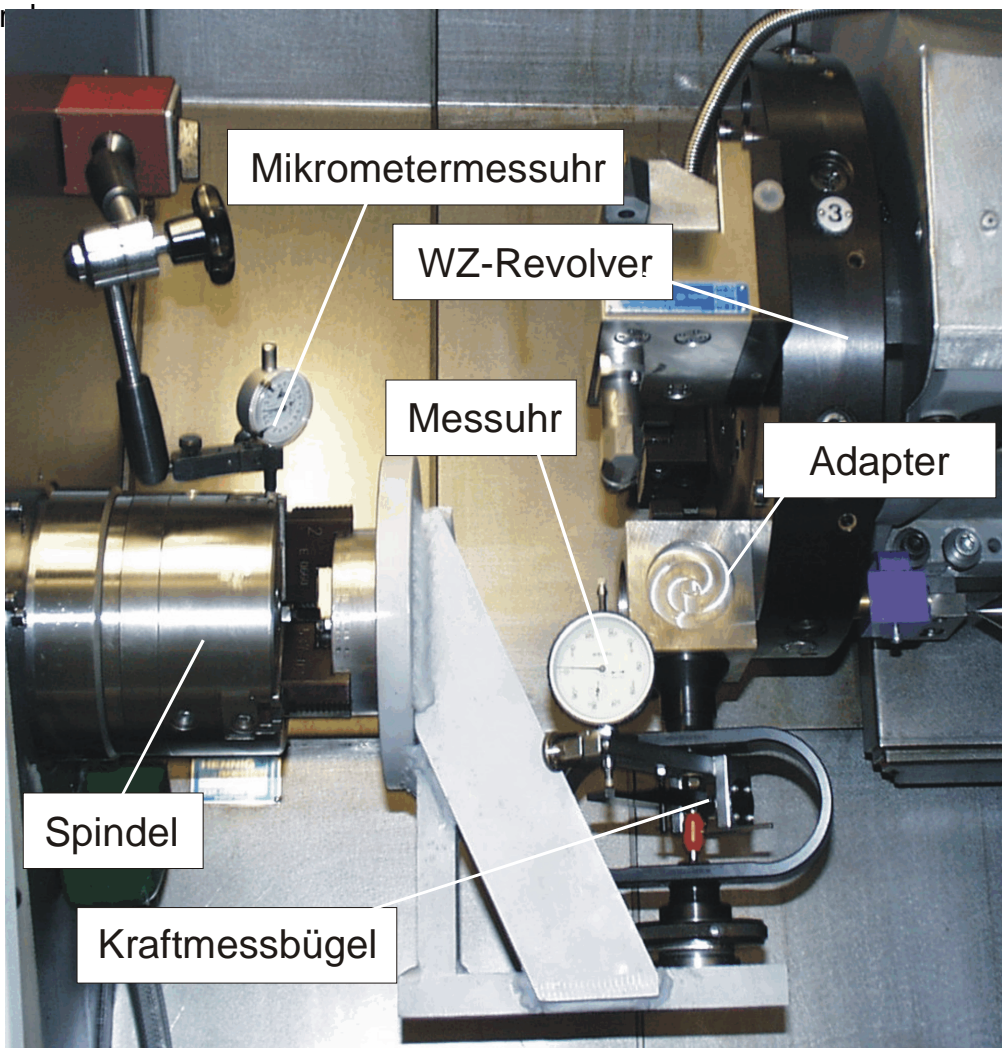


Bild 115: Aufbau der Steifigkeitsmessung

Für die Steifigkeitsmessung an der Drehmaschine wird ein Kraftmessbügel verwendet (Bild 115), der in die Spindel mit einer Aufnahmevorrichtung befestigt wird. Anstatt eines Werkzeughalters wird in den Werkzeugrevolver ein Adapter eingespannt. Der Kraftmessbügel wird zwischen der Aufnahmevorrichtung und dem Adapter eingebaut und befestigt. Am Spindelende wird für die Ermittlung der Spindeldurchbiegung eine Mikrometermessuhr positioniert.

Der Kraftmessbügel hat die Eigenschaft, dass jeder Anzeigewert auf der Messuhr proportional seiner Verformung ist und daher einer definierten Druckkraft entspricht. Die Druckkraft wird mit Hilfe des Adapters entweder durch das Bewegen des Werkzeugrevolvers in der negativen x-Richtung oder über eine Stellschraube aufgebracht.

8.3.3 Messung und Auswertung von Frequenzen

Für einen effektiven Einsatz dieser neuen Spindellagerung sind sowohl die genauen Eigenschaften dieser Spindel als auch deren Einsatzrandbedingungen erforderlich. Einen wesentlichen Einfluss hat die Betriebstemperatur bzw. die Geometrieänderung, die aus einer Temperaturerhöhung resultiert und die Geometrieänderung aufgrund der Zerspankräfte. Auf beide Größen hat die Änderung der Lagervorspannung Einfluss. Weiterhin ist für den Aufbau des Regelkreises das exakte Eigenfrequenzverhalten der Maschinenspindel in Abhängigkeit von der Lagervorspannung notwendig.

Jeder Körper hat die Eigenschaft, dass er nach einer Impulsanregung mit einer bestimmten Frequenz ausschwingt. Diese Frequenz wird die Eigenfrequenz des Körpers genannt. Die einfachste Methode die Eigenfrequenzen zu erfassen ist eine Frequenzanalyse der Impulsanregung (Modalanalyse) [110].

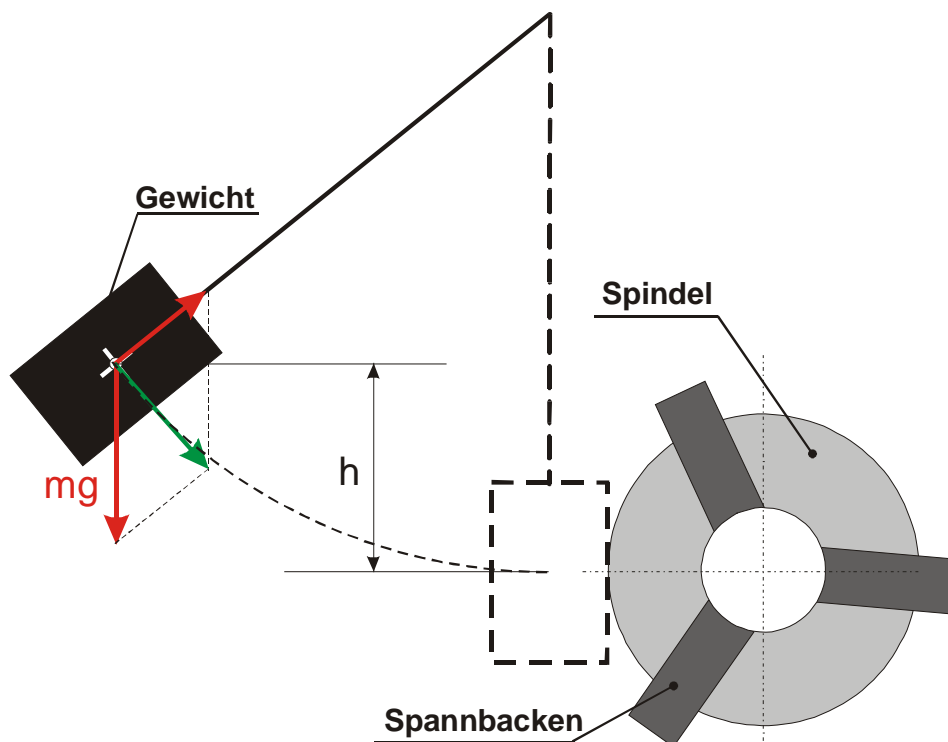


Bild 116: Impulsanregung für die Eigenfrequenzmessung

Für den Vergleich der Ergebnisse ist es wichtig, dass die Impulsanregung immer konstant bleibt. Dadurch ist gewährleistet, dass nach der Datenauswertung durch FFT die Amplituden verschiedener Messungen untereinander vergleichbar sind. An der Maschine ist deshalb ein Gewicht (2.750 g) mittels eines Seiles befestigt, das durch einen gleichbleibenden Auslenkungswinkel von 25° die Spindel immer mit einem konstanten Impuls anregt.

Die potentielle Energie berechnet sich nach der physikalischen Formel:

$$E_{pot} = mgh \quad (38)$$

Zuerst ist aber die Berechnung der Höhe h erforderlich. Dafür wird das Pendel vor und nach der Impulsanregung beobachtet (Bild 116). Bei bekanntem Auslenkungswinkel und der Pendelabmessung, errechnet sich eine Höhe h von 117 mm. Nach dem Einsetzen der bekannten Werte ergibt sich die potentielle Energie:

$$E_{pot} = 2,75kg * 9,81 \frac{m}{s^2} * 0,117m = 3,16J \quad (39)$$

Beim Aufprall des Pendels versetzt diese Energie die Spindel in eine Schwingbewegung. Durch die Erfassung und Auswertung dieser Schwingungsverläufe werden die Eigenfrequenzen der Maschine ermittelt. Die dafür benötigten Messgeräte sind in Bild 117 dargestellt.

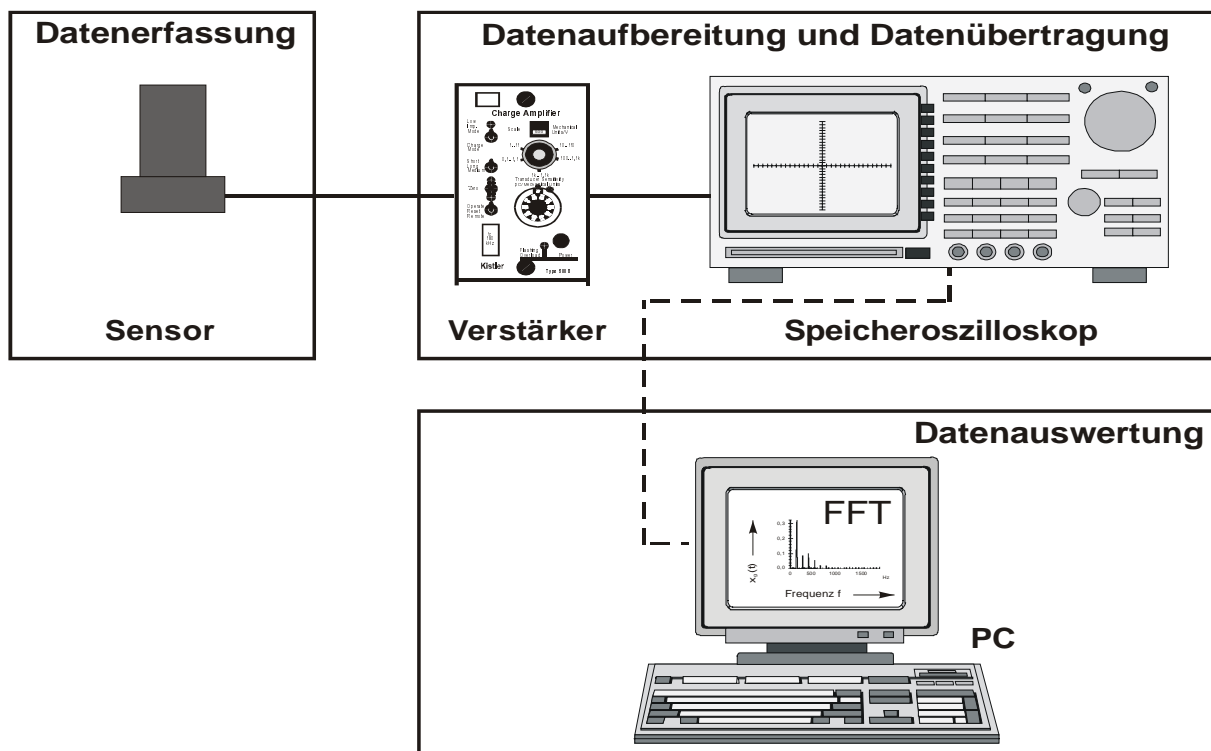


Bild 117: Datenverlauf bei der Schwingungsmessung

Durch das Pendel hervorgerufene Schwingungen werden von einem piezoelektrischen Vibrationssensor erfasst und mittels eines Ladungsverstärkers verstärkt. Dieses Signal wird unter Verwendung eines Speicheroszilloskops mit einer bestimmten Abtastfrequenz aufgenommen und gespeichert. Für die Datenauswertung wird eine Software benötigt, die die Möglichkeit der FFT Berechnung und der Darstellung von Spektren bietet. Für die Ermittlung des Frequenzspektrums bei Maschinenleerlauf und während der Bearbeitung wird die gleiche Messkette verwendet.

8.3.4 Datenerfassung

Verwendet wurden zwei piezoelektrische Vibrationssensoren der Fa. Kistler mit unterschiedlichen Abmessungen, Sensorempfindlichkeit, Befestigungsart und technischen Kenndaten. Die Sensoren bestehen im wesentlichen aus Quarzkristall-Messelementen, den seismischen Massen, einem integrierten Verstärker und dem Sensorgehäuse. Die Sensoren messen die senkrecht zur Montagefläche auftretenden Beschleunigungskräfte. Diese werden von den Quarzelementen in eine elektrische Ladung umgewandelt. Der integrierte Verstärker (Piezotron) wandelt die Ladung in ein Spannungssignal um. Das Piezotron ist ein miniaturisierter Elektrometerverstärker, der durch einen Kuppler mit einem Konstantstrom von ca. 4 mA gespeist wird. Durch den integrierten Verstärker hat der Sensor bereits einen Ausgang mit niedriger Impedanz. Damit entfällt die Notwendigkeit für ein hochisolierendes Kabel, wie es bei Sensoren mit hoher Impedanz erforderlich ist.

In Tabelle 7 sind die technischen Daten der verwendeten Beschleunigungssensoren dargestellt.

<i>Technische Daten der verwendeten Sensoren</i>		
<i>Typ</i>	<i>Kistler 8614A5001M</i>	Kistler 8618A500
<i>Empfindlichkeit</i>	<i>3,86 mV/g</i>	10,01 mV/g
<i>Montage</i>	<i>Klebmontage</i>	Schraubmontage
<i>Höhe</i>	<i>7,4 mm</i>	22,5 mm

Tabelle 7: Technische Daten der verwendeten Beschleunigungssensoren

8.3.5 Auswahl der Sensorpositionen

Ein wesentlicher Einfluss auf die Signalgüte hat die Position des Sensors. Meistens ist die Stelle mit den aussagekräftigsten Sensorsignalen nicht zugänglich und macht die Suche nach geeigneten Sensorpositionen erforderlich, die die Messung ermöglichen und gleichzeitig ein ausreichendes Signal liefern [147]. Für die Frequenzmessung an der Maschinenspindel sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Die Messungen direkt auf der Welle der Maschinenspindel sind nur bei Spindelstillstand durchzuführen, da keine drahtlose Datenübertragung vorhanden ist

- Für die Messungen beim Maschinenleerlauf und der Drehbearbeitung sind Sensorpositionen erforderlich, die direkt mit der Spindel in Kontakt sind aber während der Messung keine Bewegungen ausführen
- Bei der Eigenfrequenzmessung der Maschine ist zu berücksichtigen, dass der Sensor nur senkrecht zur Montagefläche auftretende Beschleunigungen misst und deshalb möglichst gegenüber der Impulsanregung zu befestigen ist
- Die Montageart (Schraubmontage, Klebmontage) der Sensoren beeinträchtigen zusätzlich die Möglichkeiten der Sensorpositionen

Durch diese Randbedingungen ist die Auswahl der möglichen Sensorpositionen eingeschränkt. Die Messungen der Eigenfrequenzen wird bei einer ruhenden Spindel durchgeführt, wodurch eine größere Auswahl der Sensorpositionen möglich ist. Es ist sinnvoll die Positionen zu variieren, um die Signalgüte in Abhängigkeit von der Sensorposition zu vergleichen. Andererseits ist für die Untersuchungen des Frequenzspektrums bei der Drehbearbeitung und bei Maschinenleerlauf die Auswahl der Sensorpositionen massiv eingeschränkt. Die möglichen Positionen sind dabei auf das Spindelgehäuse beschränkt. Es sind daher für diese Untersuchungen schwächere Signale zu erwarten, da sie durch das Lager gedämpft werden.

In Bild 118 sind die gewählten Sensorpositionen dargestellt. Für die Eigenfrequenzmessung ist die Sensorposition F geeignet, da diese nah an der Erregungsstelle ist und der Impuls in Sensorrichtung verläuft. Dagegen wird an den Sensorpositionen C und D keine hochwertige Sensorgüte erwartet, weil die Spindel in der Regel über eine leichte Unwucht verfügt, die an dieser Stelle Schwingungen hervorruft, die störend auf das Signal wirken.

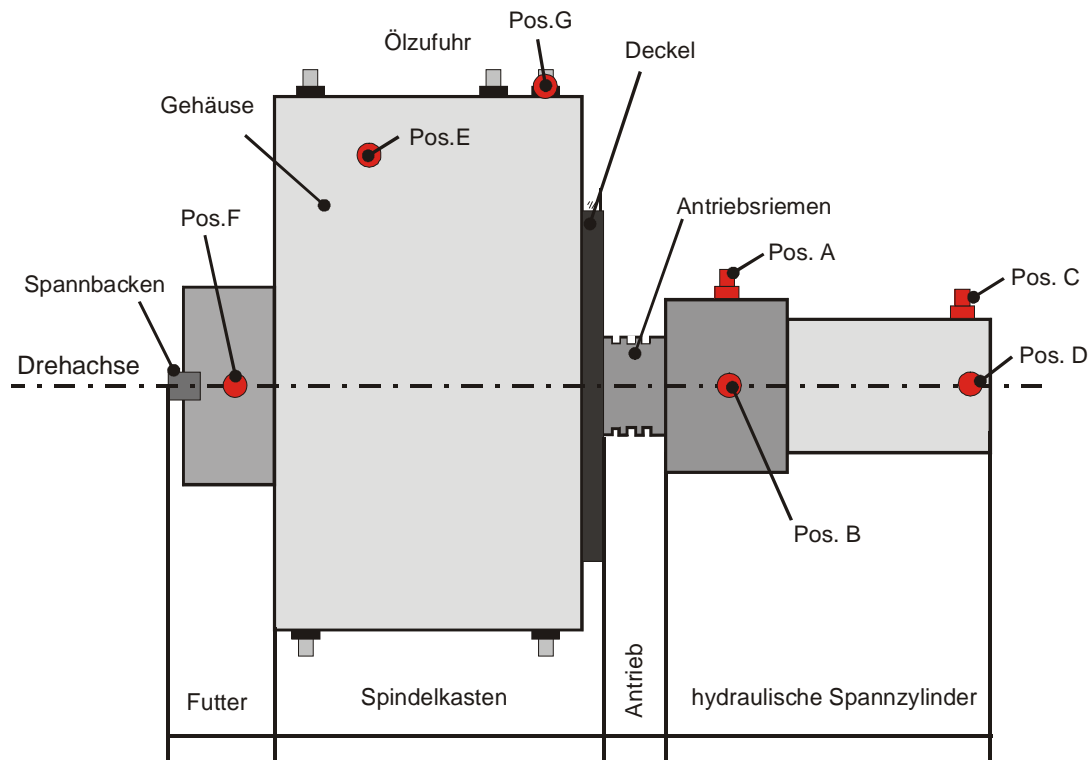


Bild 118: Sensorpositionen der durchgeführten Messungen

8.3.6 Datenauswertung

Für die Datenauswertung durch die Fast-Fourier-Transformation (FFT) werden verschiedene Algorithmen und Software angeboten. Zur Datenauswertung wurde die Software *SpectraLab* eingesetzt. Dies ist ein System zur Hochgeschwindigkeits-FFT-Spektralanalyse mit vielen Möglichkeiten die Daten graphisch darzustellen (z. B. als Spektrogramm oder Wasserfalldiagramm). Neben diesen Vorteilen ist sie sehr bedienerfreundlich.

Für Suche nach einer optimalen Strategie zur Datenauswertung und Überprüfung von Abhängigkeiten der Grenzprofile von Prozessparametern wurde eine Reihe von Versuchen bei Variation von unterschiedlichen Prozessparametern und schwingungskritischen Spanwerkzeugen durchgeführt sowie die Vibrationen mit konventionellen Schwingungssensoren gemessen und gespeichert.

8.4 Ermittelte Eigenschaften der Maschinenspindel

8.4.1 Temperatureigenschaften

Die Wärmeentwicklung im Lager wird von einigen Parametern beeinflusst. Die Erhöhung der Öldurchflussmenge bewirkt, dass die Wärmeabfuhr durch die Ölzirkulation zunimmt. Weiterhin ist der Einfluss der Spindeldrehzahl für die Wärmeentwicklung in den Lagern entscheidend. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Lagervorspannung. Durch die Erhöhung erwartet man eine höhere Wärmeentwicklung aufgrund einer Vergrößerung der Reibung.

Temperaturentwicklung in Abhängigkeit von der Drehzahl

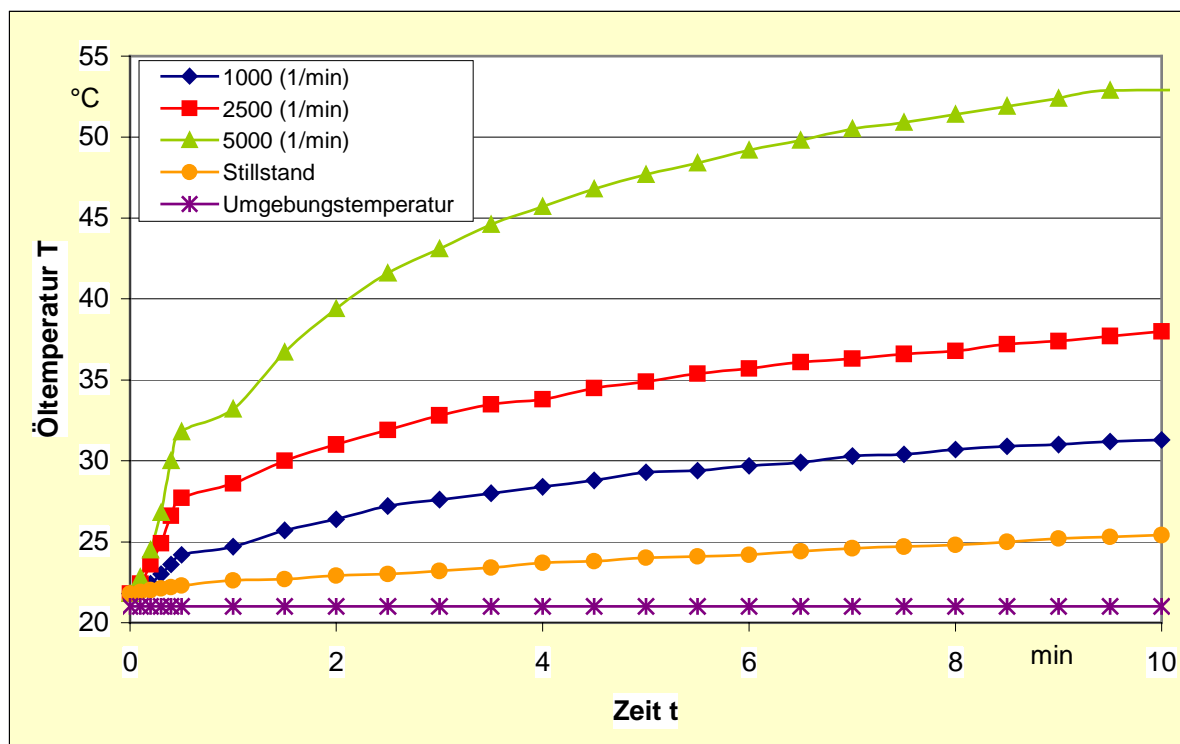


Bild 119: Lagertemperatur in Abhängigkeit zur Drehzahl

Um den Einfluss der Spindeldrehzahl auf die Wärmeentwicklung zu ermitteln, werden Messungen vorgenommen, bei denen nur die Drehzahl variiert wird. Dabei bleiben sowohl Schmierdruck ($P_s=0,5$ bar) als auch Lagervorspannung ($P_v=5$ bar) konstant. Die Öltemperatur wird nicht nur durch die Wärmeabgabe der Lager erhöht, sondern auch durch die Hydraulikanlage der Maschine selbst beeinflusst. Deshalb ist es erforderlich, auch bei Spindelstillstand Temperaturmessungen vorzunehmen, um diesen Einfluss aus den Messergebnissen herausfiltern zu können.

Das Diagramm in Bild 119 zeigt den zeitlichen Verlauf der Öltemperatur bei unterschiedlichen Drehzahlen und bei Spindelstillstand. Es ist zu erkennen, dass die Erhöhung der Drehzahl eine Steigerung der Öltemperatur bewirkt. Das heißt, dass mit der Erhöhung der Drehzahl eine höhere Wärmeentwicklung vorliegen muss, die durch die Ölzirkulation abgetragen wird. Weiterhin ist es möglich, anhand dieser Ergebnisse eine Kennlinie zu ermitteln, die es ermöglicht für jede beliebige Drehzahl die entsprechende Temperatur abzuschätzen. Für die Ermittlung der Temperatur wird zuerst die Differenz zwischen der Öltemperatur bei der Drehzahl von 1.000 U/min und der Öltemperatur bei Spindelstillstand bestimmt. In Tabelle 8 sind die für die Temperaturberechnung erforderlichen Kompensationswerte dargestellt.

Zeit [min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperatur bei Stillstand	21,0	22,6	22,9	23,2	23,7	24,0	24,2	24,6	24,8	25,2	25,4
Temperaturdifferenz [°C]	0	1,7	3	3,7	4,1	4,6	4,8	5	5,2	5,2	5,3

Tabelle 8: Korrektur für die Temperaturerhöhung durch den Einfluss der Hydraulikanlage

Zur einfachen Bestimmung der erreichbaren Öltemperatur kann folgende Formel verwendet werden:

$$T(n,t) = \frac{n(t)}{1000} * T_d + T_s \quad (40)$$

$T(n,t)$ - gesuchte Lager/Öltemperatur in Abhängigkeit von der Drehzahl und der Zeit

$n(t)$ - Drehzahl, T_d - Temperaturdifferenz, T_s - Temperatur bei Maschinenstillstand

Aus der Gleichung ist zu erkennen, dass die zeitliche Temperaturerhöhung proportional zu der Drehzahl ist. Mit steigender Drehzahl steigt auch die Ungenauigkeit dieser Temperaturabschätzung. Bei hohen Drehzahlen ist mit einer maximalen Abweichung von ± 3 °C zu rechnen.

Temperaturentwicklung in Abhängigkeit von der Lagervorspannung

Durch die Variation der Lagervorspannung entstehen unterschiedliche Reibungsverhältnisse, die die Wärmeentwicklung beeinflussen. Wie hoch dieser Einfluss ist, wird durch Temperaturmessungen bei Variation des Vorspanndruckes erforscht. Dabei sind die Parameter Schmierdruck ($P_s=0,5$ bar) und Drehzahl ($n=1.000$ U/min) während der Messungen konstant.

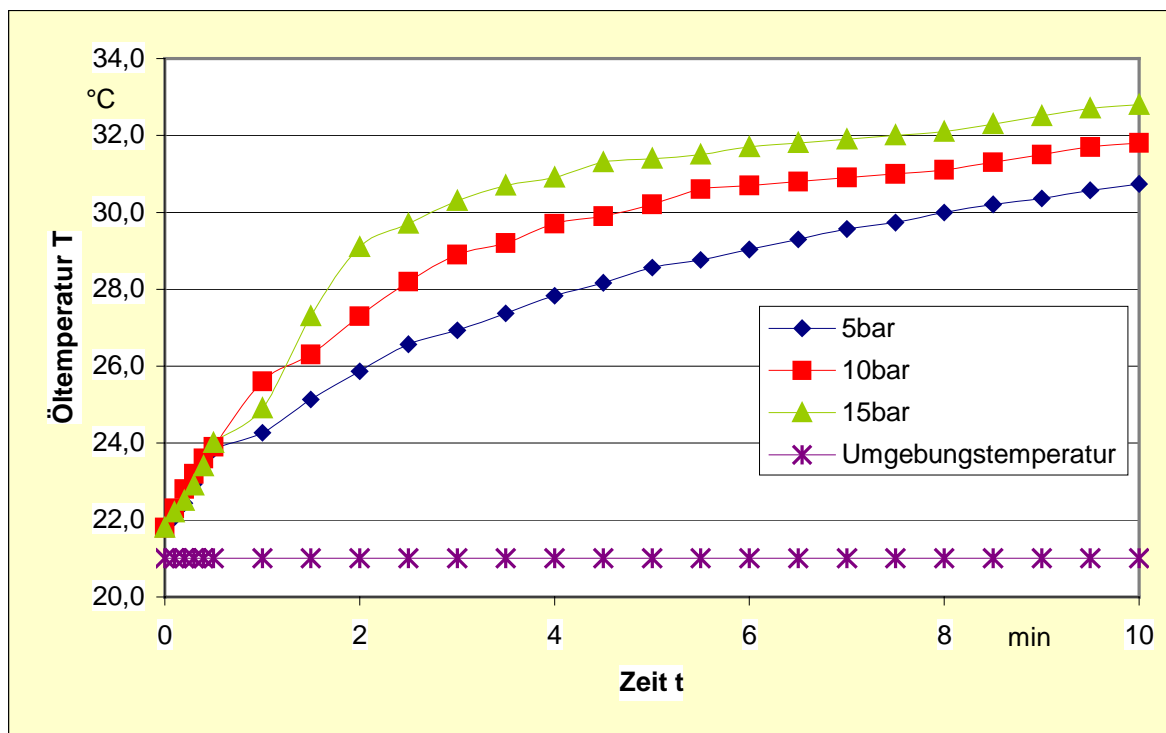


Bild 120: Lagertemperatur in Abhängigkeit von der Lagervorspannung

In Bild 120 ist der Einfluss der Lagervorspannung auf die Temperaturerhöhung gezeigt. Mit der Erhöhung der Lagervorspannung um 5 bar ist nach 10 Minuten Betrieb der Drehmaschine mit einem Anstieg der Öltemperatur um ca. 1 °C zu rechnen.

Ergebnisse

Aus den Ergebnissen der Temperaturmessungen ist festzustellen, dass von den geprüften Parametern die Spindeldrehzahl einen signifikanten Einfluss auf die Erhöhung der Öltemperatur hat. Dabei ist die Beeinflussung des Schmierdrucks auf die Temperaturerhöhung gering, so dass dieser Parameter vernachlässigt werden kann. Die Lagervorspannung hat nur bei längeren Bearbeitungszeiten eine Auswirkung auf die Erhöhung der Öltemperatur. Durch diese indirekte Temperaturmessung sind nur Aussagen über die Beeinflussungshöhe der Parameter zu treffen, da die tatsächliche Betriebstemperatur der Lager nur mit großem Aufwand messbar ist.

8.4.2 Frequenzverhalten der Drehmaschine

Eigenfrequenz der Drehmaschine

Die FFT Berechnung ist für einen Zeitbereich von 0,2 - 0,4 s vorgenommen worden, weil die Eigenfrequenzen erst nach Abklingen des Impulses zu bemerken sind. Vergleicht man das Frequenzspektrum dieser Messungen, ist zu erkennen, dass sich ein Peak um ca. 400 Hz einstellt.

Diese Messungen wurden bei Maschinenstillstand und mit einem Impulsschlag bei 5 bar Lagervorspannung durchgeführt.

Für die folgende Frequenzanalyse wurde nur ein Ausschnitt der aufgezeichneten Signale ausgewertet, da hier Eigenfrequenzen untersucht wurden. Dieser zeitliche Bereich wurde zwischen 50-70 ms nach dem Impuls gewählt. Vor diesem Zeitbereich waren durch die Anregung alle Frequenzen im Frequenzspektrum vorhanden, so dass keine Eigenfrequenzen erkennbar waren. Nach dem Zeitbereich von 70 ms war das Signal so weit gedämpft, dass die überhöhten Frequenzen verschwanden. Die Eigenfrequenz der Drehmaschine ist in Frequenzbereichen von ca. 100 Hz bis 1.000 Hz zu erwarten. Dadurch ist dieses Kriterium schon ab der Abtastfrequenz von 2.000 Hz erfüllt.

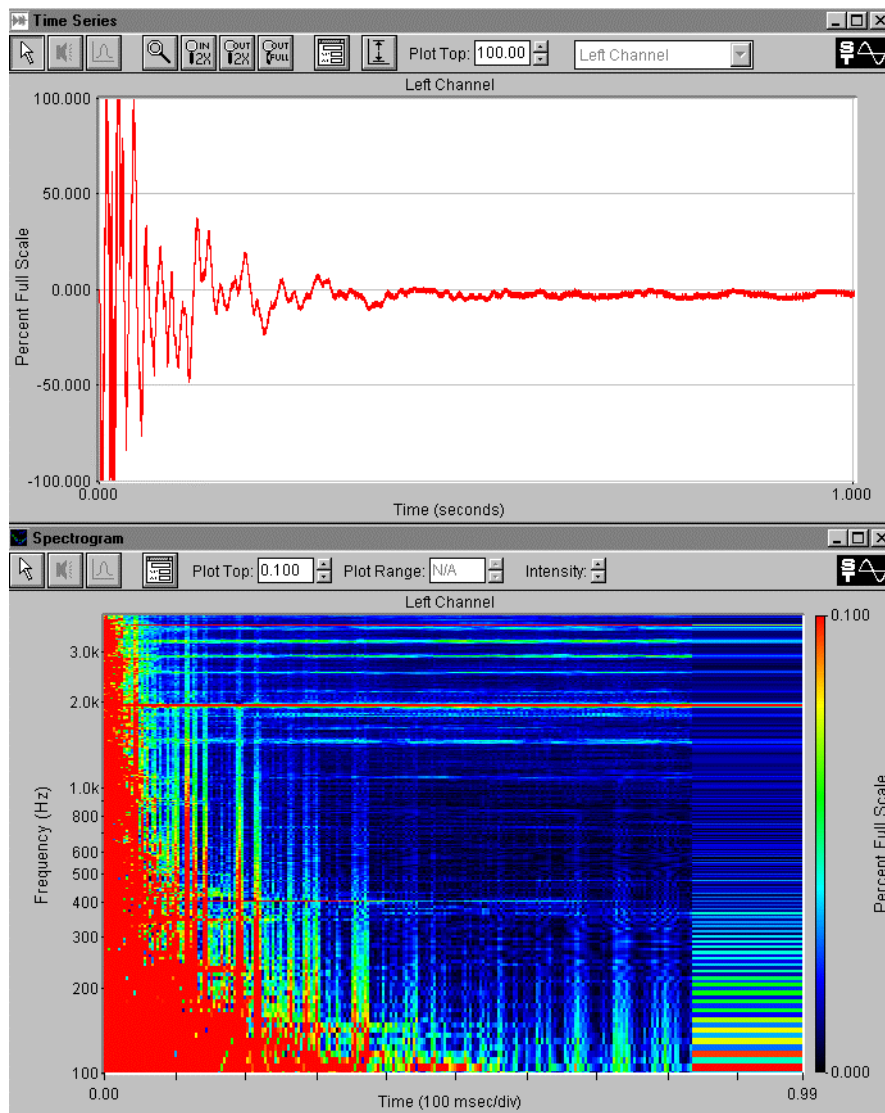


Bild 121: Beispiel einer FFT-Analyse mit Zeitsignal und Frequenzspektrum

Für die durchgeführten Messungen wurde aber eine Abtastfrequenz von 2 MHz gewählt. Der Grund dafür ist der Schwingungsverlauf bei den Messungen. Durch den Impulsschlag wird eine Schwingung verursacht, die in einigen Millisekunden wieder vollständig ausklingt. Für die Ermittlung der Eigenfrequenzen ist nur ein kleiner Bereich dieses Verlaufs von Bedeutung. Bei einer niedrigeren Abtastfrequenz ist es

nicht mehr möglich über diesen Bereich die Fast-Fourier-Transformation durchzuführen, da zu wenig Messpunkte im gewählten Zeitsegment liegen. Diese hohe Abtastfrequenz wirkt sich negativ auf die Frequenzauflösung aus, so dass diese ca. 500 Hz beträgt. Diese schlechte Frequenzauflösung ist für die Messungen nicht akzeptabel, da man möglichst genaue Werte der Eigenfrequenzen ermitteln will. Durch die Erhöhung des Dezimierungsverhältnisses in der Softwareeinstellung ist es möglich, die Frequenzauflösung auf etwa 20 Hz zu reduzieren.

Die Sensorvariation wurde auch bei diesen Messungen vorgenommen, wobei die beste Sensorgüte in der Nähe der Anregung zu erwarten waren. Um den Einfluss der Lagervorspannung auf das Eigenfrequenzverhalten der Drehmaschine zu ermitteln, wurden Messungen mit Variation der Lagervorspannung bei gleichen Messbedingungen durchgeführt. Dabei wurde für jede Messung die Lagervorspannung um 5 bar erhöht, wobei der Schmierdruck ca. 1 bar beträgt und während den Messungen nicht verändert wurde. Der Zeitbereich, der für die Fast-Fourier-Transformation benutzt wurde, lag zwischen 50-70 ms, weil hier die Eigenfrequenzen der Drehmaschine am besten zu erkennen waren.

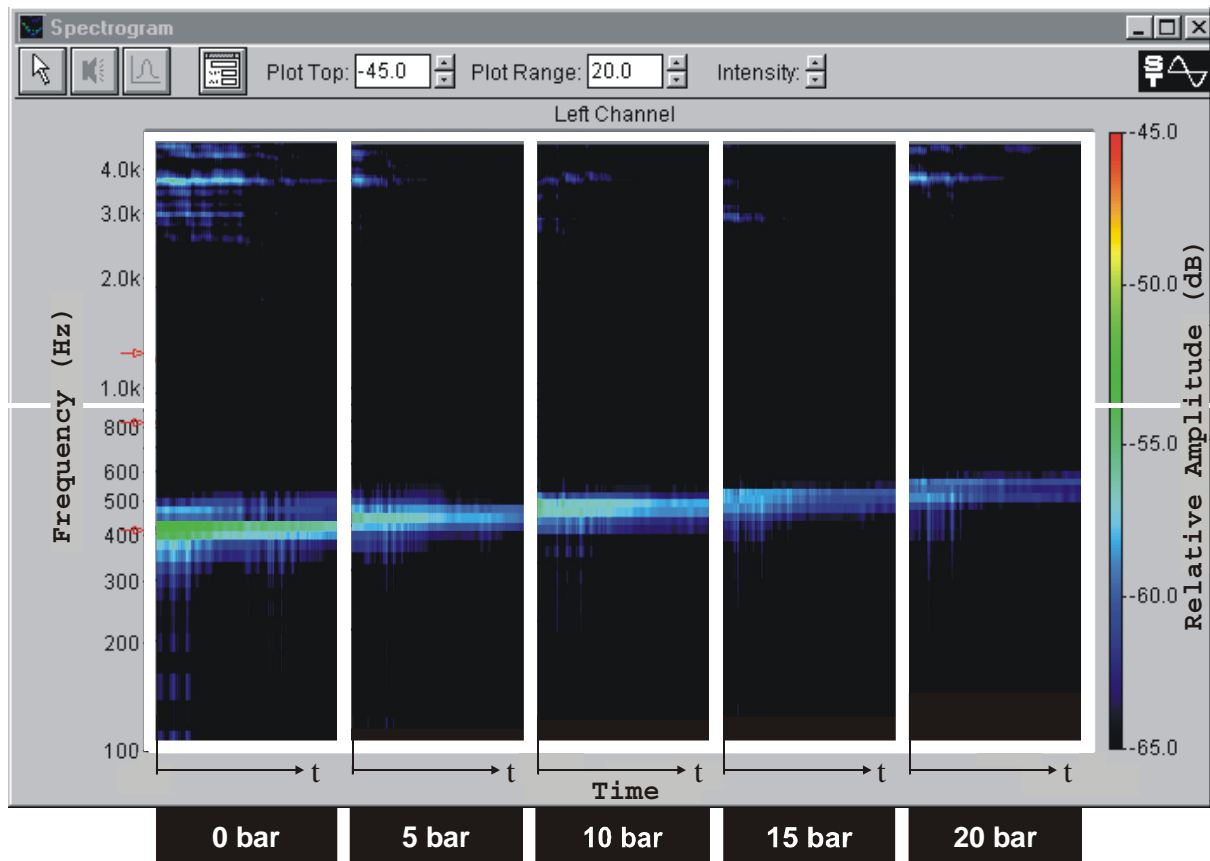


Bild 122: Frequenzspektrum bei Eigenfrequenzmessungen bei Variation der Lagervorspannung

Das Bild 122 zeigt das Frequenzspektrum bei Variation der Lagervorspannung. Bei diesen Messungen wurde der Sensor von Typ 8614A500M1 (geklebt) auf der Sensorposition F (siehe Bild 118) verwendet. In dieser Darstellung ist zu erkennen, dass die Eigenfrequenz der Drehmaschine um 400 Hz liegt. Die Frequenzauflösung verur-

sacht eine Messunsicherheit von ± 10 Hz. Mit der Erhöhung der Lagervorspannung ist keine messbare Verschiebungen der Eigenfrequenz der Drehmaschine erkennbar.

Nach Berechnungen der Fa. GMN verursacht eine Erhöhung der Axialkraft bzw. Lagervorspannung um ca. 250 N in einer Motorspindel eine Steigerung der Eigenfrequenz um etwa 10 Hz. Wird dabei die relativ hohe Messunsicherheit der verwendeten Messstrecke berücksichtigt, so ist es durchaus möglich, dass eine Verschiebung der Eigenfrequenz stattfindet, die aber mit dieser Messstrecke nicht erfassbar ist. Es ist aber zu erkennen, dass die Lagervorspannung einen geringen Einfluss auf die Höhe der relativen Amplitude hat. Mit der Erhöhung der Lagervorspannung ist eine Reduzierung der relativen Amplitude feststellbar. Da die Frequenzanalyse für den gleichen Zeitbereich vorgenommen wird, deutet die Reduzierung der Amplitude auf ein besseres Dämpfungsverhalten mit der Erhöhung der Lagervorspannung hin.

Das Bild 123 zeigt schematisch zwei Schwingungen mit unterschiedlichen Dämpfungsverhältnissen. Es ist zu erkennen, dass ein besseres Dämpfungsverhältnis ein schnelleres Abklingen der Amplitude zu Folge hat.

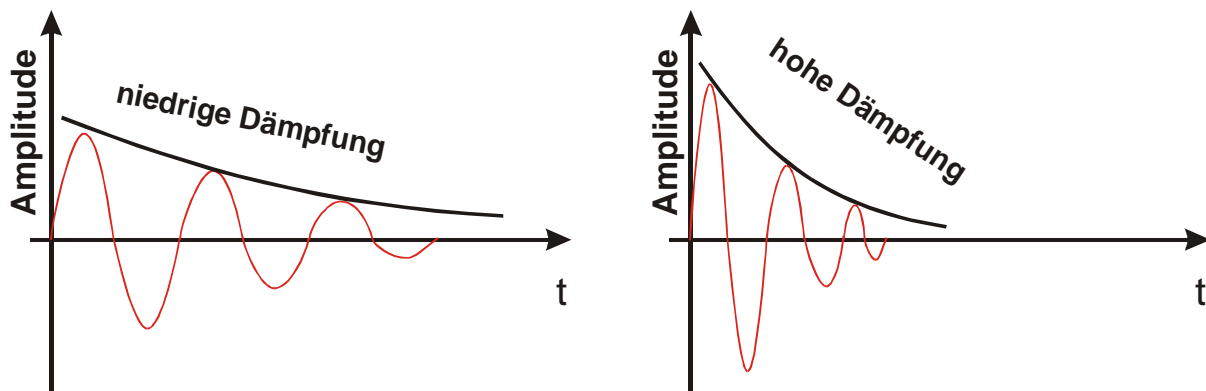


Bild 123: Schematische Darstellung zwei unterschiedlicher Dämpfungsverhältnisse

Die hervorragenden Dämpfungseigenschaften des hydraulisch vorgespannten Kegelrollenlagers machen das Auffinden einer optimalen Sensorposition auf der Außenseite des Spindelkastens problematisch. Ein Anbringen des Sensors auf der Welle ist wegen der benötigten Telemetrie problematisch; die Positionierung am äußeren Lagerring scheitert an den schwierigen Einbauverhältnissen bei der vorhandenen Sensorgeometrie.

Frequenzspektrum im Leerlaufbetrieb

Aus den Messungen ist bislang nur die Eigenfrequenz der Maschine festgestellt worden. Weiterhin ist es erforderlich, das Verhalten der Maschine und deren Frequenzen im Spindelbetrieb zu ermitteln. Zuerst wird das Frequenzspektrum bei Maschinenleerlauf analysiert. Die Sensorpositionen sind bei dieser Messung durch die Spindelrotation eingeschränkt und beziehen sich im Wesentlichen nur auf das Gehäuse. Dabei wurden zwei Sensorpositionen gewählt, die in Bild 118 (Abschnitt 8.3.5) als Sensorposition E und G angegeben sind. Bei diesen Messungen wird eine Variation der Lagervorspannung vorgenommen (5 bar, 10 bar, 15 bar, 20 bar), bei gleichbleibender Drehzahl von 1.000 U/min und gleichem Schmierdruck von 1 bar.

Da bei diesen Messungen nur die Frequenzen von Interesse sind, die während des Maschinenleerlaufs auftreten, sind niedrigere Abtastfrequenzen zulässig. Dabei sollte man berücksichtigen, dass durch die Fourier-Transformation nur Frequenzen darstellbar sind, die unter der Hälfte der gewählten Abtastfrequenz liegen. Bei diesen Messungen ist nur der Bereich bis zu 10 kHz interessant und somit eine Abtastfrequenz von 20 kHz ausreichend. Dies ermöglicht eine bessere Frequenzauflösung und somit auch aussagekräftige Ergebnisse. Es ist für diese Untersuchungen mit einer Messunsicherheit von ± 2 Hz zu rechnen.

Die Variation der Lagervorspannung verursacht unterschiedliche Frequenzen im gesamten Frequenzspektrum. Die gewählte Drehzahl von 1.000 U/min bewirkt, dass die Spindel mit einer Frequenz von 16 Hz angeregt wird. Diese Frequenz ist nicht bei allen Messungen eindeutig zu erkennen, da die Frequenzauflösung dafür nicht ausreichend ist. Neben der Frequenz, die durch die Drehzahl entsteht sind auch weitere Frequenzen vorhanden. Eine davon ist die Frequenz von ca. 300 Hz, die unabhängig von der eingestellten Lagervorspannung immer vorhanden ist. Der Unterschied, den dabei die Lagervorspannung hervorruft, ist die Höhe der Amplitude, die mit der Erhöhung der Lagervorspannung steigt. Weiterhin ist die Frequenz von ca. 160 Hz interessant. Wird diese Frequenz in Abhängigkeit von der Lagervorspannung betrachtet, so ist eine Senkung dieser Amplitude mit der Erhöhung der Lagervorspannung zu erkennen.

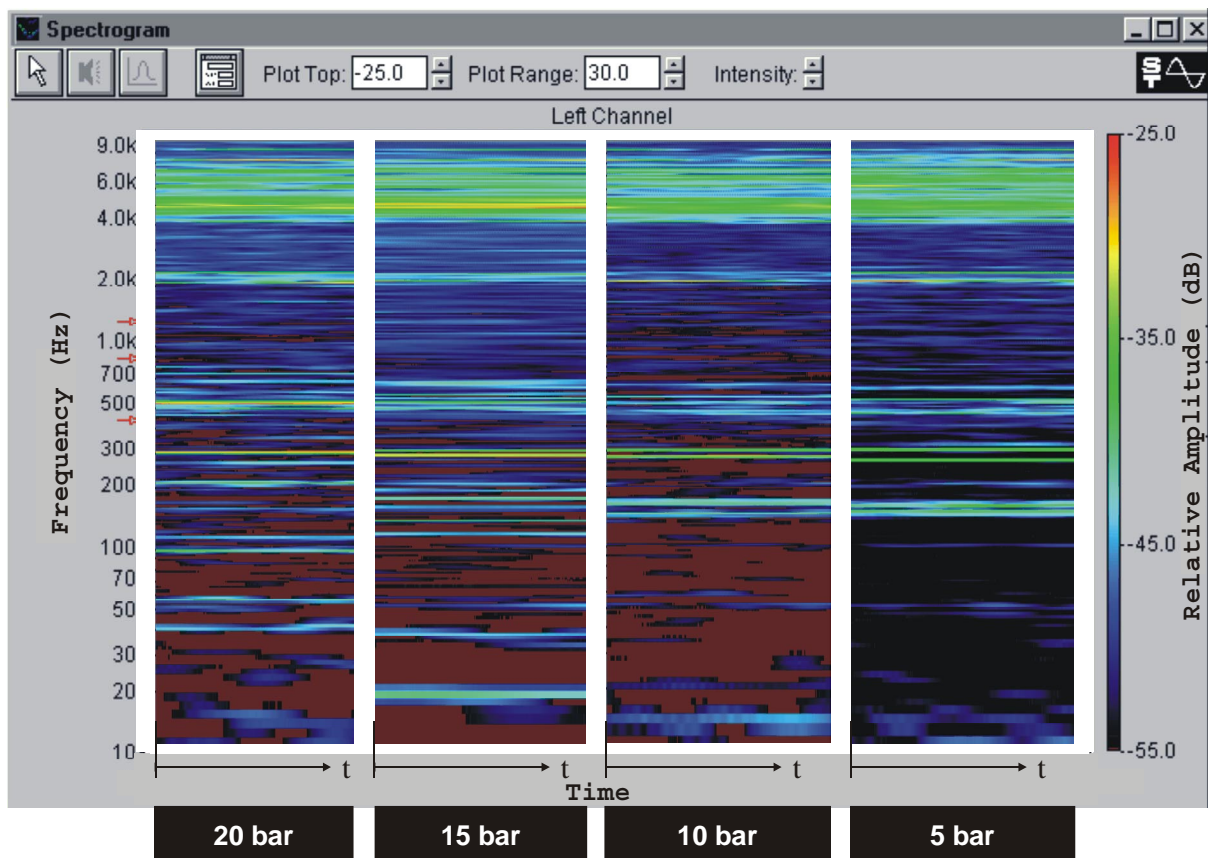


Bild 124: Frequenzspektrum beim Maschinenleerlauf in Abhängigkeit von der Lagervorspannung (Messreihen: g001-g004)

Bei einer Lagervorspannung von 20 bar ist diese Frequenz nicht mehr zu erkennen. In Allgemeinen kann man feststellen, dass die Erhöhung der Lagervorspannung bei einigen Frequenzen eine Reduzierung und gleichzeitig bei anderen Frequenzen eine Steigerung der Amplitude hervorrufen kann. Hier bietet sich ein Ansatz zum Aufbau eines Regelkreises. Die Berechnung der Regelgröße kann über einen Algorithmus realisiert werden, der das Verhältnis bestimmter Amplituden zueinander berücksichtigt.

Frequenzspektrum beim Zerspanprozess

Die Betrachtung des Frequenzspektrums beim Zerspanprozess ist für die Beurteilung der Frequenzen, die eine Störung des Prozesses verursachen können, sehr wichtig. Diese Störungen können sich beispielsweise durch das Pfeifen des Werkzeugs, einer Verschlechterung der Oberfläche oder Rattern bemerkbar machen. Die Messungen der Frequenzen beim Maschinenleerlauf haben gezeigt, dass die Sensorposition am Gehäuse keine ausreichende Informationen liefert. Deshalb wurde für die Messungen beim Zerspanprozess der Sensor direkt am Werkzeug appliziert (Bild 125).

Das typische Pfeifen eines Werkzeugs während der Bearbeitung beruht auf einer Resonanz zwischen der Eigenfrequenz des Werkzeugs und den prozessinduzierten Schwingungen. Diese Schwingungen schädigen die Werkzeugschneide und hinterlassen Strukturen auf der Werkstückoberfläche. Die Schwingungsamplituden sind zu gering als dass man sie am Spindelkasten neben den normalen Spindelschwingungen nachweisen kann. Wie bereits besprochen sind die Dämpfungseigenschaften der Kegelrollenlager zu groß, um eine Messung der Schwingung in der benötigten Auflösung realisieren zu können.

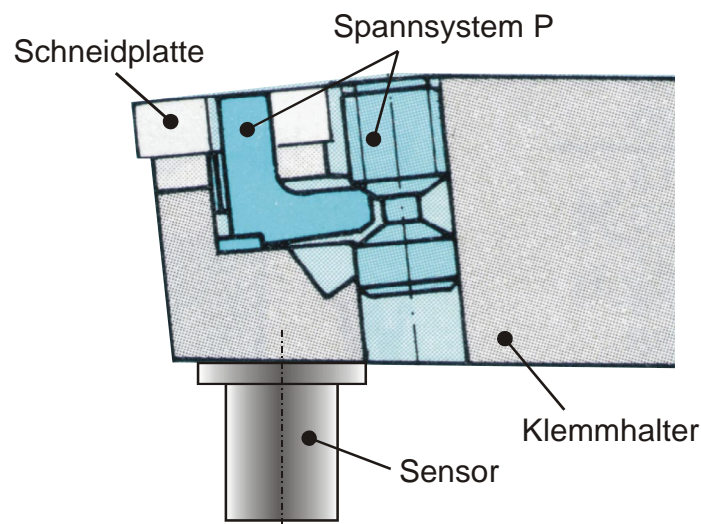


Bild 125: Sensorposition für Referenzmessungen am Drehwerkzeug

Die Position der Sensorik in Prozessnähe auf dem Werkzeug ist für die Signalinterpretation ideal, hat aber den Nachteil, dass der Werkzeugrevolver eine verdrahtete Lösung für die Signalübertragung nicht zulässt. Telemetriesysteme zur Lösung dieser Probleme sind teils am Markt erhältlich, teils in der Entwicklung, haben aber den Nachteil eines hohen Preises. Für die vorliegenden Versuche wurde eine verdrahtete Lösung gewählt, da keine Werkzeugwechselforgänge benötigt werden.

Frequenzspektrum bei einem Schneidenbruch

Die Änderung des Frequenzspektrums in Abhängigkeit von der Lagervorspannung ist für die Ermittlung der Stellgröße für die Eigenfrequenzregelung entscheidend. Diese Stellgröße kann sowohl ein bestimmter Frequenzbereich sein oder aber das Überschreiten einer vorher festgelegten Amplitudenhöhe. Die Prozessregelung kann nur dann erfolgreich aufgebaut werden, wenn die Grenzwerte bekannt sind, bei denen ein störungsfreier Prozess garantiert ist. Für diese Grenzwertermittlung sind Messungen erforderlich, die das Frequenzverhalten des Zerspanprozesses beschreiben.

Die Wahl der Abtastfrequenz hängt auch hier von den Frequenzen ab, die zu beobachten sind und die damit verbundene Frequenzauflösung. Für die Untersuchungen des Frequenzspektrums während des Prozesses wurden die Sensoren an der Sensorposition G (siehe Bild 118, Kapitel 8.3.5) und am Drehwerkzeug appliziert. Die Signalerfassung umfasst dabei den Eintritt der Schneide ins Werkstück und einen Abschnitt der Zerspanung. Weil dieser Bereich unterschiedliche Frequenzen aufweist, ist die Überlappung der FFT-Fenster kleiner als für vorhergehende Auswertungen. Damit wird die Übertragung der Frequenzen auf nachfolgende Fenster der FFT-Transformation verringert (siehe Bild 89, Kapitel 6.3.3). Weitere Prozessparameter sind:

- Schneidplatte: PS5
- Schnitttiefe: 1 mm
- Werkstück: Ck45
- Bearbeitung: Längsdrehen

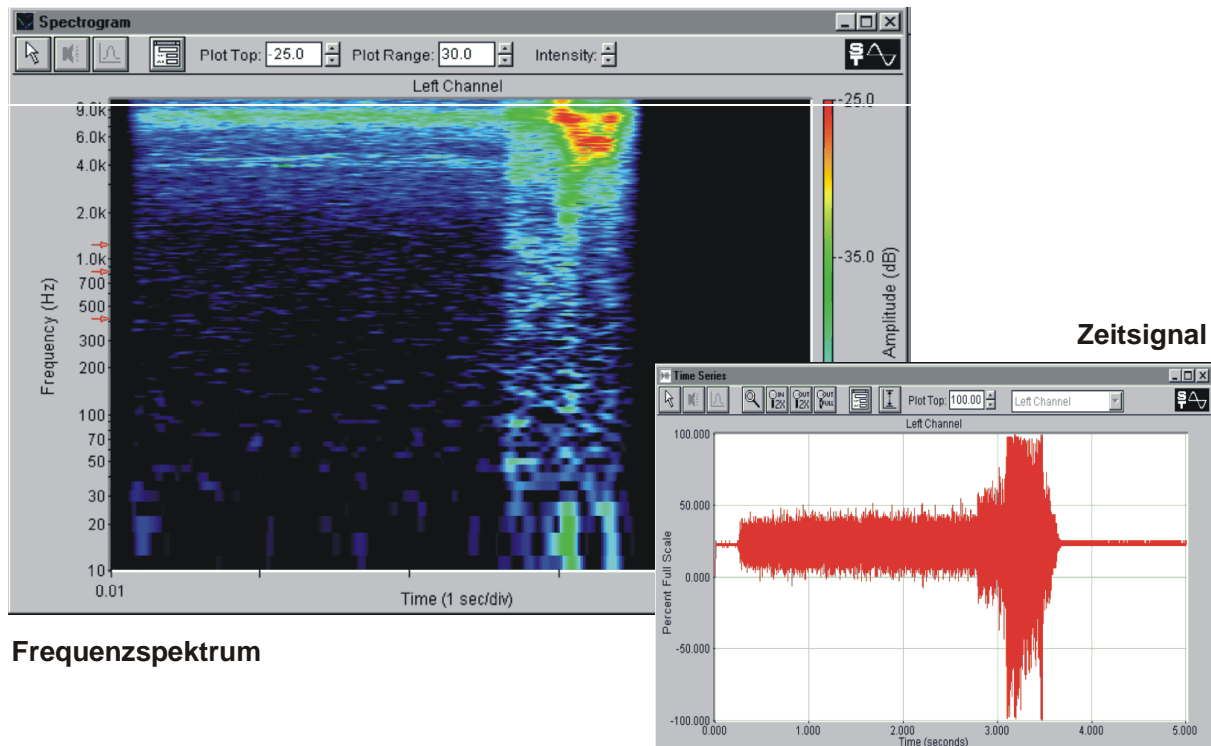


Bild 126: Frequenzspektrum beim Schneidenbruch (Messreihe: H006.ftt)

In Bild 126 ist ein Signalverlauf bei einem Schneidenbruch dargestellt. Diese Messung wurde mit einer Drehzahl von 2.500 U/min und einem Werkstückdurchmesser von 81,0 mm durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass Werkzeugverschleiß zu einer Erhöhung des Signals führt. Der folgende Schneidenbruch ist durch eine drastische Signalerhöhung im Zeitbereich bemerkbar. Wird dieses Signal der Fast-Fourier-Transformation unterzogen, so erhält man die Darstellung im Frequenzbereich. Aus dem dazugehörigen Spektrogramm ist zu erkennen, dass bei Prozessstörungen eine Erhöhung der Amplitude festzustellen ist. Der Werkzeugverschleiß zeichnet sich durch die Steigerung der Amplitude über den gesamten Frequenzbereich aus. Der tatsächliche Schneidenbruch ist durch eine erhebliche Steigerung der Amplitude im Frequenzbereich zwischen 6 und 9 kHz zu erkennen.

8.4.3 Geometrieigenschaften

Die Temperaturerhöhung bewirkt eine Dehnung der Spindel in axialer Richtung. Diese Verschiebung verursacht eine Änderung der Geometrieigenschaften der Spindel und beeinflusst somit auch das Bearbeitungsergebnis. Eine Temperaturdifferenz von ca. 20 °C bewirkt eine axiale Verschiebung von etwa 70 µm.

8.4.4 Oberflächenqualität in Abhängigkeit von der Lagervorspannung

Unter der Einhaltung der gewählten Prozessparameter wird durch die Variation der Lagervorspannung deren Einfluss auf die Werkstückoberfläche untersucht. Für die Lagervorspannung sind Werte zwischen 3-15 bar vom Lagerhersteller empfohlen. Deshalb wurden auch für die Untersuchungen Werte von 3-18 bar gewählt. Als Werkstückwerkstoff wurde Werkzeugstahl Ck45 verwendet.

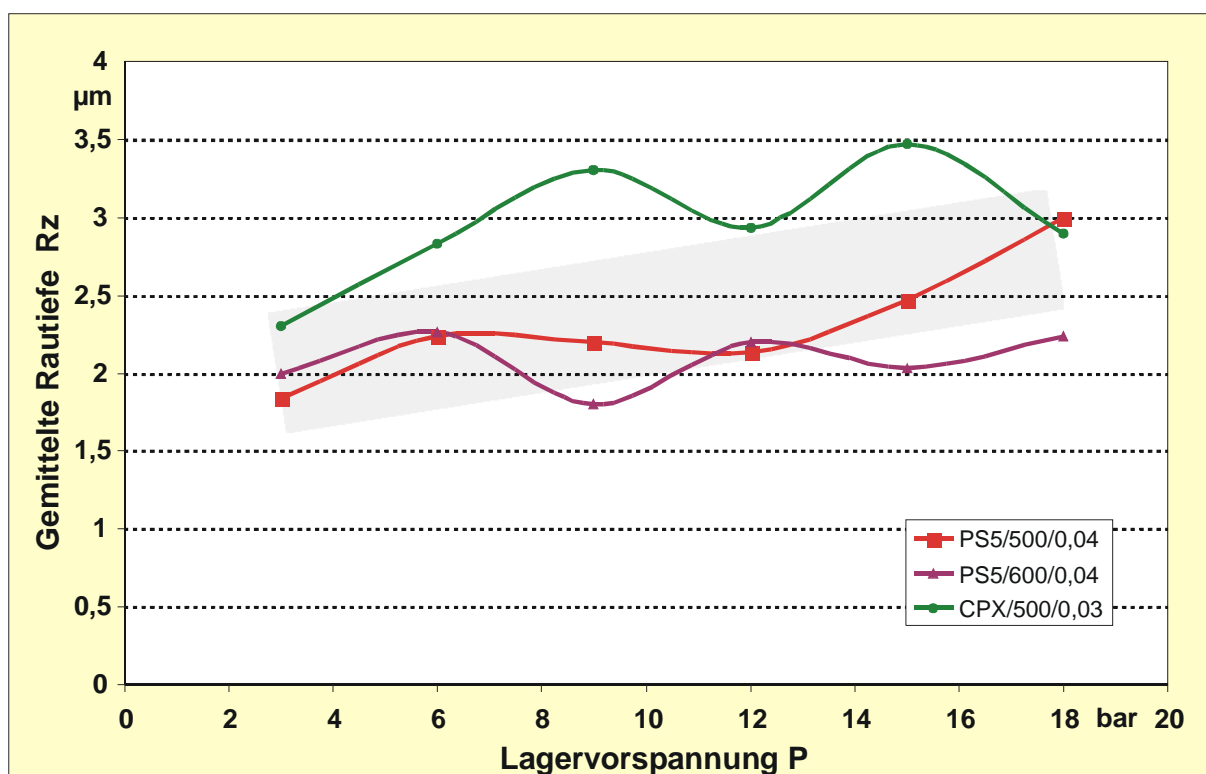


Bild 127: Oberflächenrauheit in Abhängigkeit zur Lagervorspannung für verschiedene Wendeschneidplatten (Schneide/Schnittgeschwindigkeit/Vorschub)

In Bild 127 wurden die Ergebnisse der Oberflächenrauheit beim Feindreihen gezeigt. Dabei ist festzustellen, dass die Schneidplatte PS5 bei einer Schnittgeschwindigkeit von 600 mm/min eine gleichmäßig gute Oberflächengüte über die gesamte Variation der Lagervorspannung aufweist. Dies ist auf die Eigenschaft der Schneidplattenbeschichtung zurückzuführen. Aus dem Diagramm sind keine Aussagen bezüglich einer linearen Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit von der Lagervorspannung möglich. Es ist lediglich eine Abhängigkeit nachzuweisen, aber kein Verhaltensmuster. Tendenziell ist zu erkennen, dass die Rauigkeit mit einer Erhöhung der Lagervorspannung zunimmt. Eine Vermutung für diesen Zusammenhang liegt in einer nachgewiesenen Zunahme der Spindelsteifigkeit und einer geringeren Dämpfung bei höheren Vorspannungen.

8.4.5 Steifigkeit der Spindel

In einer Versuchsreihe wurden an der Versuchsmaschine Ermittlungen der Zerspankräfte und derer Komponenten durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass bei einer Schruppbearbeitung Zerspankräfte bis zu 4.000 N auftreten können. Diese Belastungen verursachen eine Spindeldurchbiegung, die sich wiederum auf das Bearbeitungsergebnis auswirkt. Mit der Änderung der Lagervorspannung wird die statische Spindelsteifigkeit verändert und somit die Nachgiebigkeit der Spindel bei Belastungen bzw. beim Zerspanprozess.

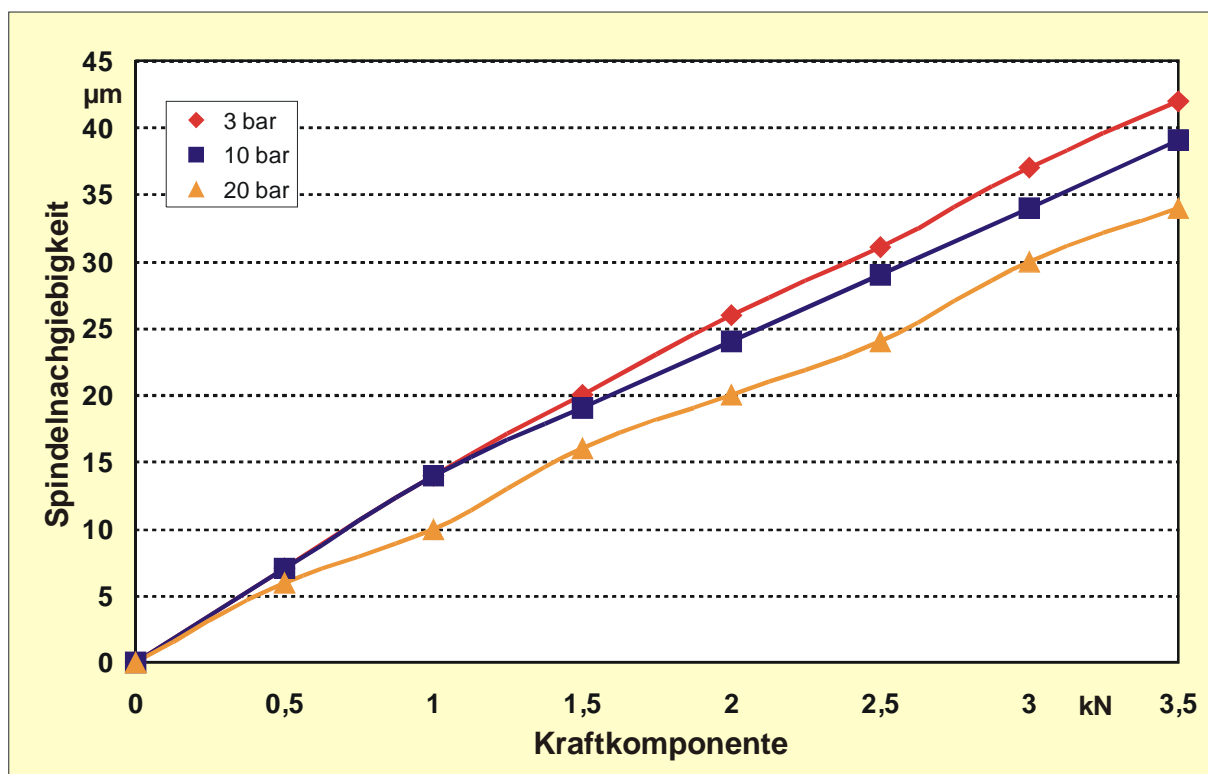


Bild 128: Spindelsteifigkeit in Abhängigkeit von der Kraftkomponente

Bild 128 zeigt die Spindelsteifigkeit in Abhängigkeit von der Lagervorspannung und der Druckkraft. Daraus ist zu erkennen, dass sich eine hohe Lagervorspannung positiv auf die Spindelsteifigkeit auswirkt. Dieser Unterschied wird bei höheren Spin-

delbelastungen deutlicher. Die Kennlinien der Lagervorspannung haben dabei einen nahezu linearen Verlauf. Bei einer Belastung von 3.500 N, was etwa einer maximalen Zerspankraft entspricht und mit der Erhöhung der Lagervorspannung um 10 bar wurde eine geänderte Spindelnachgiebigkeit von ca. 5 μm gemessen. Das nachgewiesene Frequenzverhalten, die Oberflächenqualität und Spindelnachgiebigkeit in Abhängigkeit von der Lagervorspannung unterstreicht das in der Theorie und Simulation beschriebene Ergebnis einer höheren Steifigkeit und geringeren Dämpfung bei erhöhter Lagervorspannung.

9 Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurden große Fortschritte in der Entwicklung neuer Sensoren erzielt. Neue sensitive Materialien auf Halbleiterbasis und hochintegrierte elektronische Bauelemente konnten gefunden werden, die eine Grundlage zur Miniaturisierung, Leistungssteigerung und Kostenverringerung bisheriger Sensorsysteme darstellen. Durch die Integration des Messaufnehmers, der vorverarbeitenden Elektronik und der Auswerteeinheit wurden intelligente Sensorsysteme möglich, die über die reine Messwerterfassung hinaus eine Reihe von Verarbeitungsaufgaben übernehmen.

In dieser Arbeit wurden Lösungen behandelt, um über den Einsatz mechatronischer Systeme die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Werkzeugmaschinen zu erhöhen. Zwei Sensorlösungen wurden beispielhaft realisiert, die Signale, die den Spanprozess charakterisieren direkt auf dem Werkzeug und in der Maschinenspindel erfassen. Der Beweis wird erbracht, dass die Mechatronik eine kostengünstige Alternative zur Maschinenüberwachung ist und als Lösung für eine umfassende Sensorintegration in Werkzeugmaschinen die Zukunft der Branche noch erheblich beeinflussen wird. Es wird großer Wert auf eine klare Definition und Abgrenzung der Begriffe Mechatronik und Mikrosystemtechnik gelegt. Hier bestehen Defizite im Sprachgebrauch und in der Literatur, da diese Wortschöpfungen erst in der jüngsten Zeit entwickelt wurden und es keine klare Zuordnung von Inhalten gibt.

Es wurden zwei mechatronische Systeme vorgestellt, die ein gesamtheitliches Überwachungskonzept für Werkzeugmaschinen ermöglichen. Die parallele Verwendung von intelligenten Maschinenkomponenten an zwei wesentlich qualitätsentscheidenden Positionen, dem Werkzeug und der Werkstückaufnahme, soll beispielhaft die Potenziale des Einsatzes von mechatronischen Systemen in Werkzeugmaschinen beleuchten. Zum einen wurde ein multisensorielles Überwachungssystem für das Drehen realisiert. Kern dieser Entwicklung war die Integration von Sensoren zur 3D-Kraft-, Vibrations- und Temperaturmessung, kombiniert mit einer Signalvorverarbeitung direkt auf dem Drehmeißel. Ein zusätzlich entwickeltes Telemetriesystem ist nötig, um die Funktionstüchtigkeit des rotierenden Werkzeugträgers nicht zu beeinträchtigen.

Eine wichtige Grundlage einer sicheren Prozessüberwachung ist die hohe Güte der Sensorsignale. Diese wird entscheidend vom Aufnahmeort beeinflusst und ist um so höher, je näher sich die Messstelle am Prozess befindet. Das hier vorgestellte Werkzeugüberwachungssystem zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass die Anbringung der Sensorik in unmittelbarer Nähe des Prozesses erfolgt. Dies ermöglichte den Einsatz miniaturisierter Sensoren der Mikrosystemtechnik, die zu einem mechatronischen Sensormodul kombiniert wurden. Dieses Überwachungssystem vereint erstmals mikrosystemtechnische Sensoren zur Erfassung verschiedenartiger physikalischer Größen, die den Schneidprozess charakterisieren und eine leistungsfähige Signalverarbeitungskette, die das Multisensormodul zu einem technologisch neuartigen Komplettsystem zur Werkzeug- und Maschinenüberwachung ergänzt.

Eine weitere im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Entwicklung bezieht sich auf die Erkennung einer Überbeanspruchung oder Schädigung der Spindellagerung einer Werkzeugmaschine. Hierfür wurde ein Vibrationssensor in Mikrosystemtechnik mit einem Keramikgehäuse und einem integrierten Verstärker zu einem mechatronischen System vereint. Das Ergebnis war ein Sensormodul, das allen am Markt verfügbaren vergleichbaren Halbleitersensoren in Belastbarkeit bei gleichzeitiger Dynamik überlegen ist. Die direkte Signalverstärkung minimiert die Störung des Signals. Das Messmodul ist so konzipiert, dass dessen Abmaß klein genug ist, um nahe dem zu beobachtenden Prozess angebracht werden zu können und robust genug, um den Gegebenheiten in einer Werkzeugmaschine standzuhalten.

Dieses Sensorsystem bildet die Grundlage eines Regelkreises, wobei das verwendete Stellglied ein hydraulisch vorspannbares Spindellager darstellt. Dieses für diesen Zweck neuartige Spindelsystem wurde konstruiert und realisiert und in ein bestehendes Drehzentrum eingebaut und getestet. Umfangreiche in dieser Arbeit vorgestellte Messungen charakterisieren das Spindelsystem hinsichtlich seines statischen und dynamischen Verhaltens im Stillstand und im Betrieb. Weitere Potenziale dieser Spindellagerung ist die Möglichkeit der Maximierung der Einsatzdauer von Motorspindeln über die stetige Anpassung der Lagervorspannung.

Neben den Grundlagen werden spezielle Einsatzmöglichkeiten von Sensoren für die Produktionstechnik behandelt. Dem Trend hin zu intelligenten busfähigen Sensoren wird besonders Rechnung getragen. Sensorsysteme gehen den Weg einer höheren Integration von Mikroelektronik bei gleichzeitiger Miniaturisierung. Die Bestrebungen im Bereich der Mikrosystemtechnik oder Mechatronik sind Anzeichen für das große Potenzial, das noch in diesen Technologien steckt.

Literatur

- [1] Behrend, H.: Entwicklung eines lernfähigen Systems zur Beobachtung des Werkzeugverschleißes beim Drehen, Dissertation, TU Braunschweig, Vulkan-Verlag, Essen, 1996
- [2] Beitinger, G.: Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger, Dissertation, Fertigungstechnik - Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1999
- [3] Beitz, W.; Küttner, K.-H. (Hrsg.): Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 18. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995
- [4] Berens, P.: Linearantriebe im Fokus, WB Werkstatt und Betrieb 133(2000), H. 1/2, Hanser Verlag, München, 2000
- [5] Beul, T.: R-S-I Elektrotechnik GmbH, Schweitenkirchen, 1999
- [6] Blank, H.-J.: Sensoren am PC, Markt & Technik Buch- und Software-Verlag, München, 1996
- [7] Blöchl, W.: Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozess- und Programmoptimierung, Dissertation, Fertigungstechnik - Erlangen, Meisenbach-Verlag, Bamberg, 1997
- [8] Blöchl, W.; Herbst, M.: Mikrosystem zur Werkzeugüberwachung an CNC-Drehzentren, in: Tagungsband zur 2. Chemnitzer Fachtagung Mikrosystemtechnik, 16.10.-17.10.1995.
- [9] Böhme, J. F.: Stochastische Signale, B. G. Teubner, Stuttgart 1998
- [10] Brand, A.: Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D MID), Dissertation, Fertigungstechnik - Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1997
- [11] Bühler, W.: Integration der Werkstückhandhabung und Steigerung der Bearbeitungsqualität bei Vertikaldrehmaschinen, Tagungsband: Leistungssteigerung an CNC-Drehmaschinen, FAPS, Universität Erlangen, 17.11.1995
- [12] Büttgenbach, S.; Sturm, H. (Hrsg.), Mikrosystemtechnik - Von den Technologien zur Anwendung, VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (GMM), Frankfurt/Main, 1997
- [13] Byrne, G.: The Status of Research and Development in Tool Condition Monitoring, VDI-Berichte 1179, VDI-Verlag, 1995
- [14] Conrady, H.-G.: Von der Werkzeugüberwachung zur Prozessüberwachung, VDI Berichte, Nr. 1179, 1995
- [15] Dornfeld, D. (Berkeley/USA): Monitoring Technologies for Intelligent Machining, VDI Berichte Nr. 1179, 1995

- [16] Feinauer, A.: Dynamische Maschineneinflüsse auf die Werkstückqualität beim Hochgeschwindigkeitsfräsen, Dissertation, Fakultät Konstruktion und Fertigung, Universität Stuttgart, 1998
- [17] Feldmann, K.; Pitter, F.; Thomas, J.: Schwingungsmessung mit Mikrosystemen in Maschinenspindeln zur Regelung der Lagervorspannung, wt Werkstattstechnik, H. 5, Springer VDI Verlag, 1999
- [18] Föhse, M.: Untersuchungen zur Bruchüberwachung vielschneidiger keramischer Stirnfräser, Universität Hannover, Dissertation, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990
- [19] Franke, J.: Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3D MID), Dissertation, Fertigungstechnik - Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1995
- [20] Fries, E.: Anwendung neuronaler Netze zur Werkzeugverschleißerkennung beim Fräsen, Dissertation, TU Berlin, Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Berlin, 1999
- [21] Fritsche, K.: Lücke geschlossen, Form + Werkzeug 10/96, S. 11 - 14
- [22] Fuchs, E.: Schnelle Quadratmittelapproximation in gleitenden Zeitfenstern mit diskreten orthogonalen Polynomen, Dissertation, Universität Passau, Fakultät für Mathematik und Informatik, 1999
- [23] Gebert, K.: Ein Beitrag zur thermischen Modellbildung von schnelldrehenden Motorspindeln, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Shaker Verlag, Aachen, 1997
- [24] Gebert, K.: Zylinderrollenlager für schnelldrehende Spindelsysteme, Werkstatt und Betrieb 130(1997), H. 9, S. 702-708, Carl Hanser Verlag, München
- [25] Geropp, B.: Maschinendiagnose mit Hilfe der Schwingungsanalyse, Symposiumsband Firma Pall GmbH, Symposium '97, 3.9.-4.9.97
- [26] Geropp, B.: Schwingungsdiagnose an Wälzlagern mit Hilfe der Hüllkurvenanalyse, Dissertation RWTH Aachen, 1995
- [27] Geropp, B.; Burgwinkel, P.; Keßler, H.-W.: Schadensdiagnose an extrem langsam drehenden Wälzlagern mit Hilfe einer preiswerten Schwingungssensorik, VDI-Berichte Nr. 1220, S267-277, 1995
- [28] Göhringer, J.: Multisensorielles Mikrosystem für die Werkzeugüberwachung beim Drehen, Mikrotechnik für die Produktion, Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München, 1996
- [29] Göke, U.: Analytische und experimentelle Untersuchungen zur Öl-Luftschmierung Dissertation, TU Berlin, Produktionstechnik - Berlin, Hanser Verlag, München, Wien, 1994
- [30] Golz, H.-U.; Wolf, A.; Schillo, E.; Kaufeld, M.; Johannsen, P.; Sprengel, P.; Heinek, A.: Bewertung von Werkzeugüberwachungssystemen aus der Sicht der Anwender, in: VDI Berichte 1179 - Überwachung von Zerspan- und Umformprozessen,

- Konferenz Düsseldorf 30./31.03.1995, VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, VDI-Verlag 1995
- [31] Götz, H.: Einführung in die digitale Signalverarbeitung, B. G. Teubner, Stuttgart 1995
- [32] Hagen, T.: Wirtschaftliche Automobilfertigung durch Gruppenarbeit, in Werkstatt und Betrieb, H. 3, 1994
- [33] Hanrath: Fähigkeitsuntersuchungen an spanenden Werkzeugmaschinen, Dissertation, TH Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Shaker Verlag, Aachen, 1997
- [34] Happacher, M.: Offene Steuerungen: Das Eis ist gebrochen, Elektronik, H. 14, 1998
- [35] Harder, L.: Cutting Force Control in Turning - Solutions and Possibilities, Dissertation, Royal Institute of Technology; Stockholm, Sweden, 1995
- [36] Hauptmann, P.: Sensoren, Hanser Verlag, München, 1990
- [37] Heesel, N.; Reichstein, W.: Mikrocontroller-Praxis, Ein praxisorientierter Leitfaden für Hardware und Software-Entwicklung auf der Basis der 80 (C)52-Familie; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1998
- [38] Heimann, B.; Gerth, W.; Popp, K.: Mechatronik, Hanser Verlag, Leipzig, 1998
- [39] Heisel, U.; Maier, V.; Ziegler, F.; Gringel, M.: Simulator, Werkzeugmaschine, Messzeug und Roboter - eine Bestandsaufnahme Hexapod, Werkstattstechnik wt 87(1997), Springer-VDI-Verlag 1997
- [40] Hoffmann, K.: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1987
- [41] Hohenadel, J.: PC-basierte, offene Steuerungssysteme, Werkstattstechnik, H. 1/2, 1998
- [42] Jemielniak, K.: Commercial Tool Monitoring Systems, Proceedings of the 5th International Conference on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing, Warsaw Univ. of Technology, Poland, 1998
- [43] Johannsen, P.: Technologische und andere Grenzen in der spanenden Großserienfertigung, Tagungsband, 3. Schmalkalder Werkzeugtagung 18./19.11.1998, Schmalkalden, 1998
- [44] Juckenack, D. (Hrsg.): Handbuch der Sensortechnik-Messen mechanischer Größen, Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1989
- [45] Junglas, W.: Der Durchbruch ist geschafft, Fertigung, Juni 1998
- [46] Kail, R.; Mahr, W.: Piezoelektrische Messgeräte und ihre Anwendung, Sonderdruck aus „Messen und Prüfen“, Bd. 20, Hans Holzmann Verlag, 1984

- [47] Kammermeier, D.: Charakterisierung von binären und ternären Hartstoffschichten anhand von Simulations- und Zerspanuntersuchungen, Dissertation, RWTH Aachen, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 271, Düsseldorf, 1992
- [48] Kief, H.B.: FFS-Handbuch. Einführung in Flexible Fertigungssysteme und deren Komponenten, 4. Auflage, München Wien, Hanser Verlag, 1998
- [49] Kluft, W.; Schneider, G.: Methoden zur Werkzeugbruchererkennung beim Fräsen sowie beim Drehen und Bohren in der Einzelteil- und Kleinserienfertigung, VDI Berichte, Nr. 1179, 1995
- [50] Koch, A.: Steigerung der Höchstdrehzahl von Schrägkugellagern bei Ölminimalmengenschmierung, Dissertation, TH Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Shaker Verlag, Aachen, 1996
- [51] Koch, K.-F.: Technologie des Hochpräzisions-Hartdrehens, Dissertation, TH Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Shaker Verlag, Aachen, 1996
- [52] Kolerus, J.: Zustandsüberwachung von Maschinen, Expert Verlag, Renningen-Malsheim, 1995
- [53] Kotterba, B.: Eine Methode zur Merkmalsfindung für die Klassifikation von Geräuschen, Dissertation, Fachbereich Umwelttechnik, TU Berlin, 1983
- [54] Kotterba, B.: Integration von Expertenwissen und Prozessmodellen in Maschinenüberwachung- und -diagnosesysteme, FH Heidelberg, Mikrosystemtechnik-Entwicklung und Optionen der Realisierung (MENTOR), VDI/VDE Technologiezentrum Informationstechnik GmbH, Teltow 1995
- [55] Krauthem T., u.a.: Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen und Materialkennwerte Räumlicher Elektronischer Baugruppen 3-D MID, Forschungsvereinigung Räumliche Elektronischer Baugruppen 3-D MID e.V., 2. erw. Auflage 11/1999, Erlangen 1999
- [56] Krüger, J.: Methoden zur Verbesserung der Fehlererkennung an Antriebsstrecken, Dissertation, TU Berlin, Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Berlin, 1999
- [57] Langguth, T; Weber, A.: Werkzeugverschleiß- und -Bruchüberwachung beim flexiblen Drehen, Bohren und Fräsen, Werkstatt und Betrieb 124, Nr. 1, S. 15 - 25, 1991
- [58] Lee, C. H.: Statische und dynamische Optimierung von Spindel-Lager-Systemen, München Wien, Hanser-Verlag, 1991
- [59] Lee, Y. H.: Anwendung der Fuzzy Control in der Umformtechnik, Dissertation, TH Aachen, Umformtechnische Schriften, Stahleisen, Düsseldorf, 1995
- [60] Luchs, R.: Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT, Dissertation, Fertigungstechnik - Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1998

-
- [61] Luderich, J.: Hochgenaue Spindelsysteme, Untersuchungen über die Laufgenauigkeit und deren Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen, Shakerverlag Aachen, 1994
- [62] Menz, W.; Mohr, J.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1997
- [63] Menz, W.; Müller, C.: Miniaturisierte Baugruppen und mikrostrukturierte Funktionselemente, Expertise im Rahmen von „Gulliver - Miniaturisierung von Baugruppen in Produktionsanlagen“, FAPS, Universität Erlangen, 2000
- [64] Milberg, J.: Werkzeugmaschinen-Grundlagen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1992
- [65] Mildenerger, O.: System- und Signaltheorie, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig Wiesbaden, 1995
- [66] Möller, B.: Unrundausdrehen mit aktiv magnetgelagerter Hauptspindel bei hohen Schnittgeschwindigkeiten, Dissertation, TH Darmstadt, Carl Hanser Verlag München Wien, 1994
- [67] Möller, B.: Unrundausdrehen mit aktiv magnetgelagerter Hauptspindel bei hohen Schnittgeschwindigkeiten, Dissertation, TH Darmstadt, Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung, Hanser Verlag, München Wien, 1994
- [68] Müller, M.: Prozeßidentifikation beim Drehen mit Hilfe Künstlicher Neuronaler Netze. (FBK Produktionstechnische Berichte, 22), Dissertation, Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, Univ. Kaiserslautern, 1995
- [69] N. N.: „Maschinenbau der Zukunft - Maschinenbau lebt zunehmend von Elektronik und IT“, Markt & Technik, H. 29, 17.7.98
- [70] N. N.: 4. Statuskolloquium des Programms Mikrosystemtechnik, 30./31.3.2000, Forschungszentrum Karlsruhe, 2000
- [71] N. N.: Bohren, Produktkatalog 201.00, Kennametal Hertel AG, Fürth, 1998
- [72] N. N.: Coromant Capto - Modulares Werkzeugsystem, Produktinformation, SANDVIK Coromant, Sandviken, Schweden, 1997
- [73] N. N.: Der intelligente Schwingungswächter der nächsten Generation für den umfassenden, wirtschaftlichen Maschinenschutz, DTECT Datenblatt, synOTECH Sensor und Messtechnik GmbH, 1999
- [74] N. N.: Die Deutsche Werkzeugmaschinenindustrie im Jahr 1999, Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. (VDW), Frankfurt, 1999
- [75] N. N.: Entwicklung schnelllaufender, wälzgelagerter Hauptspindeln, VDW Forschungsberichte, VDW 0147, Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken, Frankfurt/Main, 1998
- [76] N. N.: Hochfrequenzspindeln für automatischen Werkzeugwechsel: Katalog 2505, GMN (Paul Müller GmbH & Co. KG Unternehmensbeteiligungen), Nürnberg, 1998

- [77] N. N.: Hochfrequenzspindeln für Präzisionsbearbeitung: Katalog 2504, GMN (Paul Müller GmbH & Co. KG Unternehmensbeteiligungen), Nürnberg, 1997
- [78] N. N.: Hochpräzisions-Schleifspindeln: Katalog 2501, GMN (Paul Müller GmbH & Co. KG Unternehmensbeteiligungen), Nürnberg, 1995
- [79] N. N.: Hochpräzisions-Schnellfrequenzspindeln: Katalog 2503, GMN (Paul Müller GmbH & Co. KG Unternehmensbeteiligungen), Nürnberg, 1997
- [80] N. N.: Kegelrollenlager in Präzisionsausführung für Werkzeugmaschinen, Timken, Canton, Ohio, USA, 1996
- [81] N. N.: KM - modulares Schnellwechsel-Werkzeugsystem für Drehmaschinen und Bearbeitungszentren, Produktkatalog, Kennametal Hertel AG, Fürth, 1998
- [82] N. N.: Kompetenznetzwerk für Mechatronik, iw - newsletter, Jg. 8 Nr. 1, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU-München, 2000
- [83] N. N.: Produktinformation: Schnittkraftmessung – Innovative Präzision für mehr Wirtschaftlichkeit, KISTLER Instrumente AG, Winterthur, Schweiz, 1997
- [84] N. N.: Produktkatalog: Dehnungsmeßstreifen, HBM - Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1998
- [85] N. N.: Programm Mikrosystemtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, <http://www.fzk.de/pmt/>, Stand 8/2000
- [86] N. N.: SKF Wälzlager Katalog, SKF GmbH Schweinfurt, 1989
- [87] N. N.: Sonderforschungsbereich 356: Produktionssysteme in der Elektronik, Ergebnisbericht 1995 – 1998, Hrsg.: Feldmann, K., FAPS, Universität Erlangen, 1998
- [88] N. N.: Trends in der Mikroelektronik und ihrer Anwendung 1996-2001, GMM-Studie (Hrsg.), TZM-Report Mai/Juni 97, TZM e.V., Erfurt, 1997
- [89] N. N.: VDW Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (Hrsg.), Abdichtung kleiner Spindeln in Werkzeugmaschinen bei kleinem Dichtungsbauraum und extremen Betriebsbedingungen, VDW Forschungsberichte, VDW 2403, Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken, Frankfurt/Main, 1995
- [90] N. N.: Werkzeugmaschinen mit neuen Kinematiken, VDI-Z 140(1998), H. 6, 1998
- [91] N. N.: Wir gehören zur Werkstatt, Interaktive CD-ROM for SINUMERIK 09/98, SIEMENS AG, 1998
- [92] N. N.: Wirtschaftliche Potentiale der Miniaturisierung aus industrieller Sicht, Studie im Auftrag des Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Karlsruhe und Stuttgart, 1999
- [93] N.N.: Mobil mit Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik, Vorträge der GMM-Fachtagung anl. d. VDE-Kongresses '98, GMM-Fachbericht 23, Stuttgart, 1998

- [94] Neugebauer, R.; Wieland, F.; Schwaar, M.; Gohritz, A.: Hexapod-Werkzeugmaschine für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, ZWF, H. 9, Hanser Verlag, München, 1997
- [95] Ning, Y.; Loke, Y.; McKinnon, G.: Fabrication and characterization of high g-force, silicon piezoresistive accelerometers, Sensors & Actuators A, 48, 1995
- [96] Nitidem Ndengue, E.: Dezentrales Signalverarbeitungssystem für komplexe Überwachungs- und Regelungsaufgaben, Dissertation, Univ. Hannover, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Nr. 746, Düsseldorf, 1999
- [97] Patzelt, R.; Schweizer, H.: Elektrische Messtechnik, Springer-Verlag, Wien 1996
- [98] Petersen, K.: Silicon as a mechanical material, Proceedings IEEE 70, 1982
- [99] Pitter, F.; Fuchs, E.; Schlag, U.; Sick, B.; Thomas, J.; Lindmair, N.: Werkzeugzustandsüberwachung und Maschinenregelung, Forschungsverbund FORMIKROSYS, Abschlußbericht Teilprojekt 3, FAPS, Universität Erlangen, 1997
- [100] Pitter, F.; Thomas, J.; Feldmann, K.; Ryssel, H.: Mikrosystem zur automatisierten Werkzeugüberwachung in Drehmaschinen über die Erfassung von Vibration, Kraft und Temperatur, tm - Technisches Messen, Nr. 5, 1999
- [101] Pitter, F.; Feldmann, K.: Kleiner, besser, billiger - Erweiterte Anwendungsfelder aufgrund intelligenter Sensoren und Miniaturisierung, Konstruktion, Sonderteil, VDI-Z, H. 7/8, 1999
- [102] Pöhlau, F.: Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID), Dissertation, Fertigungstechnik - Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1999
- [103] Pritschow, G.; Sperling, W.; Bretschneider, J.: Tendenzen in der Steuerungs- und Antriebstechnik, Werkstattstechnik, H. 1/2, 1998
- [104] Rehse, M.: Flexible Prozeßüberwachung bei der Bohr- und Fräsbearbeitung in einer Autonomen Produktionszelle, Dissertation, RWTH Aachen, WZL Berichte aus der Produktionstechnik, Shaker Verlag, Aachen, 1999
- [105] Reichl, H.; Pelka, J.: Mikrosysteme für Produktion und Anlagenbau, wt Werkstattstechnik, 88 (1998) H. 11/12, 1998
- [106] Reißerweber, R.: Feldbussysteme, R. Oldenbourg Verlag, München, 1998
- [107] Roloff/ Matek: Maschinenelemente, Vieweg Verlag Braunschweig, 1995
- [108] Schäfer, W.: Trendwende in der Steuerungstechnik, Fertigung, September 1997
- [109] Schaudel, D.: Sensoren werden integraler Bestandteil der Prozessinformatik, atp Messkompass, Sonderheft zur INTERKAMA `99, 1999
- [110] Schaupp, J.: Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindelantriebsdynamik und dem Zerspanprozeß beim Fräsen, Dissertation, Univ. Karlsruhe, wbk Forschungsberichte 73, Karlsruhe, 1997

- [111] Schehl, D. U.: Werkzeugüberwachung mit Acoustic-Emission beim Drehen, Fräsen, Bohren, Dissertation, RWTH Aachen, Fak. F. Maschinenwesen, Aachen, 1991
- [112] Scheider, H.-P.: Werkzeugüberwachung - Ein Baustein der Prozeßsicherung, Tagungsband: Prozessoptimierung in der spanenden Fertigung, FAPS, Universität Erlangen, 16.01.1997
- [113] Scheifele, D.: Offene Steuerungen in der Maschinenbau, Automatisierungstechnik WB, H. 3, 2000
- [114] Schmitt, T.: Modell der Wärmeübertragungsvorgänge in der mechanischen Struktur von CNC-gesteuerten Vorschubsystemen, Dissertation, TH Darmstadt, Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung, Shaker Verlag, Aachen, 1996
- [115] Schneider, T.: Aufwand, Nutzen und Grenzen des Hochgeschwindigkeitsdrehens Dissertation, TH Darmstadt, Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung, Shaker Verlag, Aachen, 1996
- [116] Schnell, G.: Sensoren in der Automatisierungstechnik, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1993
- [117] Schönherr, H.: Modellgestützte Verschleißdiagnose des Zerspanprozesses Drehen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1992
- [118] Schubert, D.: Beschleunigungssensoren in Silizium-Techniken, Technisches Messen 62, H. 11, 1995
- [119] Schulz, D.: Lineare und nichtlineare Verarbeitung von amplitudenmodulierten stochastischen Prozessen zur akustischen Qualitätskontrolle und Schadensfrüherkennung, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe, 1976
- [120] Schulz, D.: Praktische Regelungstechnik - Ein Leitfaden für Einsteiger, Hüthig Verlag, Heidelberg, 1994
- [121] Shiraishi, M.; Yamanaka, K.; Fujita, H.: Optimal Control of Chatter in Turning, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 31, No. 1, Pergamon Press, Great Britain, 1991
- [122] Sick, B.: Signalinterpretation mit Neuronalen Netzen unter Nutzung von modellbasiertem Nebenwissen am Beispiel der Verschleißüberwachung von Werkzeugen in CNC-Drehmaschinen, Dissertation, Universität Passau, Fakultät für Mathematik und Informatik, Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 10, Nr. 629, 1999
- [123] Stelzer, C.: Überwachung und Regelung der Spannkraft in kraftbetätigten Dreibackenfuttern, Dissertation, TU Berlin, Produktionstechnik - Berlin, Hanser Verlag, München Wien, 1994
- [124] Suminto, J.; Simple, A.: High performance piezoresistive accelerometer, Transducers 1991, S. 104-107

-
- [125] Suwalski, I.: Steuerungsintegriertes Prozeßüberwachungssystem für Drehmaschinen, Dissertation, TU Berlin, Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Berlin, 1999
- [126] Thiel, R.: Analyse der Werkstückhaltekräfte am Dreibackenfutter im Rahmen einer Maschinen- und Prozeßüberwachung, Dissertation, TU Berlin, Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Berlin, 1996
- [127] Thomas, J.: Mikrosystemtechnische Vibrationssensoren zur automatisierten Zustandsüberwachung von Drehwerkzeugen, Dissertation, Shaker Verlag, Erlangen, 1999
- [128] Tönshoff, H. K.: Spanen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1995
- [129] Tönshoff, H. K.: Werkzeugmaschinen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995
- [130] Tönshoff, H. K.; Karpuschewski, B.; Urban, B.: Die Schnellste im Norden, wt Werkstattstechnik, H. 9/10, 1998
- [131] Tönshoff, H. K.; Karpuschewski, B.; Blawit C.: Hochgeschwindigkeitszerspanung, VDI-Z, H. 9, 1997
- [132] Tüllmann, U.: Das Verhalten axial verspannter, schnelldrehender Schrägkugellager, Dissertation, RWTH Aachen, WZL Berichte aus der Produktionstechnik, Shaker Verlag, Aachen, 1999
- [133] Überhuber, C.: Numerische Mathematik - interaktiv, <http://titania.tuwien.ac.at/numerics>, 8/2000
- [134] Ulbrich, H.: Maschinendynamik, B. G. Teubner, Stuttgart 1996
- [135] Vopel, R.: Anmerkungen zu Fragen der Überwachung und Diagnose von Werkzeugmaschinen, Mikrosystemtechnik-Entwicklung und Optionen der Realisierung (MENTOR), VDI/VDE Technologiezentrum Informationstechnik GmbH, Teltow, 1995
- [136] Vos, M.: Laufgenauigkeit von Hauptspindeln für die Hochpräzisionsbearbeitung, Dissertation, RWTH Aachen, WZL Berichte aus der Produktionstechnik, Shaker Verlag, Aachen, 1999
- [137] Weck, M.; Brühl, J.: OSACA produktreif - Einheitliche Schnittstelle zu allen Steuerungen, Werkstattstechnik, H. 5, 1999
- [138] Weck, M.; Schumacher, A.: Derzeitiger Stand der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung – ein Überblick, Werkstattstechnik wt 87(1997); S. 409-414, Springer-VDI-Verlag 1997
- [139] Weis, W.: Optical Tool Wear Measurement and Estimation of Tool Life Travel for Milling, Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Universität Karlsruhe, 1995
- [140] Westkämper, E.: „Intelligente“ Werkzeugmaschinen für die Produktion 2000, VDI-Z, H. 9, 1993

- [141] Wiedermann, M.: Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1993
- [142] Wilfried, J.; Bartz; u.a: Wälzlagertechnik Teil 1, Expert Verlag Sindelfingen, 1985
- [143] Wolf, A.; Schillo, E.; Kaufeld, M.; Golz, H.-U.; Johannsen, P.; Sprengel, P.; Heinek, A.: Praxiserfahrungen beim Einsatz von Werkzeugüberwachungssystemen in der zerspanenden Fertigung, VDI Berichte 1179, Konferenz Düsseldorf 30./31.03.1995, VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, VDI-Verlag, 1995
- [144] Yuan, H.: Optimierung des dynamischen Verhaltens von Spindeleinheiten, Dissertation, Univ. Stuttgart, IfW Konstruktion und Fertigung, Stuttgart, 1997
- [145] Zeppelin, W. v.: Fortschritt in der Werkzeugüberwachung, Werkstatt und Betrieb 125 (1992) Nr. 5, S. 359-362.
- [146] Ziebell, F.: Mechanische und thermische Belastung von Zerspanwerkzeugen, Dissertation, Univ. Hannover, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 18 Nr. 193, Düsseldorf, 1996
- [147] Zizka, J.; Shiraishi M.: Acoustic and Force Signal Integration for Cutting Tool Wear Sensing and/or Monitoring, Proceedings of the 12th International Acoustic Emission Symposium, Japanese Society for NDI, Sapporo, Japan, 1994

Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen

a	Beschleunigung, Kantenlänge
A	Fläche
A/D	Analog/Digital
ADU	Analog/Digital Umsetzer
AE	Acoustic Emission
c	Dämpfungskonstante
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CNC	Computerized Numerical Control
CPU	Central Processing Unit
c_v	Fourier-Koeffizienten
$C_{xx}(t)$	Leistungscepstrum
d	Membrandicke, Innendurchmesser
D	Aussendurchmesser
DFT	Diskrete-Fourier-Transformation
DMS	Dehnungsmessstreifen
DSP	Digitaler Signal Prozessor
E	Elastizitätsmodul
EEPROM	Electrical Erasable Programmable Read Only Memory
F	Kraft
\vec{f}_F	Kraft-Fehler-Vektor
f_0	1. Eigenfrequenz
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FSK	Frequency Shift Keying
G	Reibmoment/Wärmeentwicklung
HF	Hochfrequenz
HSC	High Speed Cutting
I/O	Input/Output
IC	Integrated Circuit
ISM	Industrial, Scientific, Medical
k	Federkonstante, Dehnungsempfindlichkeitsfaktor
K	Piezokoeffizient
k_0	Konditionszahl
L	Länge
LWL	Lichtwellenleiter
m	Masse

\overline{M}	Systemmatrix
MC	Mikrocontroller
MID	Molded Interconnect Devices
MMC	Man Machine Communication
MPI	Multi Port Interface
NC	Numerical Control
NF	Niederfrequenz
OSACA	Open System Architecture for Controls within Automation System
P	Lagerdruck
PC	Personal Computer
PLC	Programmable Logical Control
$P_{xx}(t)$	Autokorrelationsfunktion
R	elektrischer Widerstand
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
s	Drehzahl
S	Sensorempfindlichkeit
SAW	Surface Acoustic Wave
SMM	Strukturmodifikationsmethode
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STFT	Kurzzeit Fourier-Transformation
T	Periode, Temperatur
TDNN	Time-Delay Neural Networks
U	elektrische Spannung
\overline{f}_u	Spannungs-Fehler-Vektor
u_i	Teilspannung in Messbrücke
V	Verstärkungsfaktor
VB	Verschleißmarkenbreite
VDI	Verein deutscher Ingenieure
X_i	Singulärwert
v	Poissonzahl
β	Effizienzparameter
ω	Kreisfrequenz
ε	Dehnung
ρ	spezifischer Widerstand
λ_i	Eigenwerte

Lebenslauf

Frank Pitter
geb. am 23. November 1967, Hirschau/Opf.

09/1974 – 08/1978	Grundschule, Kipfenberg
09/1978 – 06/1987	Willibald-Gymnasium, Eichstätt, Abschluss: Abitur
09/1987 – 10/1988	Grundwehrdienst bei der Bundeswehr
11/1988 – 06/1995	Studium der Fertigungstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Abschluss: Dipl.-Ing. (Univ.)
08/1995 – 10/2000	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (Prof. Dr.-Ing K. Feldmann) der Universität Erlangen-Nürnberg
01/1996 – 10/2000	Fachliche Leitung des Teilprojektes „Mikrosystembasierte In-Prozeß-Messung zur Qualitätssicherung in der spanenden Fertigung“ im bayerischen Forschungsverbund Mikrosystemtechnik FORMIKROSYS II
03/1999 – 10/2000	Oberingenieur des Lehrstuhlbereiches Handhabungs- und Montagetechnik