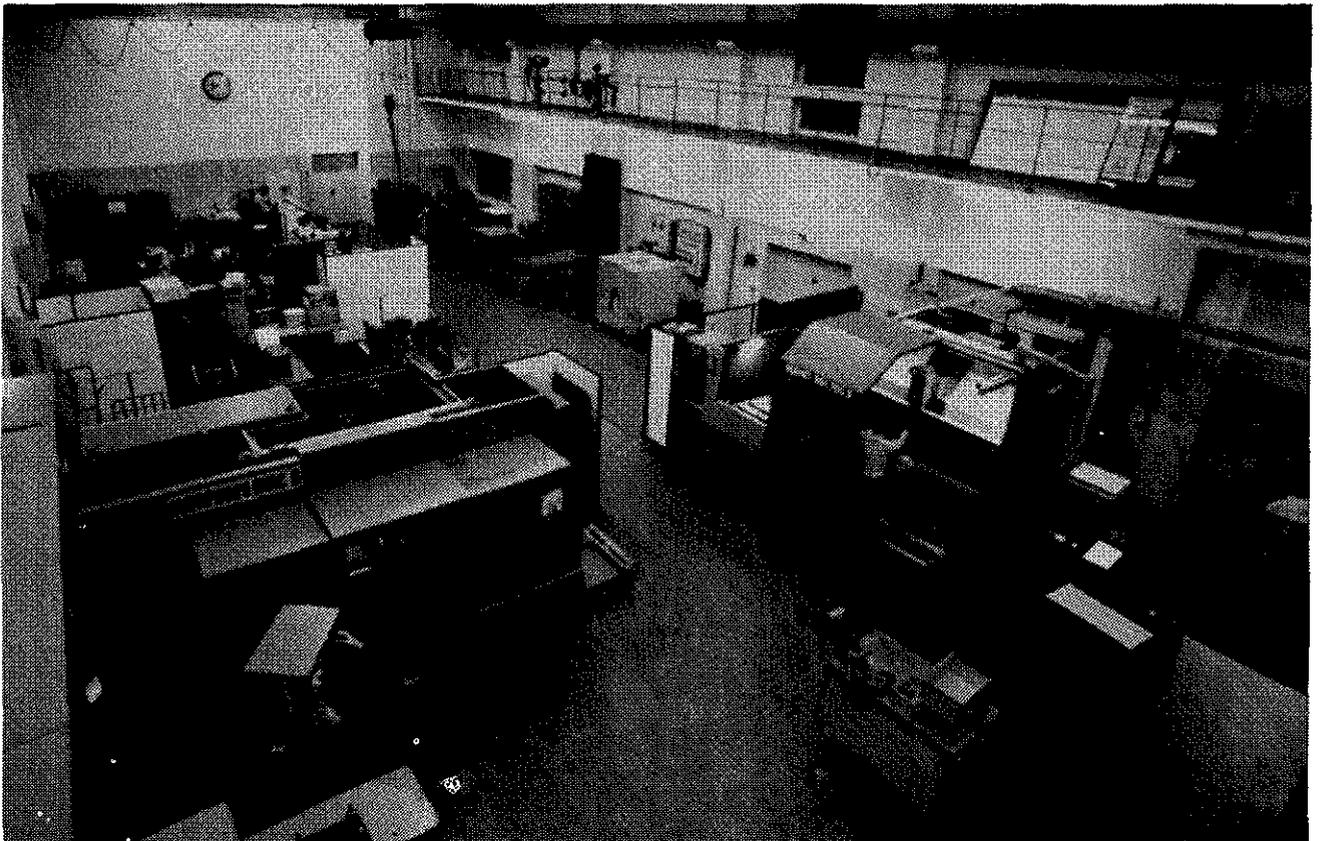




**Institut für Maschinenwesen**

Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz

Mitteilung Nr. 15 (1990)



**IMW**  
*TU Clausthal*

**Mitteilungen aus dem  
Institut für Maschinenwesen  
der  
Technischen Universität Clausthal  
Nr. 15  
(November 1990)**

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz

Redaktion und Layout: Klemens Wesolowski & Uwe Bock

Anschrift: Institut für Maschinenwesen  
Technische Universität Clausthal  
Robert-Koch-Str. 32  
D-3392 Clausthal-Zellerfeld  
Tel: (05323) 72 2270  
Fax: (05323) 72 3501  
Telex: tuclz d 953828

Titelbild: Blick in die Maschinenhalle des Instituts für Maschinenwesen. Im Vordergrund sind die beiden neuen CNC-Maschinen sichtbar, an denen unter anderem Studenten im Rahmen eines CIM-Praktikums ausgebildet werden.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
	3
P. Dietz	5
P. Dietz	14
U. Bock	23
F. Rothe	27
G. Deppermann	31
M. Wächter	37
W. Kalliwoda	41
U. Neumann	45
P. J. Kruse	50
G. Schäfer	55
G. Wan/J. Albers	61
Z. Tan	65
U. Prengeman	71
R. Jakel	75
M. Holland	81
	87
	88
	89
	90
	91
	92
	93
	94

## Vorwort

Fast haben wir es geschafft! Mit der Bauaktion in den Jahren 1988 bis 1990 und dem damit verbundenen jahrelangen Image des Institutes für Maschinenwesen als Dauerbaustelle und Provisorium konnten wir zum Wintersemester wieder in frisch gestrichene Räume ziehen, auf frisch gefliesten Institutsfluren laufen und unsere Prüfstände in der nun übersichtlich und flexibel gestalteten Maschinenhalle aufbauen. Als "Kontrastbild" zur letzten Ausgabe haben wir deshalb die "neue" Maschinenhalle zum Titelbild gewählt. Leider wurde aus Finanzgründen der Hörsaalbereich noch aus der Umbaumaßnahme ausgespart - dies ist aber auch dadurch bedingt, daß infolge der rasanten Weiterentwicklung der Informationstechniken wir unseren Studenten Präsentationen innerhalb der Lehre bieten möchten, von denen bei Antragstellung zum Umbau ca. 1976 noch keine Rede war.

Unser Unterrichtsprojekt der Einführung des rechnergestützten Konstruierens bereits im ersten Semester mit voll ausgerüsteten Konstruktions-Arbeitsplätzen wurde von unseren Studenten mit Begeisterung aufgenommen und hat Erhebliches zur Attraktivität des Maschinenbaustudiums in Clausthal beigetragen. Die Folge davon ist, daß wir dieses Angebot aufrechterhalten müssen und ca. 150 Studierende im ersten Semester mehr zu betreuen haben, von der Geräteausstattung wie im Personal aber einen unveränderten Stand haben. Dies besichert uns zur Zeit reguläre Übungszeiten bis 22 Uhr und die "durchgehende" Besetzung unserer Arbeitsplätze, die in Clausthal besondere Umgangsart zwischen Lehrenden und Lernenden und das dadurch mögliche Arbeitsklima ermöglichen uns in dieser Lehrveranstaltung einen Erfolg, der mit ähnlichen Bedingungen an größeren Hochschulen nicht denkbar ist.

Mit ebenfalls ausgezeichnetem Erfolg ist das Projekt "CIM-Labor" angelaufen, in dem sich die Studierenden hautnah - d.h. durch eigene Programmierung und Erfahrung an der Maschine - mit der Umsetzung ihrer Konstruktion in Fertigteile befassen und den Informationsfluß industrieller Betriebe an

einem Modell kennenlernen. Daß die im CIM-Labor beschafften Maschinen auch ihren Platz im Forschungsbetrieb des Institut finden, zeigen zwei Beiträge dieser Ausgabe.

Die wichtigsten Neuigkeiten auf dem Forschungsbereich bestehen wohl in der Fortsetzung unseres Sonderforschungsbereiches 180 "Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen" für die nächsten drei Jahre und dem Forschungsauftrag im Bereich der Schnittstellennormung für die rechnergestützte Fertigung (KCIM) für ein weiteres Jahr. Im Bereich des SFB werden wir zusammen mit anderen Instituten der TU Clausthal auf der ACHEMA '91 einen Stand und einen ganzen Tag im Vortragsprogramm bestreiten und dabei zeigen können, daß die Entwicklungen zu industriell erfolgreichen Lösungen geführt haben.

Im Bereich der Maschinenelementeforschung haben wir auf dem letzten Informationstag der Forschungsvereinigung Antriebstechnik ein geschlossenes Konzept zur Beurteilung des Verschleißes an Zahn- und Keilwellenverbindungen vorgelegt, das nach Abschluß der noch anstehenden Arbeiten in einer Norm verankert werden wird. Zur Behandlung der nichtlinearen Probleme bei der elasto-plastischen Beanspruchung von symmetrischen Zuggliedern (Bolzen-Laschen-Verbindungen, Ketten, Schäkel) haben wir unsere FE-Bibliothek um das Programmsystem MARC erweitert, das uns auch neue Möglichkeiten bei der Behandlung elasto-plastischer Kontaktprobleme eröffnet.

Aus dem an diesem Institut traditionsreichen Forschungsbereich der Spannungsoptik wurden in diesem Jahre in internationalen Symposien in Toronto und Nottingham Ergebnisse zu einer hybriden Meßmethode dynamischer Beanspruchungsverläufe vorgestellt, die großes Interesse erregten und uns zu weiteren Arbeiten in der Simulation von Körperschallvorgängen durch dynamische Spannungsoptik anregen. Auch die Technik spannungsoptischer Untersuchungen mittels Silberchlorid findet eine

Weiterführung in einem Forschungsvorhaben, das sich mit dem Wesen der Textur in metallischen Baukörpern befaßt.

Die neue deutsche Situation führte bei uns zu einer Vertiefung der Kontakte zu Freiberg, den Kollegen konnten wir mit der Vermittlung eines leistungsfähigen Rechners erhebliche Hilfe leisten. Mit Dresden verbindet uns ein gemeinschaftliches Vorhaben auf dem Gebiet der Zahnwellen. Neben den schon Tradition gewordenen Kontakten zu Krakau und Zaragoza werden wir im nächsten Jahr im Rahmen gemeinsamer Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Seiltrommelforschung mit Shen-Yang und der Spannungsoptik mit Schanghai zusammenarbeiten.

Wie immer wollen wir mit diesen Institutsmitteilungen Ihnen einen kleinen Einblick in unsere Interessensgebiete geben, zum Teil entstammen die hier veröffentlichten Aktivitäten auch der Zusammenarbeit mit Industriefirmen im Rahmen von kleinen Projekten "nebenher". Ich würde mich freuen, wenn der eine oder andere Artikel Ihr Interesse fände und zu einem technisch-wissenschaftlichen Erfahrungsaustausch führen würde.

Clausthal, im November 1990



# Rechnergestützte Ingenieurtechniken und Folgerungen für die Ausbildung an der TU Clausthal

Prof. P. Dietz

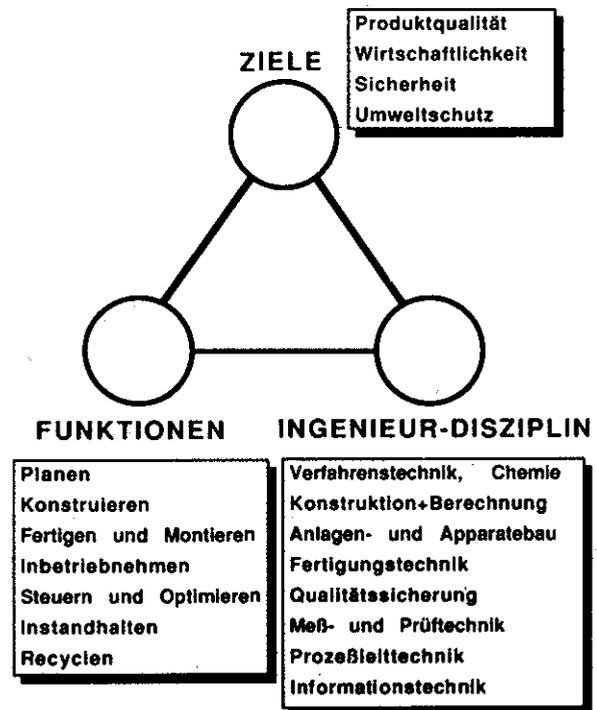
*Festvortrag zur Immatrikulationsfeier der Technischen Universität Clausthal am Freitag, 2. November 1990, die im Vortrag gezeigten Bilder werden nur zu einem kleinen Teil übernommen*

Meine Damen und Herren Neuimmatrikulierten,

zunächst möchte ich Sie alle recht herzlich an unserer Universität willkommen heißen, die ja unter den technischen akademischen Ausbildungsstätten schon wegen ihrer vergleichsweise bescheidenen Größe den Ruf besonderer Zusammenarbeit zwischen Lehrenden und Lernenden besitzt. Als Vertreter eines sogenannten Massenfaches kann ich Sie nur dazu auffordern, die Kontaktmöglichkeiten zu nutzen, zu Ihren Professoren hinzugehen und sich in Studienfragen beraten zu lassen. Aus der Erfahrung heraus - und als jemand, der auch einmal studiert hat - weiß ich, daß man im zweiten oder dritten Semester mal so einen "Durchhänger" hat, der einen an seinen Fähigkeiten und der richtigen Berufswahl zweifeln läßt - und daß man in solchen Fällen ganz froh für ein Gespräch ist, das einem da weiterhelfen kann.

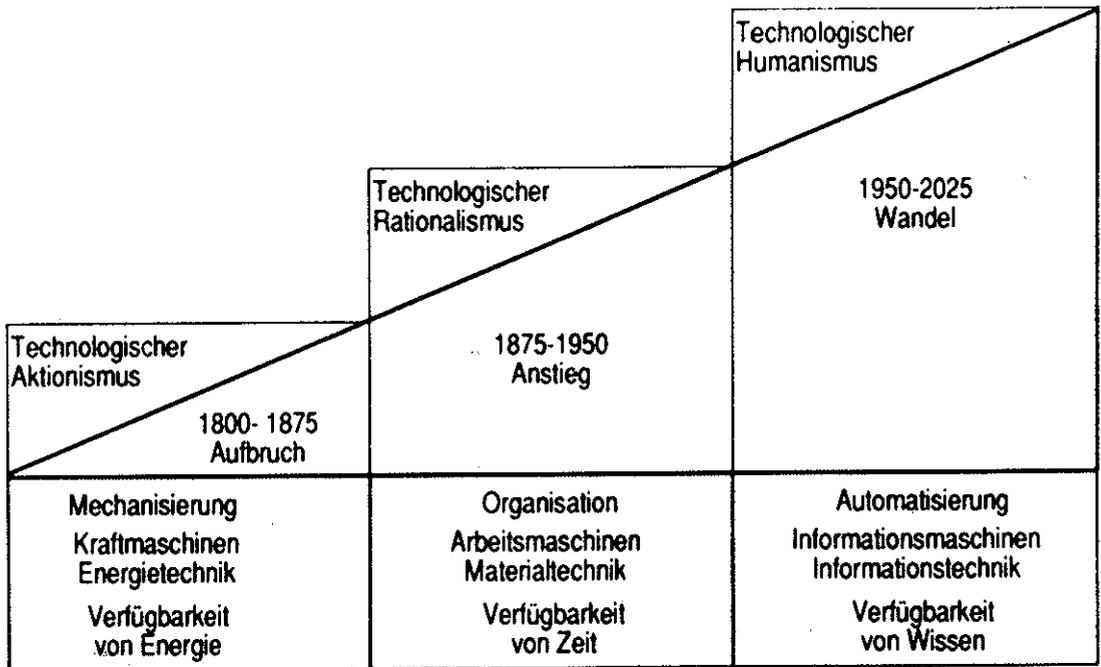
Der überwiegende Teil von Ihnen hat sich mit der Wahl seines Studiums für die Technik entschieden, der andere Teil wird im Bereich der Naturwissenschaften der technischen Anwendung zuarbeiten. Sie müssen sich dabei im klaren darüber sein, daß sie sich damit auf ein Wissensgebiet begeben, das in einem atemberaubenden Wandel sich ständig erneuert und uns ständig komplexere technische Systeme beschert. Das hört sich ungeheuerlich interessant an. Für uns als Ingenieure bedeutet das aber, daß wir bereit sein müssen unser Leben lang immer neues Wissen hinzuzugewinnen und trotzdem die Grundlagen unseres bisherigen Wissens beizubehalten. Es bedeutet aber auch, daß wir bei der zunehmenden Verknüpfung von Fachgebieten zur Lösung einer Fachaufgabe ein integriertes Wissen haben müssen und ganzheitlich arbeiten müs-

sen. Bei Planung, Bau und Betrieb einer chemischen Anlage z.B. müssen Fachleute unterschiedlicher Ingenieurdisziplinen so miteinander arbeiten können, daß alle Funktionen zur Erreichung des Zieles erkannt werden, die sich daraus ergebenden Teilprobleme gelöst werden und das Ganze schließlich zu einer funktionierenden Anlage vernetzt wird (**Bild 1**).



**Bild 1:** Elemente der ganzheitlichen Ingenieurarbeit bei der Errichtung einer verfahrenstechnischen Anlage

Die Bewältigung des ständig zunehmenden Wissens sowohl in der Breite wie in der Tiefe erfordert neue Hilfsmittel und Methoden. Die wichtigste neue Disziplin des Ingenieurwissens stellt dabei die Informationstechnik dar, das ständige Bereithalten der Daten in allen Bereichen des Ingenieurwesens. Eine eindrucksvolle Darstellung zur Entwicklung der Technik gibt Prof. Spur aus Berlin (**Bild 2**):



**Bild 2:** Entwicklungsphasen der Technik nach Spur

Die Anfänge der technischen Entwicklung waren von der Nutzung der Energie geprägt. Man baute Kraftwerke, betrieb Dampfmaschinen oder Dieselmotoren und trieb dabei Arbeitsmaschinen wie z.B. Drehmaschinen oder Mühlen an. In der zweiten Phase wurden die Arbeitsprozesse weiterentwickelt, es wurden die Bandarbeit und die Großserien erfunden, damit auch jeder sein Auto oder seine Waschmaschine bekam.

Der jetzige Phasenschritt der Technik ist durch eine Harmonisierung von Mensch, Technik und Umwelt gekennzeichnet, es fallen integrierte Aufgaben an, die Entwicklung von Informationsmaschinen erlaubt den Austausch von Daten zur Optimierung technischer Prozesse in einer Weise, wie dies früher nicht vorstellbar war. Der Austausch von Daten erlaubt auch den Ersatz von Menschen in Systemen, wenn es sich um einfache Beobachtungen und Entscheidungen handelt wie z.B. das Legen von Punktschweißnähten durch Roboter, das Optimieren von Blende, Belichtungszeit und Fokuseinstellung in einem modernen Fotoapparat und anderes mehr. Der Computer ist zwar nach wie vor ein Idiot, der eingegebenes Wissen nur repetieren kann, aber das kann er schnell und er kann es 24 Stunden am Tag.

Dabei wird allerdings der Faktor Zeit immer wichtiger, denn die Innovationszyklen werden ständig kürzer. Für den Markterfolg eines Unternehmens kann es entscheidend sein, dem Kunden die passende Problemlösung früher anzubieten und zu liefern als der Konkurrent. Informationstechnische Systeme bieten die Chance, die Entwicklungszeiten für neue Produkte und Durchlaufzeiten der Produkte in der Herstellung ganz wesentlich zu reduzieren.

Das Stichwort Computer ist damit gefallen, das Zauberwort "rechnergestützt" oder "Computer Aided" geistert durch die gesamte Technik und hat zu einer Reihe von sprachlichen Purzelbäumen bei mehr oder weniger sinnvollen Abkürzungen geführt. Ich möchte dies am Beispiel einer Produktentwicklung darstellen, die heute immer mehr vom Rechner durchdrungen wird und für die in **Bild 3** von meinen Kollegen der Konstruktionstechnik eine ganzheitliche Darstellung unter dem Begriff "Computer Integrated Development" (CID) geschaffen wurde. Wir haben hier die Begriffe CAD, Computer Aided Design, das ist das rechnergestützte Konstruieren, daneben steht CAM, rechnergestütztes Fertigen. Andere Bereiche wie die Planung (CAP) oder das Qualitätswesen (CAQ) wer-

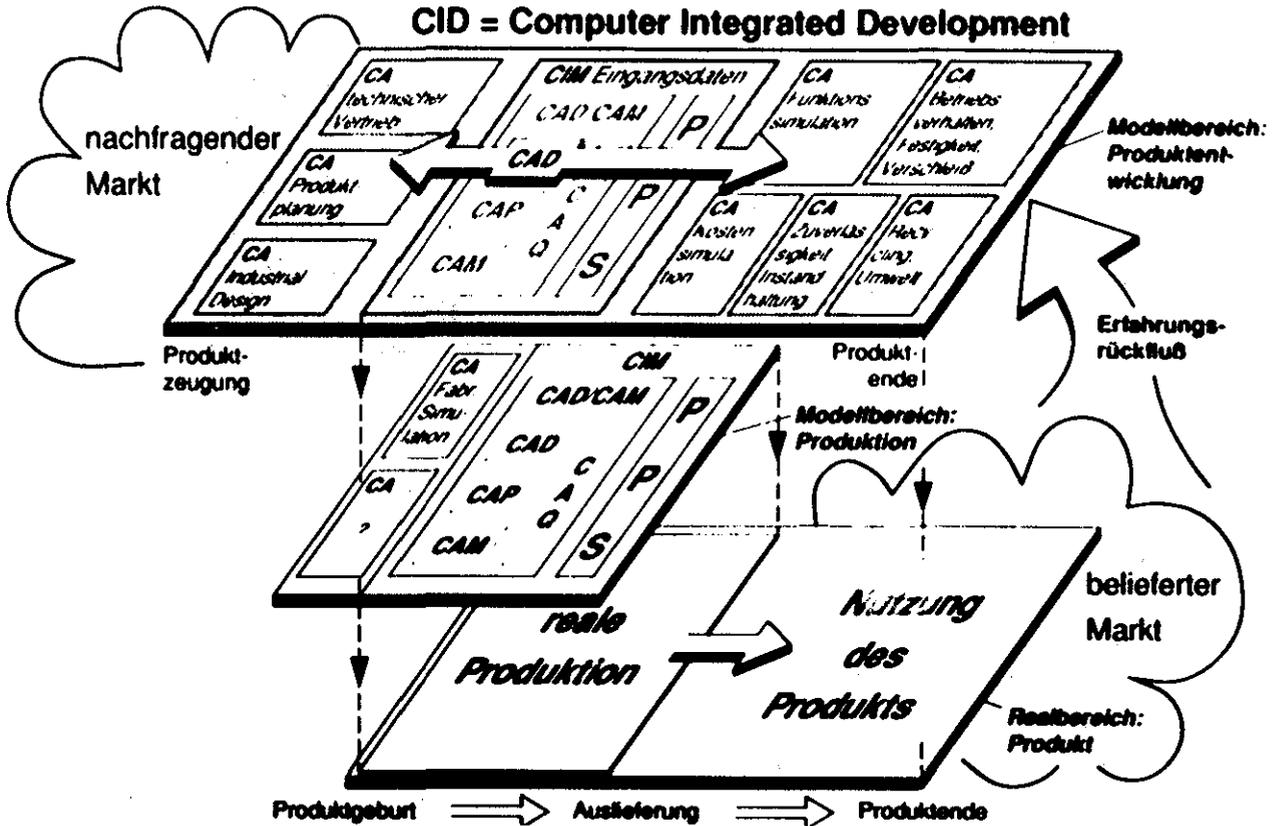


Bild 3: Rechnergestützte Produktentwicklung als Simulationsprozeß am Produkt- und Produktionsmodell

den vom Rechner gestützt, rechnergesteuerte Produktplanungssysteme (PPS) sorgen für eine zeitgerechte Bereitstellung von Materialien entsprechend den Kundenaufträgen. Das Ganze läßt sich unter dem Stichwort CIM, Computer Integrated Manufacturing, zusammenfassen zu einer Fabrik, in der die einzelnen Abteilungen wie Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Materialbereitstellung, Einkauf, Fertigung, Montage usw. in einem vernetzten Datenverbund stehen und jeder den Datenspeicher um das Wissen anzapfen kann, das er gerade braucht.

Das Bild zeigt, daß wir eigentlich erst am Anfang dieser Entwicklung stehen, bis jetzt ist nur der hier angedeutete mittlere Bereich der fertigungsnahen Arbeit damit erfaßt. Für die marktnahen Bereiche, die sich mit dem Vertrieb und der Planung befassen, gibt es relativ wenig rechnergestützte Methoden, das gleiche gilt für den Bereich des Betriebes, der Optimierung, der Überwachung und schließlich des Recyclings bei Produktende.

Das Bild macht aber auch noch etwas anderes

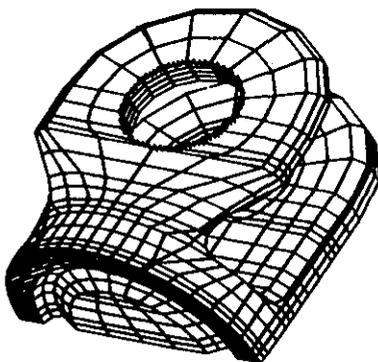
deutlich. Die Ebene, auf der ein Produkt erzeugt wird, wird hier als unterste Ebene dargestellt, die beiden oberen Ebenen betreffen die Modellierung, sei es im Bereich der Produktion oder im Bereich der Produktentwicklung. Was wir also in diesen Bereichen machen, ist nichts weiter als eine Simulation der Produkteigenschaften in der oberen Ebene oder eine Simulation des Fertigungsprozesses in der mittleren Ebene. Und dies ist ganz entscheidend für die modernen rechnergestützten Arbeitstechniken, die uns durch eine rasche Bereitstellung von Informationen eine solche Simulationstechnik erlauben.

Lassen Sie mich dies an einigen Beispielen aus unserem eigenen Bereich der Entwicklung und Fertigung im Maschinenbau beschreiben.

Die Entwicklung von Produkten des Maschinen- und Anlagenbaus setzt bei zunehmender Komplexität der Baueile eine sichere Voraussage der Tragfähigkeitseigenschaften mit modernen Berechnungsverfahren voraus. Vor der Erstellung eines Bauteiles oder einer Maschine muß also soweit wie

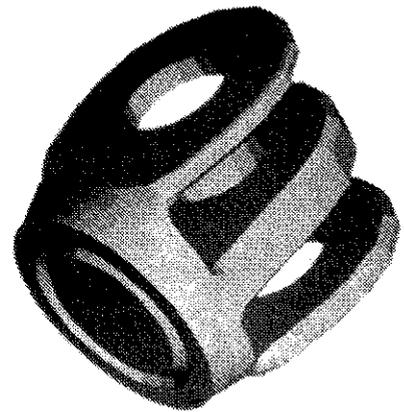
möglich bekannt sein, ob die Teilestruktur den zu erwartenden Belastungen standhält. Moderne Rechentechniken haben für dieses Problem die sogenannte Methode der Finiten Elemente ermöglicht. Man simuliert das zu schaffende Bauteil durch sehr viele kleine Einzelteilchen und kann dann das Verhalten dieser Struktur mit einem erheblichen Aufwand an Rechentechnik beobachten. Als einfaches Beispiel seien hier die Entwicklung der Verbindungstechnik an einem Riesenkran aufgeführt, bei dem wir in der TU Clausthal beteiligt waren.

Sehr große Krane werden meist als Gitterkonstruktion ausgeführt, wobei etwa 12 m lange Segmente mit Hilfe von Bolzen aneinander befestigt werden. Die Auslegung dieser Verbindungen muß mit absoluter Sicherheit geschehen. Alle Bauteile müssen natürlich so leicht wie möglich sein. Dies ergibt eine Optimierungsaufgabe, die wir mit Hilfe der Simulation der entsprechenden Knotenelemente durch Finite Elemente vornahmen. Diese sogenannte Ersatzstruktur sehen Sie in **Bild 4**, danach erfolgt in **Bild 5** eine Darstellung, die durch unterschiedliche Farben die Höhen der Beanspruchungen kennzeichnet.



**Bild 4:** Generierung eines Finite-Elemente-Netzes an der Gittermastverbindung eines Krans

Wir können nun an diesem simulierten Bauteil die Geometrie solange verändern, bis alle Beanspruchungen innerhalb gewisser Grenzen liegen, so daß keine Gefahr mehr besteht, daß der Kran infolge Versagens seiner Verbindungselemente nicht mehr umfällt.



**Bild 5:** Vom Rechner generiertes Modell der optimalen Verbindungsstruktur

Im anderen Beispiel handelt es sich um die Auslegung einer Radarantenne. Eine solche Radarantenne besitzt einen Parabolspiegel und die Genauigkeit der Informationsübertragung hängt in starkem Maße von der Genauigkeit dieses Paraboloides ab. Nun verformt sich eine solche gewaltige Struktur natürlich unter Eigengewicht und unter Windkräften. Die Kunst des Konstrukteurs besteht nun darin, diese gesamte Struktur unter verschiedenen Lastannahmen, d.h. Winkelstellungen und Windrichtungen so auszulegen, daß immer wieder ein Paraboloid herauskommt, wenn auch der Brennpunkt selbst sich etwas verschiebt und elektronisch nachgeregelt werden muß. Und da das Gebilde auch schwingen kann, müssen ständig die Eigenschwingungsformen der Struktur mit überprüft werden. Das Bauteil wird also während seiner Konstruktionsphase ständig verändert und in einer solchen Simulationsrechnung über Finite Elemente als Modell den unterschiedlichen Belastungen solange unterworfen, bis die optimale Konstruktion erreicht wird.

Ein Bereich, mit dem Sie in Ihrem Studium sehr bald zu tun bekommen, ist die rechnergestützte Konstruktion, das Entwickeln von Teilen, Baugruppen und Maschinen mit Hilfe des Computers. Der Gedanke zielte zunächst darauf ab, die bisherige Arbeitsweise des Konstrukteurs mit Zeichenbrett und Tusche abzulösen durch ein System, das eine größere Flexibilität besitzt z.B. im Hinblick auf Änderungen oder im Hinblick auf die Verwendung von

Normteilen, gleichzeitig soll eine rechnergestützte Bearbeitung der Maschinenteile auf sogenannten numerisch gesteuerten Maschinen vorbereitet werden. Das Ziel der rechnergestützten Arbeit ist dabei, das gesamte Wissen, das der Konstrukteur für seine Arbeit braucht, ihm in Datenbanken zur Verfügung zu stellen und ihn bei der Auswahl der Lösungen zu beraten (Bild 6) - man spricht dabei von sog. "Expertensystemen".



Bild 6: Bereithalten technischen Wissens am Konstruktionsarbeitsplatz nach Neipp

Dem Stand der Anwendung entsprechend erhält man Konstruktionen wie die in Bild 7 gezeigte Darstellung eines chemischen Reaktors, die alle für die Werkstatt notwendigen Unterlagen zur Fertigung und Montage der Teile in sich birgt.

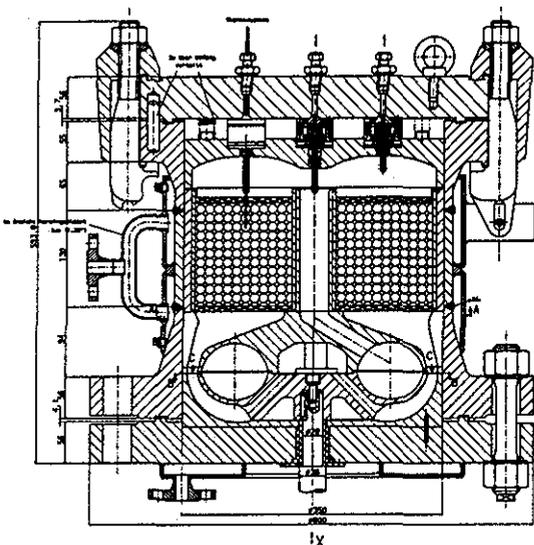


Bild 7: 2-D-Darstellung eines katalytischen Reaktors

Auch dies ist eine Simulation des herzustellenden Teiles, was dann besonders deutlich wird, wenn wir

uns diese Darstellung des Versuchsreaktors vom Rechner einmal in einer ganz anderen Weise ausgeben lassen - nämlich der sogenannten dreidimensionalen Darstellung (Bild 8).

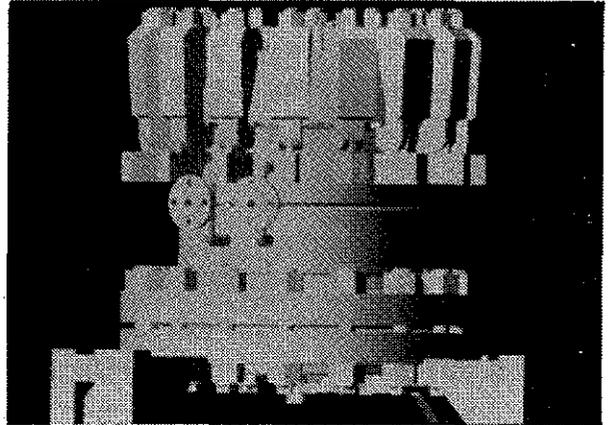


Bild 8: 3-D-Darstellung eines katalytischen Reaktors

Wir können mit solchen Darstellungen Untersuchungen zur räumlichen Anordnung von Teilen machen und können auf diese Weise ganze chemische Anlagen am Bildschirm aufbauen. Anhand solcher Modelle am Bildschirm können wir mit Monteuren und Anwendern über die Funktionsweise von Maschinenteilen und Baugruppen diskutieren.

Diese Möglichkeiten der 3D-Konstruktion erlauben es auch Bewegungssimulationen zu fahren und so z. B. die Bewegungen eines Roboters beim Schweißen einer Automobilkarosserie simulieren und so lange zu verändern, bis die beste Verbindung bei geringster Arbeitszeit zu erwarten ist.

Auch im Bereich der Fertigung hat die Informationstechnik weitestgehend Eingang gefunden. Das fing mit der Bearbeitung von Teilen auf numerisch gesteuerten Maschinen an, bei denen ein Informationsprogramm die Bewegung der Schütten und der Meißel kontrolliert. Das folgende Dia zeigt eine numerische Drehmaschine, deren für uns jetzt wichtigster Teil in dem hier zu sehenden Rechner besteht, der über ein Kabel die wichtigsten geometrischen und technologischen Daten aus der Arbeitsvorbereitung und der Konstruktion erhält und selbsttätig eine Optimierung der einzelnen Verfahrensweg dieser Maschine vornehmen kann. In gleicher Weise arbeiten Meßmaschinen, die die an den

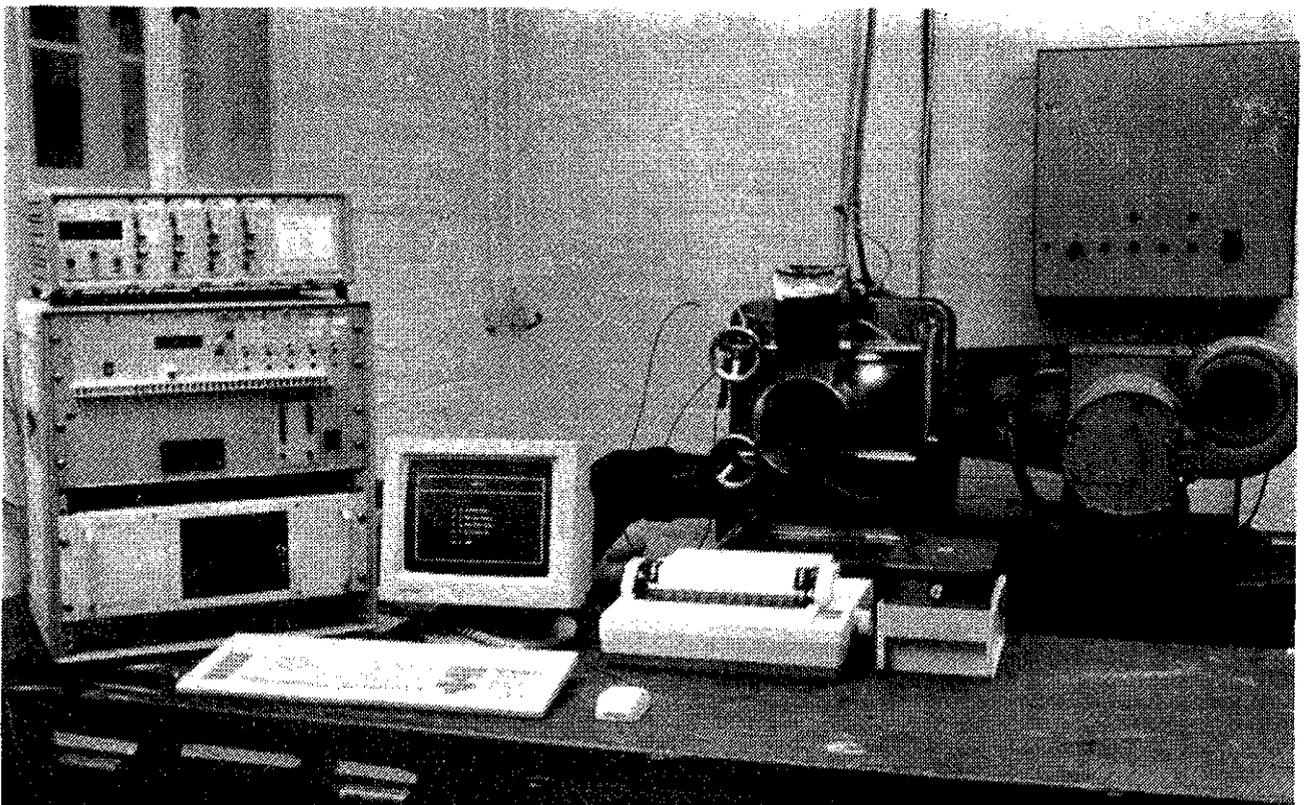
bearbeiteten Teilen aufgenommenen Daten mit von der Konstruktion vorgegebenen Daten vergleichen und entscheiden können, ob das gefertigte Teil den Qualitätsanforderungen entspricht oder ob es Ausschuß ist. Oder wie im folgenden Bild um eine ganze Reihe von Maschinen, die über einen einzigen Leitreechner so gesteuert werden, daß Genauigkeit und Teiletransport auch ohne Maschinenbediener gewährleistet ist - ein Beispiel für die berüchtigten "Geisterschichten" in der modernen Fertigung.

Sie können sich vorstellen, daß auf all diesen Gebieten eine starke Entwicklung herrscht und daß der Zwang zu immer höherer Produktivität zu ständig neuen Überlegungen führt, wie man diesen oder jenen Arbeitsgang verbessern, optimieren, automatisieren oder integrieren kann.

Auch für den Betrieb einer Anlage, die Optimierung von Maschinenparametern während des Prozesses selbst und die damit verbundenen Meß- und Regelvorgänge werden heute Informationstechniken eingesetzt, wie sie am folgenden Bild 9 dargestellt werden soll.

Es handelt sich um einen Prüfstand in den Labors der Technischen Universität Clausthal, in dem die verfahrens- und maschinentechnischen Bedingungen für eine Mühle, die Sie im Hintergrund sehen, ermittelt werden. Der im Vordergrund sichtbare PC übernimmt dabei sowohl die Regelungsfunktionen für die Steuerung des Luftdurchsatzes und der Drehzahl des Rotors als auch die Messung der jeweiligen Durchsätze, Drehzahlen, Drücke, Temperaturen usw..

Die Zahl dieser Beispiele kann beliebig vergrößert werden, auch wenn wir an andere Bereiche des Ingenieurwesens denken. In der Elektrotechnik sorgen beispielsweise Leiterplatten-Entflechtungsprogramme dafür, daß Verdrahtungen mit geringsten Überkreuzungen und minimalem Aufwand an Material durchgeführt werden können. In der Bergbautechnik kann die Entwicklung von Bergwerken so simuliert werden, daß beispielsweise rechtzeitig Umweltschutzmaßnahmen erkannt werden. In der Hüttentechnik sorgen numerische Analysengeräte und numerisch gesteuerte Walzstraßen für eine ausreichende Qualität der produzierten Stähle. Das gleiche gilt für die Chemie, die Physik oder die



**Bild 9:** Prüfstandsaufbau für eine Prallmühle mit Meß- und Regelung über PC

Geowissenschaften. Sie sehen also, daß Sie im späteren Berufsleben ohne eine intensive Handhabung der Informationstechnik zur Bewältigung Ihrer eigentlichen Ingenieuraufgaben nicht zurecht kommen werden.

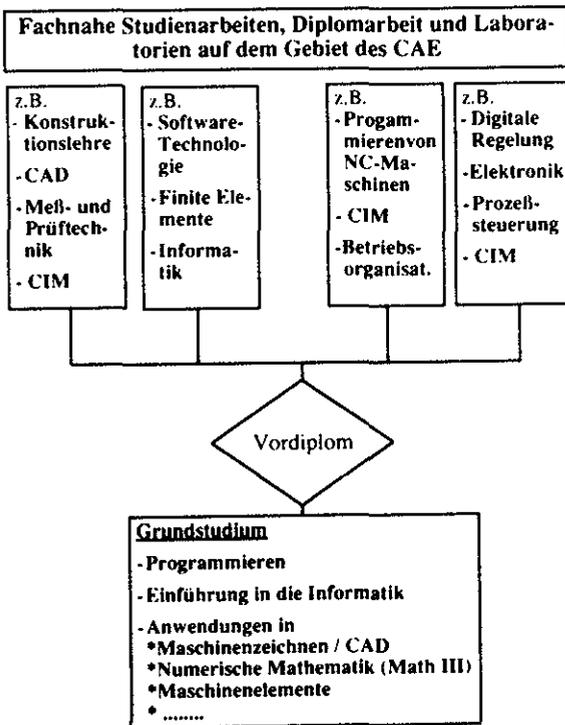
Die erste Schlußfolgerung, die ich daraus ziehe, ist ein Rat: Bemühen Sie sich gleich zu Beginn Ihres Studiums um eine Beherrschung der Rechner-techniken, damit die Grundlagen für die oben geschilderte Arbeitsweise gelegt werden. Leider ist es so, daß wir bei der Anwendung dieser Techniken einen neuen Wissensbereich in uns aufnehmen müssen, der auf den ersten Blick mit unseren eigentlichen Studienzielen nichts zu tun hat, den wir aber zur zeitgemäßen Bewältigung unserer Aufgaben beherrschen müssen. Dies bedeutet meist die Erlernung von Programmiersprachen, die Handhabung grafisch orientierter Arbeitsplätze und anderes mehr, nach meiner Erfahrung alles Dinge, die Ihnen neben der Lehr- und Übungsarbeit auch viel Spaß machen werden.

Die zweite Frage ist, wie kann die Universität die Erlangung des Wissens auf informationstechnischen Gebiet unterstützen. Wir sind uns durchaus der Aufgabe bewußt, daß mit den rechnergestützten Techniken eine Reihe von neuen Lehraufgaben auf uns zukommt. Diese bestehen einmal in der Vermittlung des Grundwissens zur Informationstechnik, also die Abhaltung von Programmierkursen, CAD-Übungen und Grundlagen der Finiten Elemente beispielsweise, zum anderen müssen auch die bisherigen Inhalte unserer Vorlesungen und Übungen so umstrukturiert werden, daß die rechnergestützte Ingenieurs-Arbeitsweise ein integraler Bestandteil dieser Ausbildung ist. Wir sind uns auch klar darüber, daß mit solchen zusätzlichen Ausbildungen bei gleichzeitiger Weitung des Wissens in den eigentlichen Fachgebieten die Anforderungen an Sie und an uns immer höher werden. Aus diesem Grunde sind wir in einer ständigen Erneuerung unserer Studienpläne bemüht, den Anforderungen der Wirtschaft bezüglich der Fähigkeiten und des Wissens unserer Abgänger ein entsprechendes Angebot an Lehrveranstaltungen gegenüberzustellen. Lassen Sie mich hierzu drei wesentliche Konsequenzen nennen:

1. Innerhalb des Grundstudiums müssen alle Ingenieure und Naturwissenschaftler, auch die Nichtinformatiker, in die Grundlagen der Informatik eingewiesen werden.
2. Durch den starken Einfluß der Informationstechnik haben sich die Ingenieurberufe soweit differenziert, daß dem auch in der Ausbildung Rechenschaft getragen werden muß. Bezüglich des starken Einfluß der Informatik gibt es beispielsweise zwei neue Studienrichtungen, nämlich
  - Informatik im Maschinenbau
  - Informatik in der Verfahrenstechnik.
 Damit schlagen wir eine Brücke zwischen der Informatik und den Anwendungsfächern, die seitens der Informatik und der Mathematik ebenfalls durch entsprechende Studienrichtungen
  - Techno-Mathematik
  - Angewandte Informatik
 weiter ausgebaut wird.
3. Die starke Ausweitung des Wissens bringt es mit sich, daß wir in unseren Vorlesungen und Übungen schon aus Zeitgründen nicht mehr das gesamte Fachwissen vermitteln können. Wir müssen uns also darauf konzentrieren, methodische Dinge zu bringen, die Sie in die Lage versetzen, ein Problem selbständig anzugreifen und zu lösen. Hier liegt im übrigen auch ein wesentlicher Unterschied zur derzeitigen Schul-ausbildung: Während Sie sich in der Schule darauf verlassen konnten, daß nur das vorgetragene Wissen abgefragt wird, werden wir hier an der Universität Ihnen Vorgehensweisen und Wissen exemplarisch an wichtigen Beispielen vermitteln und erwarten dann von Ihnen, daß Sie zu einer Anwendung dieser Methoden für ein technisch relevantes Problem befähigt sind.

Es bleibt aber zum Schluß nur die Frage, wie wir die rechnergestützten Methoden in das Studium integrieren und welche Möglichkeiten wir Ihnen zur Erlangung des Wissens bieten. Lassen Sie mich dies an einer Grobstruktur des Studiums im Bereich Maschinenbau beispielhaft erläutern (**Bild 10**):

## Unterschiedliche Studienrichtungen



**Bild 10:** Einbindung der Informationstechniken in das Studium des Maschinenbaus an der TU Clausthal

Im Grundstudium erlernen Sie zunächst einmal den Umgang mit den Grundwissenschaften, bezüglich der Informationstechnik sind hierzu zunächst im ersten Semester der Programmierkurs und das Erlernen grafischer Darstellungen mit Hilfe von CAD angesiedelt. Dieses Wissen wird im weiteren Grundstudium genutzt, um Fachprobleme zu lösen, d.h. in der Mathematik III werden beispielsweise Programmierkenntnisse verlangt, um Aufgaben aus der numerischen Mathematik mittels des Rechners zu lösen. Im Fach Maschinenelemente werden eine Reihe von Maschinenelemente-Berechnungsprogrammen bereitgestellt, die Ihnen helfen die oben beschriebenen Simulationen bei der Auswahl der Maschinenelemente durchzuführen und so eine Konstruktion zu optimieren. Ähnliches gilt für andere Fächer.

Nachdem Sie die Klippe des Vorexamens überwunden haben, können Sie im Hauptstudium relativ freizügig sich den Fächern widmen, die Ihnen besonders liegen. Ich habe hier als Beispiel einige Fächer hingeschrieben, die schon Anforderungen an den Umgang mit dem Computer stellen, die dieses

Wissen und das Verständnis um die rechnergestützten Ingenieurtechniken aber dann in weiteren Vertiefungsvorlesungen und Labors behandeln. Sie sehen in diesem Diagramm einige Fächer, die zum Teil zu den Wahlpflichtfächern gehören oder denen Sie sich im Sinne einer Spezialisierung zuwenden können.

Natürlich kostet eine solche Ausbildung Geld, um die notwendigen Voraussetzungen zu schaffen, am wichtigsten sind Rechner und Arbeitsplätze, die ja noch vor 5 Jahren durchaus nicht zum selbstverständlichen Werkzeug des Studenten oder überhaupt Ingenieurs gehört haben. Hier hat glücklicherweise der Staat - und damit meine ich besonders unsere Landesregierung - ein Einsehen gehabt und in verschiedenen Förderungsprogrammen die Hochschulen mit Grundmitteln für eine solche Ausbildung ausgestattet. Wir sind beispielweise stolz Ihnen eine Grundausbildung in CAD anbieten zu können, die Ihnen die Geräte eines voll ausgestatteten Arbeitsplatzes zur Verfügung stellt, wie er heute in der Industrie üblich ist.

**Bild 11** gibt Ihnen einen Eindruck von den Arbeitsplätzen in einem der Institute, es zeigt aber auch gleich die großen Anstrengungen für eine solche Ausbildung: Da wir zur Zeit nur über insgesamt 14 solcher Arbeitsplätze verfügen können, bedeutet das für die ca. 370 Studenten, die wir im ersten Se-



**Bild 11:** CAD-Arbeitsplätze im Inst. für Maschinenwesen

mester durch diese Übungen führen müssen, Übungszeiten bis weit in die Nacht hinein. Für die Bereitschaft, sich diesen Bedingungen für das Ziel einer guten Ausbildung zu unterwerfen, danke ich

Ihnen, danke ich aber auch bei dieser Gelegenheit unseren wissenschaftlichen Mitarbeitern und den Tutoren, die sich schließlich auch bis tief in Nacht hinein mit Ihnen, den Anfängern herumschlagen müssen.

Das letzte **Bild 12** soll als kleiner Anreiz für das noch weit vor Ihnen liegende Gebiet des Hauptstudiums gelten.

Wir haben in einem Institut eine kleine CIM-Fabrik aufgebaut, die aus einer Drehmaschine, einer Fräsmaschine, einer hier nicht sichtbaren Meßmaschine, einem Werkzeug-Voreinstellplatz und einer entsprechenden Rechnerausstattung besteht.

Hier können Vorgänge, wie sie in der Produktion von Unternehmen durchgeführt werden an Beispielen erprobt werden und somit die Grundlagen geschaffen werden, solche Probleme in Studien- und Diplomarbeiten weiter zu verbessern und sich selbst damit auf die Praxis vorzubereiten.

Mit diesem Angebot an Studienmöglichkeiten, die Sie - und hier kommen wir auf den Anfang meines Vortrages zurück - nur an einer Hochschule mit sehr intensiven Kontakt zwischen Lehrenden und Lernenden geboten bekommen - möchte ich meine Ausführungen beschließen und wünsche Ihnen viel Vergnügen bei Ihrem Studium.



**Bild 12:** CIM-Labor im Institut für Maschinenwesen

# Konstruktionssystematische Betrachtungen zur Entwicklung verfahrenstechnischer Maschinen, dargestellt am Klassierprozeß

P. Dietz und J. Ebert

## 1. Einleitung

*Die geschichtliche Entwicklung der aus den gleichen Grundlagen abgeleiteten Ingenieurdisziplinen Maschinenbau und Verfahrenstechnik hat zu spezifischen Vorgehensweisen bei der Lösung technischer Probleme geführt. Während in der Verfahrenstechnik im Hinblick auf die Optimierung von Stoffwandlungsprozessen den Stoffeigenschaften und ihrer Beurteilung "vor und nach dem Prozeß" besondere Aufmerksamkeit gewidmet wird, befaßt sich der Ingenieur des Maschinenbaus mit der Optimierung der am Prozeß beteiligten Maschinenteile durch Veränderung von Geometrie, Werkstoff, Belastungs- oder Beanspruchungsmechanismen.*

*Die mit der jeweiligen Aufgabenstellung verbundene Vorgehensweise und ihre Unterschiede werden dann besonders deutlich, wenn ein verfahrenstechnischer Prozeß mit Hilfe von Maschinen verbessert oder überhaupt verwirklicht werden soll, wenn also die konstruktive Ausführung der Maschine den verfahrenstechnischen Erfolg bestimmt. Der folgende Aufsatz ist ein Beitrag, der insbesondere die im Maschinenbau entwickelte Konstruktionsmethodik auf die Ausarbeitung verfahrenstechnischer Problemstellungen darstellen soll. Er entstammt Forschungsarbeiten, die im Rahmen eines Sonderforschungsbereichs "Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen unter besonderen mechanischen, thermischen und chemischen Belastungen" an der Technischen Universität Clausthal durchgeführt werden.*

## 2. Verfahrenstechnische Aufgabenstellung

Die Entwicklung neuer Werkstoffe oder die Qualitätsverbesserung bestehender Stoffe wie z.B. der Hochleistungskeramik fordert feinere Korndurchmesser. Die Keramikindustrie benötigt z.B. Kornfeinheiten von  $x_1 < 1 \mu\text{m}$  bei geringem Anteil von Überkorn zur Fertigung hochbeanspruchbarer Bauteile. Diese Forderung ist nicht allein durch eine Verbesserung

des Mahlprozesses zu erfüllen, die erforderlichen Trenngrößen müssen durch Feinklassieren der feinen Partikel aus einem Partikelgemisch erreicht werden.

Für die Feinstklassierung werden heute überwiegend Abweiserad- und Spiralsichter verwendet. Rumpf und Kaiser [1] konnten bereits 1952 mit einem Laborsichter eine minimale Trennkorngröße von  $x_1 = 2 \mu\text{m}$  realisieren. Leschonski [2] erzielte mit einem modifizierten ACUCUT B 18 Abweiseradsichter eine Trennkorngröße von  $x_1 = 1 \mu\text{m}$ . Im folgenden soll am Beispiel des verfahrenstechnischen Prozesses der Klassierung untersucht werden, ob die im Rahmen einer konstruktionsmethodischen Vorgehensweise entwickelten Verfahren der Funktionsanalyse, der Synthese von Lösungen aus den physikalischen Grundlagen heraus und der systematischen Lösungsauswahl eine Anwendung finden auf die Gestaltung eines verfahrenstechnischen Prozesses und seiner Maschinen. Das Ziel der hier angestellten Überlegungen besteht in der Erarbeitung eines grundsätzlichen Lösungsfeldes und einer Bewertung nach verfahrenstechnischen Gesichtspunkten. Besonders interessant ist dabei die Frage, ob das methodische Vorgehen mit diskursiven Lösungsmethoden den oft propagierten Anspruch auf Vollständigkeit des Lösungsfeldes im Vergleich mit bekannten Lösungen erfüllt.

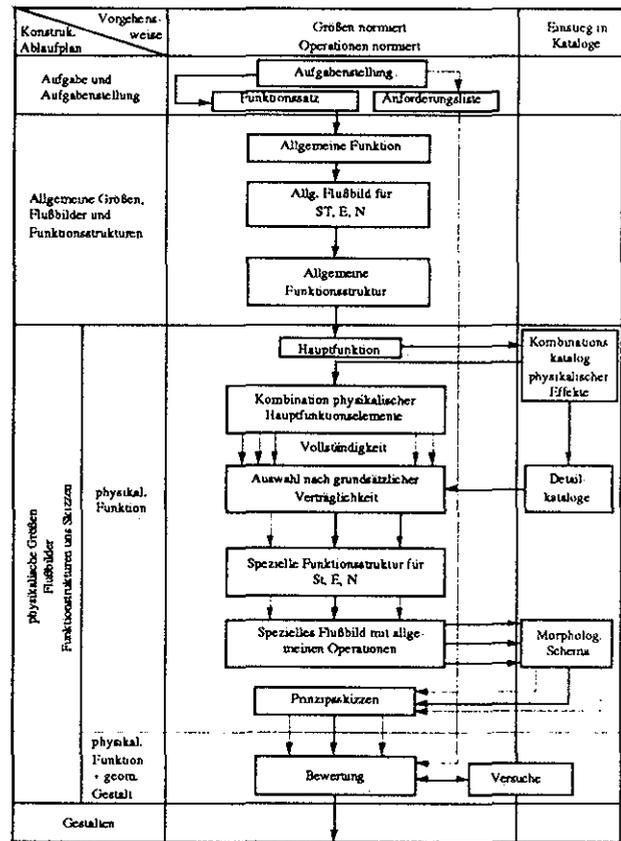
## 3. Konstruktionsmethodische Werkzeuge und Vorgehensweise

Für die vorliegende Aufgabe der Erstellung grundsätzlicher Lösungen eignen sich besonders die Vorgehensweisen nach Koller [3] und Roth [4], die beide die Grundüberlegungen von Rodenacker weiterführen. Nach Koller, der in seinen Arbeiten auch verfahrenstechnische Operationen behandelt, ist die Klassierung eine Grundoperation und die Lösungen werden in einer Systematik der physikalischen Effekte für die Grundoperation "Trennen von Stoffen" geordnet. Das daraus abgeleitete Lö-

sungsfeld enthält gängige Möglichkeiten wie Sichtung im Schwerkraftfeld, Siebung, Benetzbarkeit, Flotation. Aufgrund der Abgeschlossenheit einer solchen Systematik wird aber eine detaillierte systematische Untersuchung nach neuen bzw. unüblichen Wirkprinzipien nicht unterstützt. Der Vergleich mit den aus der verfahrenstechnischen Forschung bekannten Lösungen zeigt, daß die von Koller angebotene Systematik in diesem Fall durch die Beschreibung der physikalischen Phänomene bezogen auf die technische Anwendung bereits eine Auswahl trifft. Sie täuscht damit eine Vollständigkeit vor, die noch tiefergehenden Betrachtungen zu den physikalischen Grundlagen des Trennprozesses nicht standhält und damit den Weg zu neuen Grundsatzlösungen "versperrt".

Für die hier vorliegende Aufgabenstellung mit konsequenter Rückführung auf physikalisch definierte Grundoperationen gibt die Vorgehensweise nach Roth [4] wesentliche Hilfen. Die darin enthaltenen Ansätze zur algorithmischen Funktionsbeschreibung erfordern eine tiefgehende Analyse der Aufgaben- und Funktionsstruktur mit Hilfe von **Funktionsätzen**. Durch weitere Abstraktion läßt sich mit den fünf Grundfunktionen (Speichern, Leiten, Umformen, Wandeln, Verknüpfen) und den Funktionsgrößen (Stoff, Energie, Signal/Nachricht) die konstruktive Aufgabe in einer allgemeinen Funktionsstruktur darstellen. Im weiteren Verlauf des Konstruktionsprozesses können dann entweder über eine Darstellung der physikalischen Funktionen als vektorielle Funktionen oder als Funktionen aus Intensitäts- und Quantitätsgrößen die geometrische Linienstruktur bzw. eine Prinzipskizze gewonnen werden.

Das im folgenden dargestellte konstruktions-systematische Vorgehen für das Beispiel der Klassierung soll konstruktive Hinweise in allgemeingültiger Form liefern, die Vollständigkeit des untersuchten Lösungsfeldes gewährleisten und die Übernahme von Erfahrungen und Lösungen für andere Aufgabenstellungen sicherstellen. Hierzu ist die Vorgehensweise nach Roth mit ihren restriktiven Ablaufplänen und der Einbindung der Kataloge geeignet, da die Kataloge als geordnete Informationsträger auch für andere Aufgabenstellungen eingesetzt werden können. **Bild 3.1** zeigt die für die folgenden Ausführungen gewählte Vorgehensweise. In der Analyse der Auf-



**Bild 3.1:** Darstellung der methodischen Vorgehensweise für die Suche nach physikalischen Wirkprinzipien in der Konzeptphase

gabenstellung werden schematisch aus einer verbalen Entwicklung des Funktionssatzes die Unterfunktionen gewonnen und im allgemeinen Flußbild dargestellt. Die allgemeine Funktionsstruktur wird aus dem allgemeinen Flußbild durch Abstraktion der Darstellung ermittelt. Zur Auffindung des Lösungsprinzips werden die Kombinationsmöglichkeiten physikalischer Effekte mit Hilfe eines hier speziell entwickelten **Kombinationskataloges** variiert, der aufgrund eines lückenlosen Aufbaus aus den mechanischen Grundgrößen die Vollständigkeit der gefundenen Lösungen gewährleistet. Diese Kombinationen werden dann mit Hilfe eines **Detailkataloges**, der die Größen des Kombinationskataloges unter den gewünschten Randbedingungen quantifiziert und qualifiziert, auf ihre grundsätzliche Aufgabenverträglichkeit hin untersucht und ausgewählt. Die allgemeine Formulierung der Grundfunktionen erlaubt den Einsatz von geordneten Informationsträgern für die Lösungssuche. Die Lösungsträger der Grundfunktionen werden mit Hilfe morphologischer Schemata miteinander kombiniert. Eine Vorstellung

Gesamtaufgabenstellung	Aus Teilaufgabenstellung	
	Funktionssatz	Hauptfunktionssatz
1	2	3
1. Partikel trennen	2.1 Partikel unterschiedlicher Durchmesser müssen zugeführt werden	3.1 Partikel sollen geleitet werden
		3.2 Partikelagglomerate auflösen
		3.3 Partikel getrennt halten
		3.4 Partikel verfahrenstechnischer Wirkfläche zuführen
	2.2 Partikel müssen verteilt in verfahrenstechnischen Wirkraum Wirkvorgang ausgesetzt werden	3.5 Energie in Kraft wandeln
		3.6 Kraft leiten
		3.7.1 Kräfte auf feine Partikel leiten
		3.7.2 Kräfte auf grobe Partikel leiten
	2.5 Feine und grobe Partikel müssen zu geometrisch unterschiedlichen Orten fortbewegt werden	3.8 Partikel in unterschiedliche Richtungen beschleunigen
		3.9 Gegenläufige Partikelbewegung verhindern
		3.10 Feine Partikel leiten
		3.11 Reagglomeration verhindern
2.10 Feine Partikel abführen	3.12 Grobe Partikel leiten	
2.12 Grobe Partikel abführen		

Bild 4.1: Aufgliederung des Hauptfunktionssatzes zur Ermittlung der Teilfunktionen und Formulierung entsprechender Haupt- und Nebenfunktionssätze

der geometrischen Gestalt der jeweiligen Konzeptvariante kann in Prinzipskizzen festgehalten werden. Die Bewertung der Lösungsträger erlaubt die Auswahl des besten Lösungsträgers für eine weitere Detaillierung in der gestalterischen Phase des Konstruktionsprozesses.

#### 4. Funktionssatz, Funktionsstruktur und allgemeines Flußbild

Aus dem verbal formulierten Satz " *Konstruktion einer Maschine zum Klassieren trockener Pulvergemische* " läßt sich die Hauptfunktion " *Trennen von Pulvergemischen nach Größe der Körner* " abstrahieren. Durch eine Aufgliederung des Funktionssatzes der Gesamtaufgabenstellung erhält man daraus die Funktionssätze der Teilaufgabenstellungen (Bild 4.1). Das aus der Formulierung der Unterfunktion gewonnene allgemeine Flußbild enthält verbale Bezeichnungen der Teilfunktionen, die möglichst auf allgemeine Funktionen zurückgeführt werden. Die zeitliche Abfolge wird dabei durch den Transportvorgang zur Wirkfläche und den

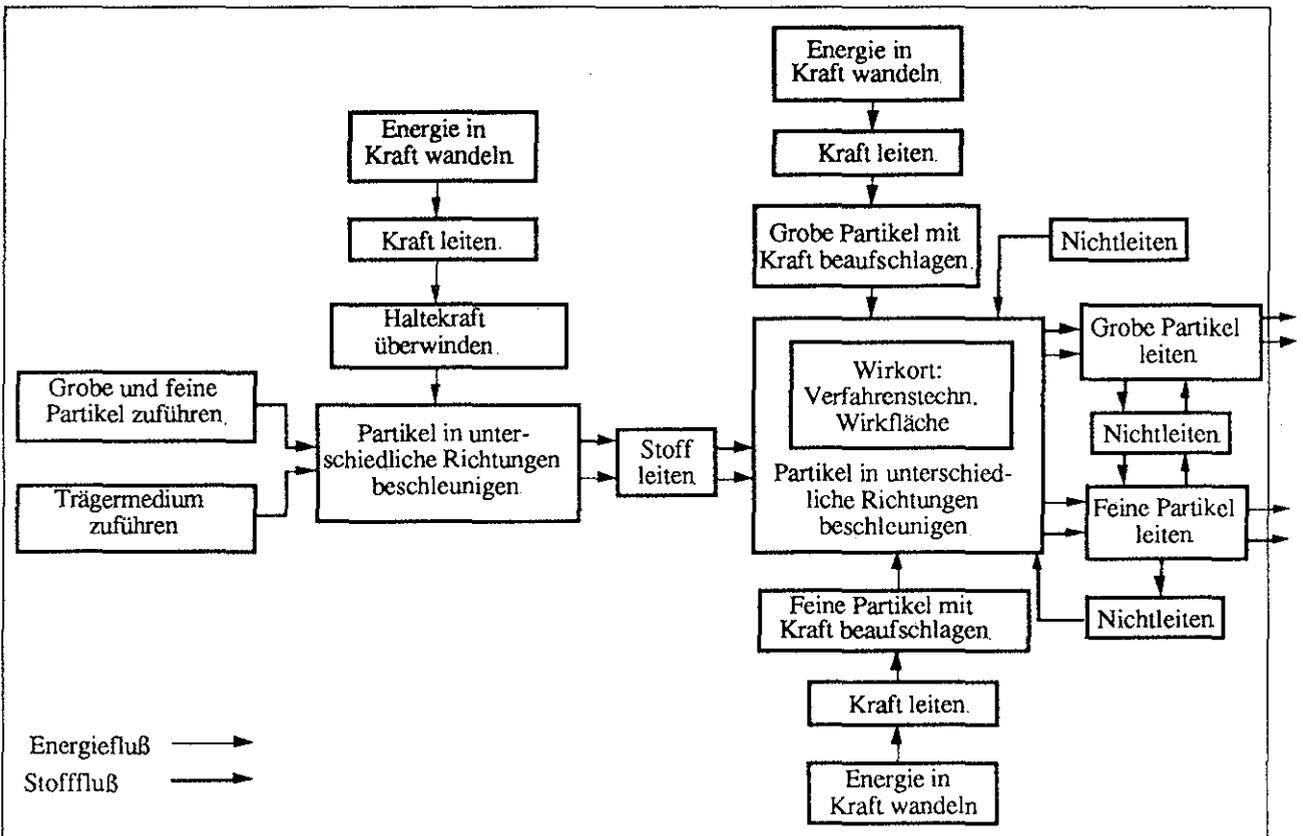


Bild 4.2: Darstellung eines allgemeinen Flußbildes für St - Stofffluß, E - Energiefluß, N - Nachrichtenfluß am Beispiel "Neuentwicklung eines Feinstklassierers".

Abtransport des Produktes mit Hilfe eines Transportmediums bestimmt. Die in Bild 4.2 angeführte Funktion - **Nichtleiten** - bezeichnet das Abdichten, das heißt grobe und feine Partikel sollen nach dem Klassiervorgang nicht mehr gegenseitig durchmischen werden können. Die Hauptfunktion - der Klassiervorgang - findet in der verfahrenstechnischen Wirkfläche statt. Eine Klassierwirkung kommt durch die Wirkung unterschiedlicher Kräfte auf feine und grobe Partikel zustande. Diese Kräfte müssen durch einen Energie-wandelprozeß aufgebracht werden.

5. Erstellung eines Kombinationskataloges zur Auffindung physikalischer Effekte für die erkannte Zentralfunktion "Partikel klassieren"

Die Hauptfunktion der Maschine läßt sich aus dem allgemeinen Flußbild durch weitere Verallgemeinerung der dort gefundenen Beschreibungen definieren mit

"Partikel mit Kräften beaufschlagen, die an Partikeln unterschiedlicher Eigenschaften in unterschiedliche Richtungen oder mit unterschiedlichen Beträgen wirken".

Gliederungsteil						Hauptteil						Zugriffsteil						Katalog: Kombinat	
Krafttyp	Physikalisches Gesetz	Spezieller Effekt	Gleichung	Anordnungsbeispiel	Nr.	Stoffliche Bedingungen für Kraftwirkung	Erzeugte Intensitäts- oder Feldgröße	Ständige Energiezufuhr nötig	Arbeitsvermögen der Kraftgröße	Größe der erzeugbaren Kräfte	Charakteristische Abmessung	Schwerkraft	Trägheitskräfte						
1	2	3	1	2		1	2	3	4	5	6	Gravitationsgesetz	Newton'sches Gesetz						
												$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$	$F = \frac{d(mv)}{dt}$						
Volumenkraft																			
Oberflächenkraft																			
												1	2	3	4	5	6	7	
Schwerkraft	Gravitationsgesetz	$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$	Erdanziehung		1	zwei Masse-träger	Schwerefeld	nein	ja	mittel	$\sqrt{m/p}$								
												$F = m \cdot g$	$F = \rho \cdot g \cdot V$	$F = m \cdot a$	$F = m \cdot \omega^2 \cdot r$	$F = 2m \cdot \omega \cdot v$	$F = m \cdot \omega^2 \cdot r$	$F = m \cdot v^2 / r$	$F = m \cdot v^2 / r$
												Auftrieb	Bohrschleunigung	Zentrifugalkraft	Corioliskraft	Strahlkraft	Rückstoßprinzip	Konjektive Beschleunigung	
Trägheitskräfte	Newton'sches Gesetz	$F = \frac{d(mv)}{dt}$					Geschwindigkeit	ja (Reibung)	unmittelbar nur an Körpern des Relativsystems	groß	r								
												$F = m \cdot a$	$F = m \cdot \omega^2 \cdot r$	$F = 2m \cdot \omega \cdot v$	$F = m \cdot \omega^2 \cdot r$	$F = m \cdot \omega^2 \cdot r$	$F = m \cdot \omega^2 \cdot r$	$F = m \cdot \omega^2 \cdot r$	
Elektrische Kräfte	Coulomb'sches Gesetz	$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \epsilon_0 r^2}$	Coulomb'sche Kraft		10	feste Ladungsträger	elektrische Feldstärke	nein	ja	sehr klein	-								
												$F = D \cdot E$	$F = \frac{1}{2} \epsilon \cdot E^2 \cdot A$	$F = k \cdot U^2 \cdot A$	$F = \frac{1}{2} \epsilon \cdot E^2 \cdot dV$				
												Kondensator-effekt	Johnson-Rhebeck-Effekt	Dielektrikum in inhomog. Feld					

Bild 5.1: Ausschnittverkleinerung des Kombinationskataloges

Damit ist eine Rückführung auf die physikalische Grundgröße Kraft gegeben, deren Abhängigkeit von den Eigenschaften der zu trennenden Partikel näher untersucht werden kann. Da der Trennprozeß auf der Wirkung von unterschiedlichen Kräften in Abhängigkeit von der Partikelgröße beruht, sollen die unterschiedlichen charakteristischen Eigenschaften "Volumen" und "Oberfläche" als Kriterien herangezogen werden. Damit kann das Feld aller möglichen Lösungen für die Hauptfunktion mit Hilfe eines Kombinationskataloges erschlossen werden. Durch eine Auftragung aller möglichen Kräfte auf der Ordinate sowie der Abszisse wird ein Ordnungsschema aufgebaut, das nur noch nach bestimmten Merkmalen durchgesehen werden muß (Ausschnitt s. Bild 5.1). Die Kräfte wurden dem Katalog "*Kraft mit anderen Größen erzeugen*" von Roth [4] entnommen. Es wurden auf beiden Achsen alle bekannten Kräfte aufgetragen, um das Schema allgemein auch für die Suche nach anderen Kraftkombinationen nutzen zu können. Kräfte, die grundsätzlich in der Lage sind den gewünschten Abszisseneffekt bzw. Ordinateffekt zu erzielen, erhalten einen Schrägstrich. Kreuzen sich nun zwei Schrägstriche, so ist eine grundsätzliche Variationsmöglichkeit entdeckt. Die Auswertung des Kombinationskataloges ergibt für die Klassierung die in Bild 5.2 dargestellten

Oberflächenkraft	Volumenkraft
1 Adhäsion	- 1. Osmose - 2. Corioliskraft - 3. Auftrieb - 4. Gewicht - 5. Gravitation
2 Dia- und paramagnetische Kraft im inhomogenen magnet. Feld	- 1. bis 5.
3 Lorenzkraft	- 1. bis 5.
4 Permanentmagnet	- 1. bis 5.
5 Dielektrikum im inhomogenen elektr. Feld	- 1. bis 5.
6 Coulomb'sche Kraft	- 1. bis 5.
7 Schalldruck	- 1. bis 5.
8 Federdeformation	- 1. bis 5.
9 Widerst. in laminarer Strömung	- 1. bis 5.
10 Widerst. in turbul. Strömung	- 1. bis 5.
11 Dynamischer Widerstand	- 1. bis 5.
12 Magnuseffekt	- 1. bis 5.
13 Elastischer Stoß	- 1. bis 5.

Bild 5.2: Mögliche Kräftekombinationen von oberflächen- und volumenbezogenen Kräften aus dem Kombinationskatalog.

Kräftekombinationen. Die Aufnahme von Kräften wie Federdeformation oder Elastischer Stoß, die nur als Reaktionskräfte auftreten können, ist von der Systematik her zwingend notwendig, da auch diese Kräfte an der Oberfläche von Partikeln wirken können. Anschaulich läßt sich die Aufnahme dieser Kräfte zum Beispiel durch den Sortiereffekt von Partikeln bei der Siebung darstellen. Dort werden Partikel aufgrund der elastischen Deformationskräfte der Trennfläche zurückgehalten, wenn das Teilchen größer ist bzw. durch Reibungskräfte für Partikel, die geringfügig kleiner sind als die Maschenweite.

## 6. Auswahl geeigneter Kraftkombinationen

Entsprechend dem in der Hauptfunktion geforderten Richtungscharakter kommen nur Kräfte in Frage, deren Wirkrichtung frei einstellbar ist, die also durch ein Kraftfeld hervorgerufen werden.

### 1. die *Oberflächenkräfte*:

Coulombkraft, Widerstandskraft bei laminarer Strömung, Widerstandskraft bei turbulenter Strömung, Lorentzkraft

### 2. die *Massenkräfte*:

Gravitationskraft, Auftriebskraft, Zentrifugalkraft, Corioliskraft

Die anderen Kräfte treten nur als Reaktionskräfte in Erscheinung, z.B. die Adhäsionskraft, die Federdeformation etc.. Eine weitere Auswahl geeigneter Funktionsträger kann durch eine Quantifizierung der Kräfte in Abhängigkeit von den charakteristischen Eigenschaften der Partikel erfolgen. Dabei erfolgt die Bewertung der Eigenschaften zweckmäßigerweise in einem Beschreibungskatalog, wie ihn Bild 6.1 ausschnittsweise zeigt.

Als Ergebnis der quantifizierten Bewertung zeigt Bild 6.2 die Potentialkräfte und ihre Kraftgröße auf Partikel im Durchmesserbereich 0.5 bis 5 µm doppellogarithmisch aufgetragen. Diese Darstellungsweise zeigt sehr übersichtlich potentielle Funktionsträger auf, denn nur Kräfte, deren Graphen sich in diesem Intervall schneiden, sind geeignet Partikel für einen definierten Trennkorn Durchmesser zu klassieren. Folgende Oberflächen-Volumenkraftkombinationen weisen innerhalb des betrachteten Bereichs ein Lö-

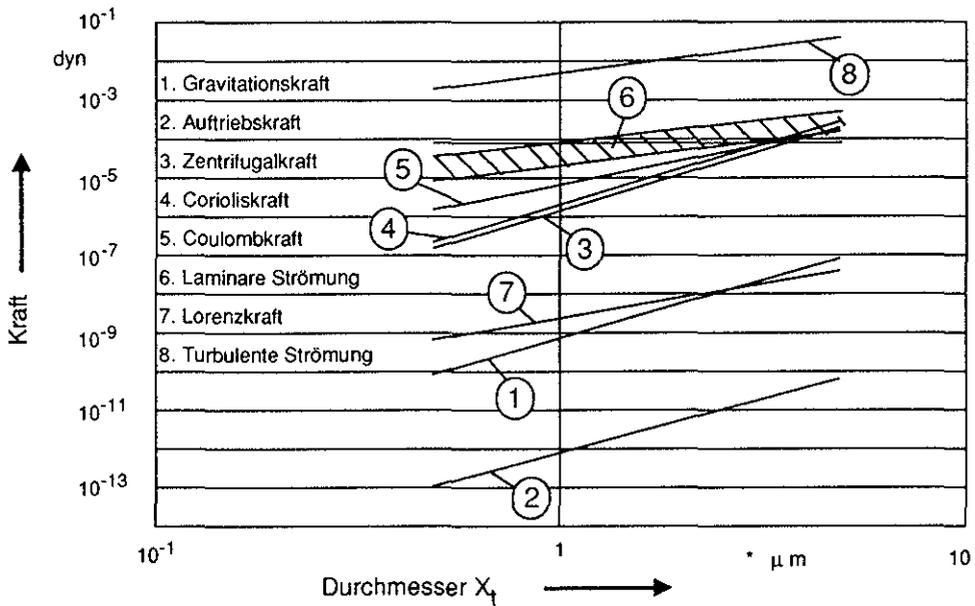
Gliederungs- teil	Ort der Kraft- wirkung	1.	2.	3.	4.	5.	6.	
		Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberfläche	Oberf	
Hauptteil	Kraft- typ	Adhäsionskräfte				Coulomb-Kraft	Lorentz-Kraft	Widerst in Lami Strömur
		van der Waal's Kraft	Flüssigkeits- brücken	elektrostat. Kräfte				
Hauptteil	Gleich- ung	$F_{vdw1} = \frac{E_p \cdot R}{8 \cdot \tau \cdot L^2}$ $F_{vdw2} = \frac{E_p \cdot R}{16 \cdot \tau \cdot L^2}$	$F_H = \alpha d f(\delta, \beta)$	Leiter: $F = \pi \epsilon_0 \epsilon_r U^2 \frac{R}{L}$ Isolator: $F = \frac{2 \epsilon \epsilon_r}{\epsilon_0 \epsilon_r} R^2$	$F_c = Q E$ mit Kugeloberfläche $Q = G' \cdot r^4 \cdot r^2$	$F_L = Q \cdot v \times B$ $B = \mu_0 \mu_r H$ Bahnradius $r = \frac{h \cdot v}{m \cdot v}$ Lamor-Freq. $\omega = \frac{e}{h} B$	$F = 3 \pi r$ $Re = \frac{W_0'}{\eta}$	
	Anwend- ungs- beispiel							
Zugriffsteil	Kraft- leitung	statistische Dipole Kontakt /12/	Flüssigkeits- reste Kapillarwirk.	Potential	Potential	Magnetische Feldlinien	Medi	
	Kraft- richtung	ungerichtet	ungerichtet	ungerichtet	Vektor parallel zu Feldlinien	Schraubenförm. Bahn - Achse Feldrichtung	Vektor Strömung geschw. -	
	Kraftgröße	Dia- gramm						
		techn. R.B.	$L = L_0 = 0,4 \text{ nm}$ $E_p = 8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ Für Gutbeladung: $\mu = 0,1$ mittl. Teilchenabst. $L = 1,341 \mu\text{m}$	$\alpha = 72 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}}$ $H = H_0 d \text{ [N]}$ $H_0 = 1,6 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{N}}{\text{mm}}$ grafische Darst. /16/ S.120 ff.	vernachlässigbar /24/ S. 156 ff. $U = 0,1 - 0,7 \text{ V}$ $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$ $G = 100 \frac{\text{e}}{\mu\text{m}^2}$ $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$	Oberfl. Ladung $G = 100 \frac{\text{e}}{\mu\text{m}^2}$ max. Feldstärke $E = 2 - 3 \text{ kV/cm}$ gerechnet mit $E = 1 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$ $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$	Magnetfeld leistet keine Arbeit - nur stetige Richtungs- änderung $B = 1,8 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$ $v = 200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ $H = 1000 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$	$Re < 0,25$ $c = \frac{24}{Re}$ $\eta = 1,81$ $Q_{Lutz} = 1,2$ $\eta_{max} = 3,77$
Quelle	/9/ ; /10/ /hier/	/24/ ; /16/	/24/ ; /9/	/9/ ; /20/ S. U10	/22/ ; /20/ ; /21/ S. 383 U6 S. 190	/8/ ; /32/ S. 339 f		

Bild 6.1: Ausschnitt aus dem Bewertungskatalog "Kraftwirkung auf Partikel"

sungspotential auf :

1. Lorentzkraft - Gravitationskraft  
7 - 1
2. Coulombkraft - Corioliskraft  
5 - 4
3. Coulombkraft - Zentrifugalkraft  
5 - 3
4. Widerstandskraft - Corioliskraft  
(laminare Strömung)  
6 - 4
5. Widerstandskraft - Zentrifugalkraft  
(laminare Strömung)  
6 - 3
6. Widerstandskraft - Coulombkraft  
(laminare Strömung)  
6 - 5

Bild 6.2 läßt außerdem erkennen, daß für andere Intervalle der Trennung andere Kraftkomponenten zur Lösung führen. Die Graphen für die Lorentzkraft (7) und die Zentrifugalkraft (3) schneiden sich im Bereich  $\ll 0,01 \mu\text{m}$  - beispielsweise ausgenutzt bei der Messung von Molekularmassen -, der Schnittpunkt von Auftriebskraft (2) und Strömungskraft (6) bei größeren Partikeldurchmessern wird in der Separationstechnik und Flotation technisch genutzt.



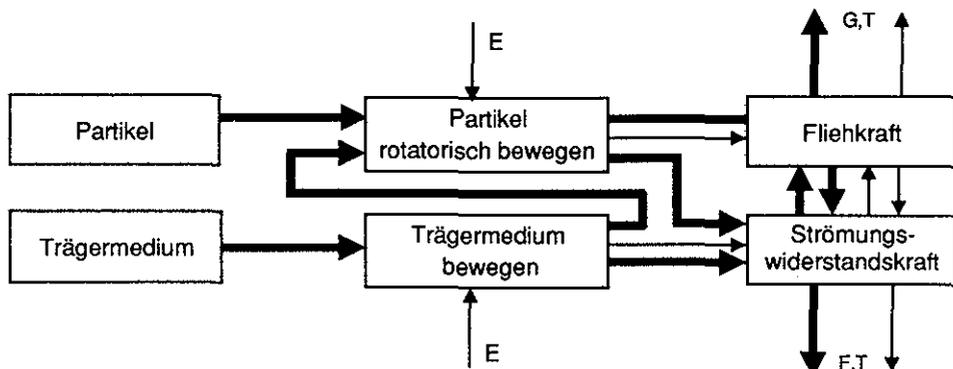
**Bild 6.2 :** Darstellung der Kraft auf ein Einzelpartikel in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser für verschiedene Potentialkräfte aus Bewertungskatalog "Kraftwirkung auf Partikel".

**7. Weiterentwicklung eines Maschinenkonzepts am Beispiel der Prinzipkombination :**

**Widerstandskraft in laminarer Strömung - Zentrifugalkraft, Kombination 6 - 3**

Die weitere konstruktive Entwicklung soll am Beispiel des auf der Wirkung von Zentrifugalkraft beruhenden Windsichters beschrieben werden. Probleme bei der Aufstellung der Funktionsstruktur **Bild 7.1** bereitet die Vielzahl der möglichen Anordnungen und die chronologische Reihenfolge der Effektwirkungen, z.B. kann die Strömungswiderstandskraft zum Transport der Partikel vor der eigentlichen Klassierung genutzt werden, um dann nach der Sichtung die groben und die feinen oder nur noch die feinen Parti-

kel zu transportieren. Sie kann gleichzeitig mit der Zentrifugalkraft auf die Partikel einwirken und nach dem Angriff der Zentrifugalkraft die zunächst mit konstanter Geschwindigkeit bewegten Teilchen zu unterschiedlichen Abbremswegen veranlassen usw. Diese unterschiedlichen Kräftewirkungen müssen in den speziellen Funktionsstrukturen enthalten sein. Für die Aufstellung von Lösungsfeldern eignen sich insbesondere morphologische Schemata, die Ordnungskriterien "Physikalischer Effekt" und "Wirkbewegung" führen dabei zu einer vollständigen Beschreibung möglicher Lösungen. **Bild 7.2** zeigt die mit dem allgemeinen Lösungsschema "**Bewegung auf Partikel leiten**" gefundenen Funktionsträger. Die Konzentration auf das Wirkprinzip Fliehkraft gibt hierzu eine Auswahl von Lösungen, bei de-



**Bild 7.1:** Spezielle Funktionsstruktur für die Lösungskombination Widerstandskraft in laminarer Strömung - Zentrifugalkraft

Partikelbewegung	1.	2.	3.	4.	5.
physikalischer Effekt	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
1. Impuls Stoß					
2. Friktion Reibung	2.1	2.2.1 od. 2.2.2	2.3	2.4	2.5
3. Strömung	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
4. Normalkraft	4.1	4.2.1 od. 4.2.2	4.3	4.4	4.5
5. Adhäsion	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5
6. elektrisches Feld	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5
7. magnetisches Feld	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5
8. Gravitationsfeld	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5

Bild 7.2: Lösungsschema "Bewegung auf Partikel leiten"

Partikel mit Strömung beaufschlg.		Richtung zur Fliehkraftwirkung		
Rotation auf Partikel leiten				0
freie Strömung				0
gerichtete Strömung	axial	0		
	radial		0	0
magnetisches Feld				
elektrisches Feld				
Impuls/Stoß Drehteller!		0		
Reibung				

Bild 7.3: Morphologisches Schema zur Suche nach Lösungskombinationen für "Partikel mit Strömungswiderstandskraft beaufschlagen" und "Rotation auf Partikel leiten"

nen mindestens eine Bewegung rotatorisch ist, also z.B. die Spalten 2, 3 und 5. Das daraus weiter abgeleitete Lösungsfeld nach den Ordnungskriterien "Wirkbewegung" Bild 7.3 stellt die möglichen Kombinationen der Bewegungsrichtungen zum Trennvorgang dar. Auf der Abszisse des Schemas ist als ordnender Gesichtspunkt die Richtung der Strömungskraft in Bezug zur Zentrifugalkraft eingetragene. Dies entspricht der Anordnung **Gegenstrom, Querstrom** und **keine Strömungsgeschwindigkeit**.

Lösungskombinationen, die ein Lösungspotential aufweisen, sind mit einer Skizze prinzipiell dargestellt, solche, die nicht möglich sind, werden mit einer "0" gekennzeichnet. Lösungen, die nur mit hohem technischen Aufwand realisierbar scheinen, erhalten ein "X". Bei den mit einem "X" versehenen Lösungen handelt es sich um Lösungen, die mit Hilfe von elektrischen oder magnetischen Feldern die Rotationsbewegung der Partikel herbeiführen sollen. Lösungen, bei denen die Strömungsgeschwindigkeit zu Null gesetzt ist, die also auf der Streuwirkung des

Sichtrades und der unterschiedlichen Bremswirkung je nach Partikelgröße in ruhender Luft beruhen, führen zu einer Anreicherung des Sichtraumes mit feinen Partikeln, die nicht ausgetragen werden. Dies hat bei Kreislaufmahlanlagen eine Leistungsminde rung zur Folge. Die dargestellten Skizzen zeigen die bekannten Sichter, wie sie u. a. bei Höffl [5] katalogisiert sind, die rechts angegebenen Nummern geben die Zuordnung zu den Feldern des Schemas an:

- Spiralwindsichter 1.1, 7.1
- Zyklon 1.2
- Fingersichter 2.2
- Korbwindsichter 3.1
- Zick - Zack - Sichter 3.1
- Gegenstrom - Umlenksichter 3.1
- Streutellersichter 6.2, 7.2

Die Untersuchung der in [5] aufgeführten, aus der verfahrenstechnischen Forschung ableitbaren Bauformen ergab, daß mit der hier verfolgten Vorgehens-

weise ein vollständiges Schema erstellt wurde, das alle gängigen Bauformen enthält und darüber hinaus Anregungen zu weiteren Konstruktionsformen gibt. In der weitergehenden konstruktiven Ausführung werden für die Verwirklichung von Wirkkräften und Wirkbewegungen über 20 unterschiedliche Wirkträger gefunden, die hinsichtlich der im verfahrenstechnischen Prozeß verlangten Eigenschaften einer Bewertung nach VDI-Richtlinie 2225 unterworfen wurden. Obgleich in der Konzeptphase relativ wenig detaillierte Angaben über das Betriebsverhalten der einzelnen Komponenten vorlagen, gestattete eine Bewertung anhand spezifischer Kennzahlen wie Raumbedarf, Maschinenmassenbedarf, verwirklichtbare verfahrenstechnische Wirkgeschwindigkeiten usw. eine sichere Auswahl der Hauptkomponenten, die in weiteren konstruktiven Schritten optimiert wurden.

## 8. Zusammenfassung

Am Beispiel des Klassierprozesses wird die Anwendung der Konstruktionssystematik für den Bereich der mechanischen Verfahrenstechnik dargestellt. Ausgehend von einer Analyse des physikalischen Geschehens wird eine systematische Suche nach Konzeptvarianten aus der Kombination von Katalogen nach Roth [4] vorgenommen. Die Vorgehensweise wird am Beispiel der Konzeptvariante "**Windsichtung im Zentrifugalkraftfeld**" diskutiert. Es kann gezeigt werden, daß die bekannten Sichtmaschinen durch die Systematik dargestellt werden. Eine abschließende Bewertung ergibt als beste Lösung unter Berücksichtigung technischer Randbedingungen den Abweiseradsichter.

## Literatur

- [1] Rumpf, H. ; Kaiser, F.: Weiterentwicklung des Spiralwindsichters, CIT 1952 24. Jahrg. Nr. 3 S.129-135
- [2] Leschonski, K.; Bock, Th. : Die Bedeutung des Dispergierens und Dosierens bei Feinsttrennungen in Windsichtern. Proc. of the Eur. Symp. of Particle Technology 1980. Vol. B, S. 746-761, DECHEMA .

- [3] Koller , Rudolf: Konstruktionslehre für den Maschinenbau, 2. Auflage Springer-Verlag 1985
- [4] Roth , Karlheinz: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Springer-Verlag 1982
- [5] Höfl, Karl: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen, Springer-Verlag 1986.

# Konstruktion einer Schwingmühle zur simultanen Mahlung und chemischen Reaktion von Ferrosilicium

U. Bock

## Einleitung

Die Hydrochlorierung von metallisch verunreinigtem Silicium stellt einen wichtigen Zwischenschritt bei der Herstellung von hochreinem Silicium für die Halbleiter-, Solarzellen- und Glasfaserherstellung dar.

Das Rohsilicium wird durch carbothermische Reaktion von Siliciumdioxid gewonnen, das durch Hydrochlorierung zu Trichlorsilan umgesetzt wird. Dieses wird schließlich mit Wasserstoff zu polykristallinem Reinstsilicium weiterverarbeitet, worauf sich dann das Ziehen von Einkristallinen anschließt.

Die Hydrochlorierung von Ferrosilicium (FeSi) wird bisher in zwei Verfahrensschritten durchgeführt: In einem Mahlvorgang wird das FeSi zerkleinert und anschließend in einem Wirbelbett mit HCl zu Trichlorsilan umgesetzt. Während der Mahlung und des Transports ist ein Kontakt des FeSi mit Luftsauerstoff nicht auszuschließen. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß die Anfangsgeschwindigkeit der Reaktion mit steigender Kontaktzeit fällt. Aus Gründen der Rationalisierung und Energieeinsparung erscheint daher die Vereinigung der beiden Prozesse "Mahlen" und "Reagieren" in einer Reaktionsmühle sinnvoll.

## 1 Anforderungen

Bei der Konstruktion der Reaktionsmühle konnte nur zum Teil auf Erfahrungen im konventionellen Mühlenbau zurückgegriffen werden, da mit der Entwicklung dieser Mühle, in der während der Mahlung bei einer Temperatur bis zu 450 °C eine chemische Reaktion durchgeführt werden soll, Neuland betreten wird.

Als Bauartprinzip eignet sich dank ihrer speziellen Eigenschaften wie

- geschlossener Mahlraum
- Mehrfachbeanspruchung der Partikel und der Bruchstücke

- große Energiedichte

die Schwingmühle in besonderem Maße zur Verwirklichung der Konstruktion.

Schwingmühlen dienen i. a. zur Zerkleinerung fester mineralischer Rohstoffe und erreichen Feinheitsgrade bis unter 10 µm.

Da die Mühle zunächst als Prototyp zur Ermittlung verfahrenstechnischer Parameter und zur Erstellung reaktionskinetischer und maschinenbaulicher Berechnungsansätze dienen soll, wird sie in ihren Eigenschaften in möglichst weiten Grenzen einstellbar ausgeführt.

Konkret bedeutet dies, daß für Schwingmühlen wichtige Kenngrößen wie Drehzahl, Schwingform, Schwingkreisradius bzw. -amplitude und die Beschleunigung variabel sind und die erreichbaren Werte die der heute üblichen Mühlen bei weitem übertreffen.

Beispielsweise liegen übliche Werte für die Beschleunigung im Bereich bis 10 g; mit der Reaktionsmühle wurden bisher Beschleunigungen von 60 g erreicht, 100 g werden angestrebt. Ähnlich verhält es sich mit dem Schwingradius, der bei der Reaktionsmühle maximal 10 mm betragen soll, gegenüber heute üblichen Werten von 4 mm.

Aus der Aufgabe der Entwicklung einer Reaktionsmühle für nichtkatalytische Gas-Feststoffumsetzungen während der Mahlung resultieren folgende generellen Forderungen an die Mühle:

- Korrosionsbeständigkeit gegenüber HCl bei maximal 450 °C,
- Regelbare Mahlraumtemperatur (280 bis 450 °C) bei kleinen Gradienten im Mühlengefäß,
- Schwingbeschleunigung bis 60 g, möglichst bis 100 g,
- Schwingamplitude zwischen 1 und 10 mm,
- HCl-Querschnittsbelastung bis 1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>s,
- feststofffreier Gasaustrag,
- Messung von Drehzahl, Drehmoment, Beschleunigung und Temperatur.

## 2 Untersuchungen zum Antriebskonzept

Nach der Erstellung einer Anforderungsliste und der Funktionsstruktur /1/, die an dieser Stelle nicht behandelt werden sollen, folgte die Suche nach Lösungen für Teilfunktionen. Es wurden hydraulische und mechanische Antriebssysteme untersucht, wobei bei letzteren die Erzeugung exzentrisch geführter und freischwingender Bewegungen betrachtet wurden.

Ein hydraulischer Antrieb mit doppeltem Hubzylinder hat gegenüber mechanischen Versionen den Vorteil der guten Regelbarkeit. Amplitude und Frequenz sind getrennt voneinander einstellbar. Aufgrund des resultierenden großen Energiebedarfs und der hohen Investitionskosten wurde dieses Lösungsprinzip jedoch nicht weiterverfolgt.

Bei einem mechanischen Antrieb, der kostengünstiger zu erstellen ist, kann bei Verwendung zweier Unwuchtwellen und freischwingendem Mahlraum jede Schwingungsform zwischen translatorisch und rotatorisch eingestellt werden. Weiterhin ist durch die Verwendung von Federn, die als Energiespeicher wirken, der Leistungsbedarf des Antriebs geringer.

## 3 Beschreibung der verwirklichten Konstruktion

Für die in der Funktionsstruktur aufgezeigten Teilfunktionen wurden einzelne Lösungen entwickelt, die zusammengesetzt das im folgenden beschriebene Prüfstands-konzept (siehe Bild 3.1) darstellen:

Der Mahlbehälter (siehe auch Bild 3.2) besteht aus einem Hohlzylinder aus dem Werkstoff 1.4571. Er verfügt über zwei Deckelplatten aus demselben Werkstoff. Eine Platte ist mit vier Bohrungen versehen, die eine breitflächige Zuströmung des Reaktionsgases gestatten. Der Gasauslaß ist als Feststoffabscheider ausgebildet, der verhindert, daß mit dem Gasstrom Mahlgutteilchen ausgetragen werden.

Der Behälter wird mit Hilfe von zwei Flanschen, die der Gaszu- bzw. -abfuhr dienen, in dem schwingfähigen Gestell befestigt. Die Abdichtung des Mahlraums geschieht durch je eine Statotherm-Grafit-Dichtung, die Temperaturen bis 550 °C standhält und resistent gegen HCl ist.

Der Mahlbehälter wird als Einheit mit acht Dehnschrauben zwischen den Flanschen befestigt; das

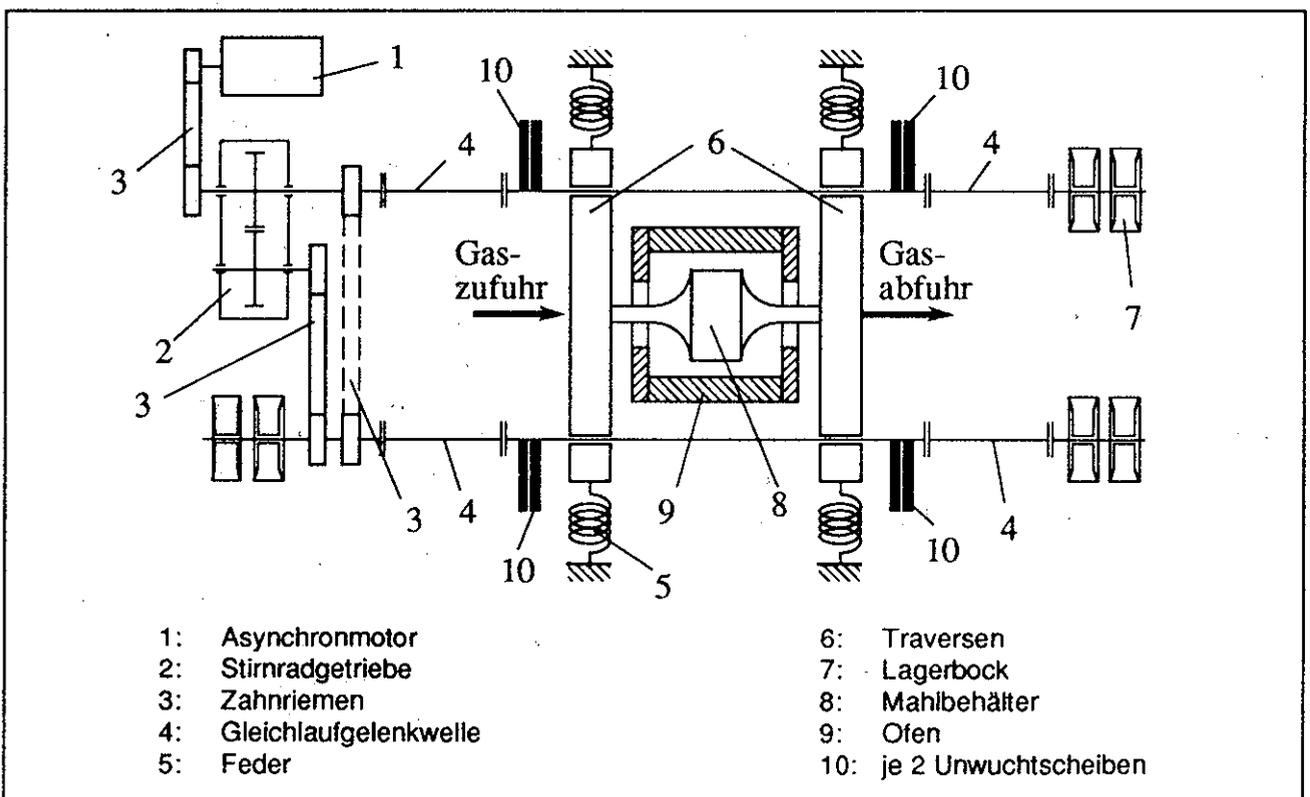


Bild 3.1: Prinzipskizze der Reaktionsmühle

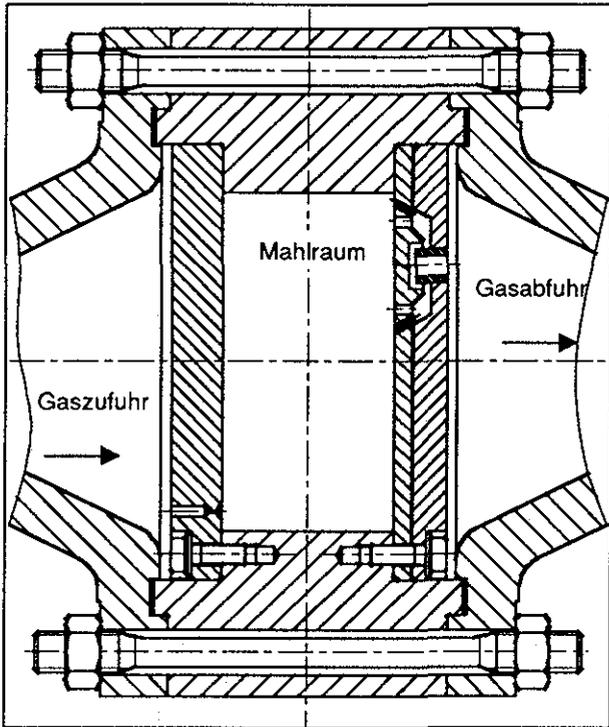


Bild 3.2: Schnitt durch den Mahlraum

Zusammenpressen der Dichtung um ein bestimmtes Maß gewährt die notwendige Dichtheit. Die Leitung des Gases vom feststehenden Fundament des Prüfstandes in den Flansch bzw. aus die-

sem heraus geschieht durch edelstahlummantelte Teflonschläuche. Da das Teflon nur bis 200 °C dauerhaft temperaturbeständig ist, muß das Gas, das mit bis zu 450 °C den Mahlraum verläßt, abgekühlt werden. Außerdem soll eine Wärmeleitung von den Flanschen in die Kastenprofile und somit zu den Lagern der Unwuchtwellen möglichst verhindert werden. Dies geschieht durch wasserdurchströmte Wärmetauscher.

Die federnde Aufhängung des Gestells in einer Rahmenkonstruktion ist in der Gesamtansicht des Prüfstandes (Bild 3.3) und in Bild 3.4 zu erkennen. In letzterer Abbildung ist außerdem eine der beiden Unwuchtwellen zu sehen. Jede der beiden Unwuchtwellen trägt vier Unwuchtscheiben, von denen jeweils zwei relativ zur Welle feststehen. Durch die Verdrehung der in Stufen verstellbaren Unwuchtscheiben gegen die feststehenden können verschiedene Unwuchtradien eingestellt werden. Unterschiedliche Unwuchtradien bewirken verschiedene Schwingkreisradien des Gestells und damit des Mahlraums. Das Konzept zweier Unwuchtwellen ermöglicht es, durch Gleich- bzw. Gegenlauf und Verstellen der Unwuchtscheiben alle Schwingungs-

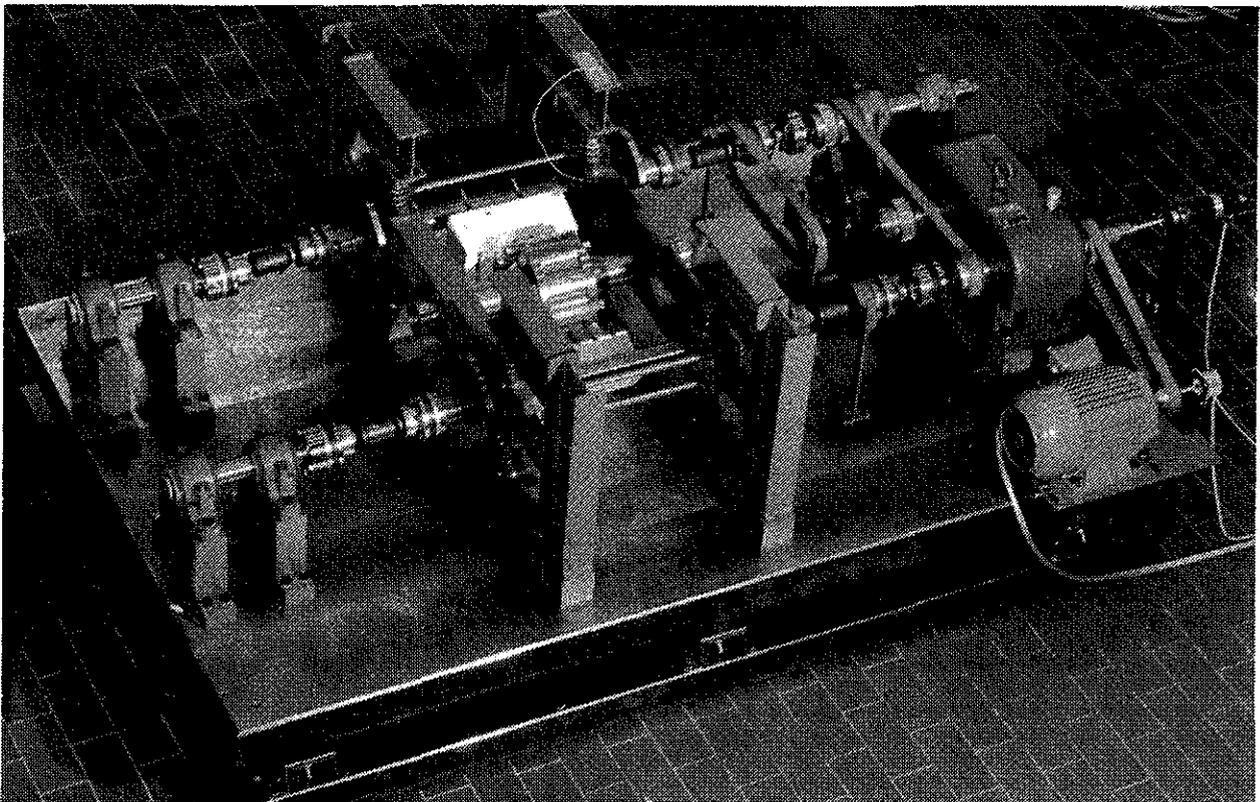


Bild 3.3: Ansicht des Prüfstandes

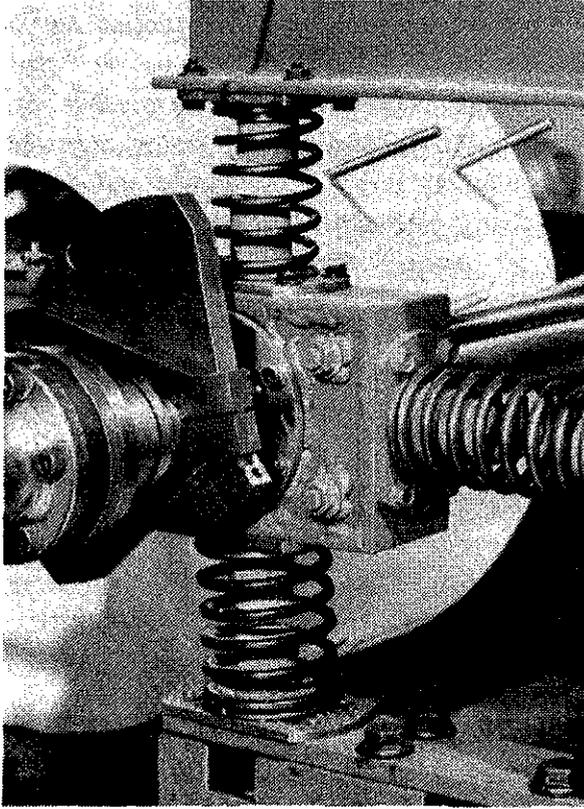


Bild 3.4: Federnde Aufhängung des Gestells

formen zwischen linear und kreisförmig zu erzeugen.

Die Einstellung von Gleich- bzw. Gegenlauf geschieht durch ein Verteilergetriebe, das aus einem Stirnradgetriebe mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:1, und zwei Zahnriemen, von denen jeweils nur einer im Einsatz ist, besteht.

Der Antrieb der Mühle erfolgt durch einen frequenzgeregelten Asynchronmotor mit einer Leistung von 7 kW. Es sind Drehzahlen von 0 bis  $6000 \text{ min}^{-1}$  einstellbar.

Die Beheizung der Mühle geschieht durch einen Ofen mit einer Leistung von 3,8 kW. Der Ofen steht wie der Antrieb auf der Fundamentplatte fest, und der Mahlbehälter schwingt im Ofen.

Die Messung der Drehzahl wird durch einen am Motorausgang angebrachten Tachogenerator ermöglicht.

Auf dem schwingenden Mühlengestell ist ein Triaxial-Beschleunigungsaufnehmer angebracht; über einen Ladungsverstärker erfolgt die Anzeige der Beschleunigung, wie auch die Anzeige der übrigen Signale, die von einem Meßverstärker aufbereitet werden, auf dem Bildschirm eines speziell ausgerüsteten PC.

Aus dem Beschleunigungssignal wird der jeweilige Schwingkreisradius bzw. die Amplitude der Schwingungen berechnet.

#### 4 Realisierte Kenngrößen

Bisher konnten sowohl bei rotatorischer als auch bei translatorischer Mahlbewegung Beschleunigungen bis  $65 \text{ g}$  verwirklicht werden. Bild 4.1 zeigt die Beschleunigung in  $\text{g}$  in Abhängigkeit von der Drehzahl für die verschiedenen Verstellwinkel der Unwuchtscheiben zueinander, also für verschiedene Unwuchtradien.

Bei maximalem Unwuchtradius werden Schwingkreisradien bis  $6 \text{ mm}$  erreicht. Um die geforderten großen Schwingwege zu erreichen, wird die Konstruktion im Hinblick auf Leichtbau weiterentwickelt; zunächst stehen jedoch Versuche zur Zerkleinerung und Reaktion in der Mühle auf dem Programm.

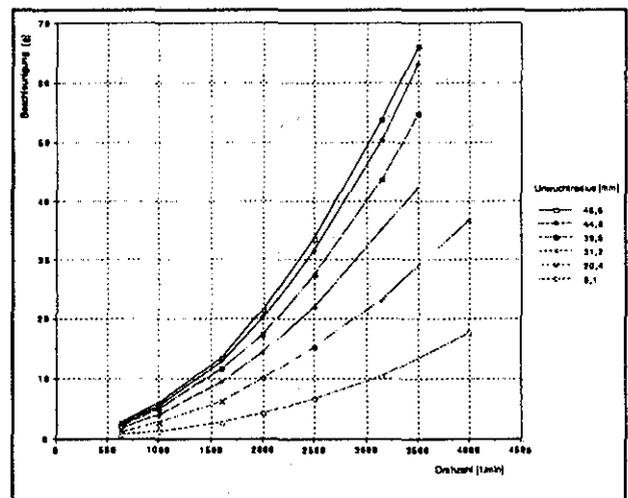


Bild 4.1: Beschleunigung als Funktion der Drehzahl

#### 5 Literatur

- /1/ Arbeitsbericht des Sonderforschungsbereichs 180: Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen bei besonderen mechanischen, thermischen oder chemischen Belastungen, Technische Universität Clausthal, August 1990

## Einsatz der 3D-Koordinatenmeßtechnik im Institut für Maschinenwesen

F. Rothe

*Seit Februar 1990 verfügt das Institut für Maschinenwesen über ein 3D-Koordinatenmeßgerät der Fa. ZEISS, Oberkochen (Bild 1). Dieses erlaubt nach einer rechnerischen Ausrichtung des Werkstücks die Messung einfacher und komplexer geometrischer Körper im Dialog- und CNC-Betrieb. Die aus Mitteln der Volkswagenstiftung finanzierte Maschine des Typs UMM 550 wird bereits im Rahmen des CIM-Labors in Forschung und Lehre eingesetzt.*

### 1. Einsatz von Koordinatenmeßgeräten in der industriellen Meßtechnik

Die ersten rechnergesteuerten Koordinatenmeßgeräte (KMG) wurden Mitte der 70er Jahre kommerziell eingesetzt. Seit dieser Zeit haben sie sich sowohl im Bereich der analytischen Meßtechnik als auch für Stichprobenprüfungen in der Serienproduktion durchgesetzt.

Zur Zeit werden noch 90 % aller KMG in separaten, meist klimatisierten Meßräumen eingesetzt. Endziel der Entwicklung ist die vollständige Integration von KMG in flexible Fertigungssysteme. Dabei werden hohe Anforderungen an die Meßmaschine hinsichtlich Meßgenauigkeit, Meßdatenverfügbarkeit und Nutzungsgrad gestellt. Entsprechend sind

- die Umgebung der KMG (Temperatur, Feuchtigkeit, Staub, Ölnebel, Schwingungen),
- der Zustand der anzuliefernden Werkstücke (Reinigung, Trocknung, Temperatur),
- der Materialfluß (Werkstückwechsel, Aufspannung, Tasterwechsel) und
- der Informationsfluß (Betriebsmodus, Datenrücklauf)

auf diese Anforderungen abzustimmen. Aufgabe der universitären Forschung und industriellen Entwicklung ist es daher, den scheinbaren Widerspruch von geforderter Meßgenauigkeit und vorhandener Industrieumgebung aufzuheben.

Das Institut für Maschinenwesen will die Koordinatenmeßtechnik im Rahmen bestehender Forschungsschwerpunkte z. T. erstmals einsetzen und damit neue Anwendungsgebiete erschließen.

### 2. Vorteile der Koordinatenmeßgeräte

Moderne Produktionssmethoden, speziell die Anwendung CNC-gesteuerter Werkzeugmaschinen mit ihrer Fähigkeit, beliebige Konturen in engen Toleranzbereichen zu fertigen, fordern bezüglich Genauigkeit und entsprechend der Komplexität der Meßaufgabe adäquate Techniken der Qualitätsprüfung. Die KMG erlauben nicht nur einzelne qualitative bzw. einfache quantitative Aussagen, sondern können gemessene Werte rechnerisch miteinander in Beziehung setzen. Dies erlaubt z. B. Aussagen, ob ein Ausschussteil noch nachzubessern ist oder ob komplexe Form- und Lagetoleranzen eingehalten werden. Die wichtigsten Vorteile eines CNC-KMG gegenüber konventionellen Meßmitteln sind:



**Bild 1:** ZEISS-Koordinatenmeßmaschine UMM 550 mit Drehtisch, alphanumerischem Bedienpult und Steuerschrank

1. **Meßrepertoire**  
Alle Maß-, Form- und Lageabweichungen können ermittelt werden. Lagetoleranzen, Maße, die miteinander in Verbindung stehen und Formtoleranzen können mit dem KMG wirtschaftlicher und mit geringerer Meßunsicherheit geprüft werden.
2. **Genauigkeit**  
Die Wiederholgenauigkeit der am Institut für Maschinenwesen stehenden UMM 550 beträgt bei einer Meßlänge von 200 mm nur 2 µm. Die Meßunsicherheit ist sehr gering, weil ein Umspannen während des Meßvorgangs nur selten notwendig ist. Durch automatisierte Meßabläufe können Bedienungsfehler minimiert werden.
3. **Flexibilität**  
Es können ohne große Umbauten verschiedenste Werkstücke nacheinander geprüft werden. Es ist dabei unwichtig, ob vorher ein Einzelteil per Hand vermessen wurde oder eine ganze Serie mittels eines CNC-Programms. Spannvorrichtungen werden nur zur Fixierung des Werkstücks auf dem Meßtisch gebraucht oder um bei Serienmessungen dieselbe Ortslage für jedes Werkstück zu gewährleisten.
4. **Meßgeschwindigkeit**  
Durch automatischen Meßablauf erhält man schnell die gewünschten Meßdaten. Die Qualitätssicherung "bremst" die Fertigung nicht.
5. **Dokumentation**  
Der Rechner protokolliert jedes Meßergebnis in einem Meßprotokoll. Zudem können bestimmte Meßergebnisse wie Formabweichungen auch graphisch dargestellt werden. Diese Protokolle sind wichtige und z. T. vom Auftraggeber (z. B. in der Automobilindustrie) vorgeschriebene Nachweise bei Zulieferarbeiten.
6. **Universalität**  
Die Standardsoftware löst die häufigsten Probleme der 3D-Meßtechnik. Für spezifischere Meßaufgaben stehen Sonderprogramme zur Verfügung, z. B. für - Statistische Prozeßkontrolle, Messung von Freiformflächen, Messung von Zahnrädern und andere.
7. **Störeinflußfassung**  
Durch die Analyse der Meßergebnisse können systematisch auftretende Abweichungen wie Werkzeugverschleiß, thermische Spindel- und

Maschinenbettverformung oder Änderung der Werkstoffeigenschaften schnell ermittelt und an die Fertigung weitergegeben werden.

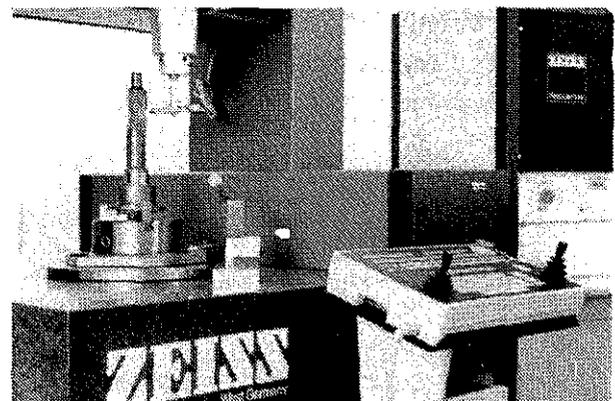
### 3. Prinzip der Koordinatenmeßgeräte

Alle zur Zeit am Markt befindlichen KMG sind im Prinzip wie eine Werkzeugmaschine aufgebaut. Das Meßgerät hat drei senkrecht zueinander stehende Achsen mit integrierten Längenmeßsystemen, die zusammen ein kartesisches Koordinatensystem aufspannen. An die Stelle des Werkzeugs tritt ein Tastkopf, mit dem innerhalb des Gerätemeßbereichs die Koordinaten jedes beliebigen Punktes im Raum nach einer Antastung erfaßt werden können (Bild 2). Diese Koordinatenwerte werden in einem angeschlossenen Rechner weiterverarbeitet.

Für die Messung rotations-symmetrischer oder prismatischer Werkstücke wird am Institut zusätzlich ein Drehtisch mit Winkelmeßsystemen verwendet werden, so daß insgesamt vier Achsen zur Verfügung stehen.

Das messende Tastsystem der UMM 550 besteht aus drei übereinander angeordneten Federparallelogrammen mit einem Bewegungsbereich von  $\pm 2.5$  mm in Richtung der drei Achsen X, Y und Z. Sie ermöglichen somit eine Parallelverstellung des Tasteraufnehmers um  $\pm 2,5$  mm in der entsprechenden Achsrichtung. Für jede Bewegungsrichtung ist ein induktiver Wegaufnehmer installiert.

Die automatisch wirkende Tariereinrichtung kompensiert das Gewicht aller in den Aufnahmen befestigten Taster (maximal zulässige Masse einer Tasteranordnung: 600 g). Tauchspulen erzeugen elek-



**Bild 2:** Vermessen einer Zahnwellenflanke mit Hilfe einer für diesen Zweck besonders geeigneten Taststiftkombination

tromagnetisch die Meßkraft in vorwählbaren Stufen. Die Befestigung der Tasteranordnungen an den Meßkopf der Maschine erfolgt über einen Klemmring oder über eine magnetisch wirkende Tasterwechselfaufnahme. Letztere ist für automatische Tasterwechsel unerlässlich.

**4. Rechner und Steuerung**

Zur Kontrolle der KMG stehen insgesamt drei Rechner zur Verfügung. Diese teilen sich die Aufgaben der Tastkopffregelung, Meßprogrammsteuerung und Koordination der Arbeit im CIM-Umfeld.

**4.1 Standardsteuerung**

Die Standardsteuerung ist in einem separaten Steuerschrank untergebracht (Bild 1). Ihre Aufgabe ist es, die Regelung des KMG mit der notwendigen Schnelligkeit vorzunehmen. In Bild 3 ist die Steuerung als innerste Schale um die eigentliche Meßmaschine gelegt, da sie direkt und weitgehend automatisch Grundfunktionen des KMG übernimmt.

**4.2 Tischrechner**

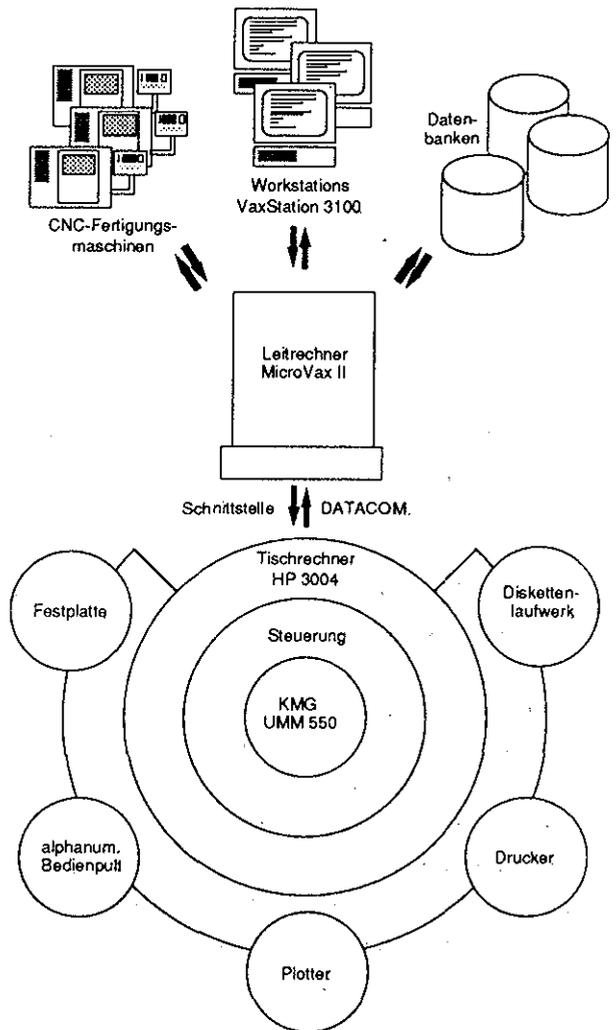
Der Tischrechner mit Winchester- sowie Diskettenlaufwerk und Graphikdrucker ist die Schnittstelle zwischen Mensch und KMG. Über ihn werden die einzelnen Programmpakete gestartet und die jeweiligen Meßprogramme bedient.

Darüberhinaus rechnet er in die Meßwerte die systematischen, gerätespezifischen Abmaße ein. Diese wurden für die Einzelteile im Herstellerwerk mittels hochgenauer Meßmittel (z. B. Laserinterferometer) und für das Gesamtsystem nach der Montage durch Endmaße ermittelt.

**4.3 Leitrechner**

Der Leitrechner hat die Aufgabe, das KMG in flexible Fertigungssysteme zu integrieren, das heißt konkret:

- Bereitstellung von Werkstückdaten, die bereits schon anderweitig (z. B. im CAD-System) eingegeben wurden.
- Bereitstellung von Ressourcen zur Meßwertauswertung (z. B. Rechnerkapazität und Statistik-



**Bild 3:** Modell der Komponenten des Koordinatenmeßsystems im Institut für Maschinenwesen

software) und Datenspeicherung (z. B. Festplattenkapazität und Datenbanksystem).

- Bereitstellung von Informationen zum Fertigungsprozeß (z. B. welches Werkstück soll als nächstes vermessen werden, wo liegt es, wo soll es nachgearbeitet werden? Wieviele Taster eines Typs stehen noch zur Verfügung, wo kann man sie nachbestellen, in welchen Taststiftkonfigurationen werden sie verwendet?)

Diese Integration bereitet in der Regel die meisten Probleme im CIM-Umfeld.

Das KMG am Institut für Maschinenwesen ist über das von ZEISS vertriebene Programmpaket DATA-COM mit dem Leitrechner verbunden und erlaubt daher einen Datenaustausch zwischen KMG und der CIM-Umgebung, Datenbank-Applikationen und anderen Rechnern.

## 5. Einsatzgebiete der Koordinatenmeßmaschine

Die ZEISS UMM 550 wird am Institut für Forschung, Lehre und im täglichen Werkstattbetrieb eingesetzt. Im Beitrag von Dipl.-Ing. Prengemann wird bereits auf das Gebiet der Lehre im Bereich CIM eingegangen, so daß an dieser Stelle die Forschungsaktivitäten eingehender betrachtet werden. Sinnvoll ist hierbei die Unterscheidung von Themen, in der die Koordinatenmeßtechnik selbst Gegenstand der Forschung ist, und solchen Aktivitäten, in denen sie als Werkzeug dient.

### 5.1 Koordinatenmeßtechnik als Gegenstand der Forschung

Zu diesem Gebiet gehören die internationalen Normungsbestrebung im Rahmen des STEP-Programms, in dem versucht wird, für die bei der Vernetzung unterschiedlicher Maschinen und Aufgaben auftretenden Daten, einheitliche Schnittstellen zu definieren und den Datenfluß zu koordinieren. In diesem Umfeld ist natürlich auch eine Koordinatenmeßmaschine zu betrachten (Stichwort CAQ = Computer Aided Quality Assurance). Fragen, wie z. B. die Kopplung zwischen CAD und der jeweiligen Meßmaschine, sind zur Zeit nur als Insellösungen vorhanden, d. h. nicht jede Meßmaschine kann mit jedem CAD-System Daten austauschen.

Ebenfalls in diesen Bereich gehören Probleme der Toleranzdefinition und -kontrolle. Die meisten Form- und Lagetoleranzen wurden genormt, als die Koordinatenmeßmaschinen noch nicht auf dem Markt waren, die Belange und Möglichkeiten der Koordinatenmeßtechnik also noch nicht berücksichtigt werden konnten. Hier stellen sich u. a. folgende Fragen:

- Wie genau müssen bei der Überprüfung von Form- und Lagetoleranzen Bezugsflächen von dem KMG eingemessen werden?
- Führen verschiedene Meßstrategien zu unterschiedlichen Ergebnissen? Gibt es ein besonders erfolgreiches Verfahren?
- Sollte man ein anderes, der Koordinatenmeßtechnik besser angepaßtes Toleranzsystem einführen?

### 5.2 Koordinatenmeßtechnik als Werkzeug der Forschung

Eine ähnliche Frage, wie die letzte oben gestellte, führt zu einem Forschungsprojekt, das das Toleranzsystem für Zahnwellen verbessern soll. Bisher basieren alle Zahnwellennormen auf Zahnradnormen. Die anders gearteten Verhältnisse und Beanspruchungen werden dabei natürlich nicht berücksichtigt. So lassen sich z. B. Zahnwellen, die deutlich innerhalb vorgegebener Toleranzen liegen, unter Umständen nicht montieren, da die für Laufverzahnung unkritischeren Teilungsfehler nicht genügend berücksichtigt werden.

Ein benachbartes Projekt untersucht das Verschleißverhalten von Zahnwellen-Verbindungen. Hierbei sollen die Zahnflanken von Welle und Nabe zunächst im fabriktneuen Zustand und anschließend in bestimmten Intervallen bis zum Versagen des Bauteils vermessen werden. Die Daten werden für alle vermessenen Zahnwellen in eine Datenbank eingelesen und später statistisch in Abhängigkeit von den verschiedenen Einflußparametern ausgewertet.

Im Gebiet der Erforschung von Zugmitteltrieben sollen mit der Meßmaschine plastische, d. h. bleibende Verformungen gegenüber einem jungfräulichen Bauteil nach Ort und Betrag erforscht werden. Auch hierbei werden Proben vor und nach der Belastung vermessen.

## 6. Ausblick

Nachdem die ersten Schulungen in Oberkochen besucht und erste Erfahrungen mit dem KMG gemacht wurden, zeigt sich, daß die Installation einer leistungsstarken Klimaanlage angeraten ist, da diese erst die hohe Meßgenauigkeit der KMG voll auszunutzen ermöglicht.

Für die effiziente Nutzung der Meßmaschine für mehrere Projekte ist eine Tasterwechseleinrichtung notwendig. Bisher müssen die für die verschiedenen Anwendungen benötigten Spezialtaster bei jedem Start neu kalibriert und eingemessen werden. Dies kostet nicht nur Zeit, sondern relativiert auch Meßergebnisse, die über einen längeren Zeitraum zusammengetragen werden.

## Rechnergesteuerter Mühlenprüfstand

G. Deppermann

*Im Rahmen der Forschungsarbeiten des SFB 180 ("Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen unter besonderen mechanischen, thermischen und chemischen Belastungen") entstand am IMW ein Prüfstand, der meßtechnische Untersuchungen an Feinprallmühlen gestattet.*

### 1. Einleitung

Die Forderung seitens der Verfahrenstechnik nach höheren Stoßgeschwindigkeiten beim Zerkleinerungsprozeß und damit höheren Drehzahlen bei den Prallmühlen erfordert die meßtechnische Untersuchung der bislang gebauten Rotoren in diesen Maschinen. Dies ist nun erstmals mit dem gebauten Prüfstand möglich.

Da hierbei primär die Beanspruchungen infolge der Fliehkraftwirkung sowie das Eigenschwingverhalten neben den thermodynamischen Randbedingungen im Mahlgehäuse interessiert, wurde bewußt

ein Betrieb bei verschiedenen Drehzahlen im Leerlauf, d.h., ohne Mahlgut vorgesehen. Dies ermöglicht auch die Bestimmung des Leistungsaufwandes für den reinen Luftdurchsatz, Antriebs- und Reibungsverluste, etc. Die komplexe Gestaltung eines Mahlrotors bringt zwei wesentliche Probleme mit sich, die bei derartigen Messungen auftreten: zum einen muß man sehr viele Meßstellen am Rotor applizieren, zum anderen sind deren Signale auch bei recht hohen Drehzahlen von rotierenden auf nicht rotierende Teile zu übertragen. Außerdem sind solche Untersuchungen reproduzierbar zu gestalten, um sowohl Plausibilitätskontrollen durch Mehrfachmessungen als auch Vergleiche - z.B. zwischen verschiedenen Rotoren für einen Mühlentyp - anstellen zu können.

Unter diesen Gesichtspunkten ist die Konzeption des Prüfstandaufbaus zu betrachten, der in **Bild 1** zu sehen ist.

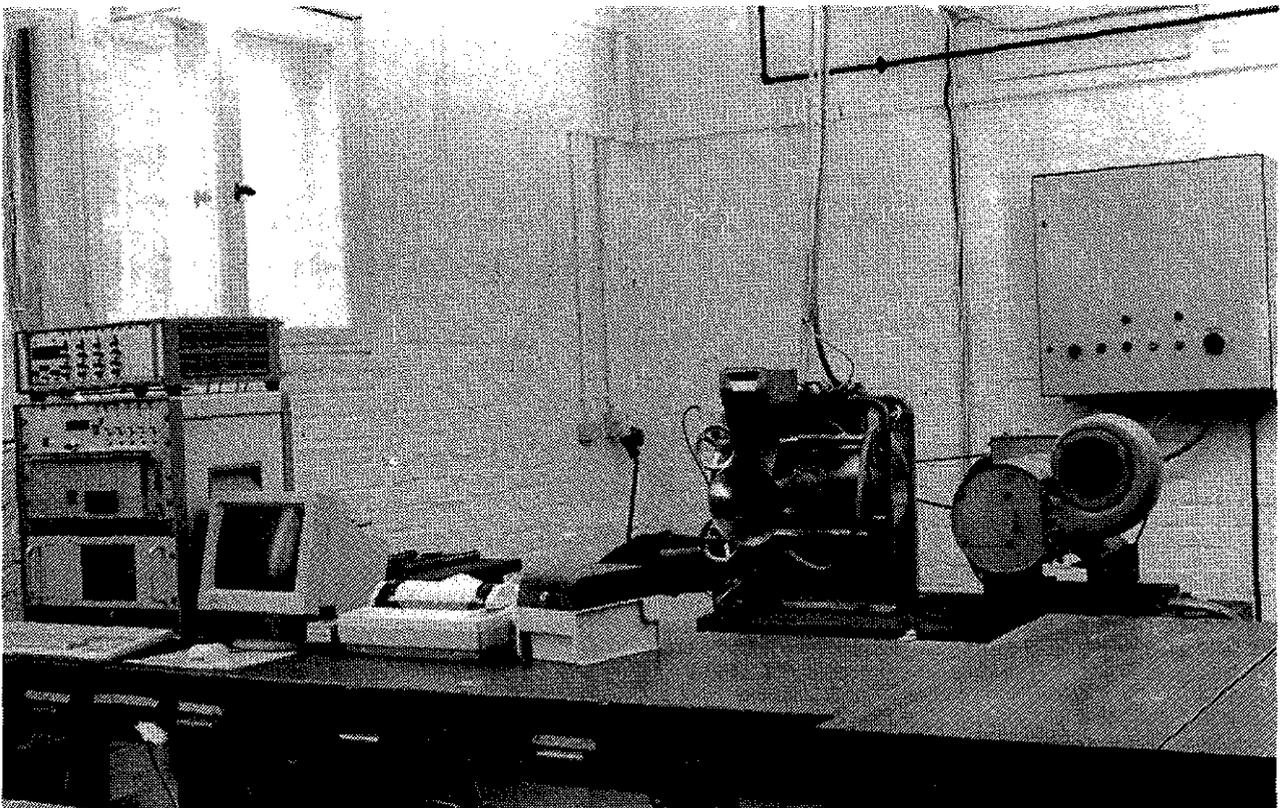


Bild 1: Gesamtansicht des Mühlenprüfstands mit Meßperipherie

## 2. Aufbau des Prüfstands

Als Prüfobjekt diente eine Universalmühle (Condux Typ 350 mit Spiralgehäuse; Edelstahl), wahlweise mit einem Gebläse- bzw. einem Stif rotor bestückbar. In Abänderung des Originalzustandes wurden folgende Modifikationen vorgenommen (/1/):

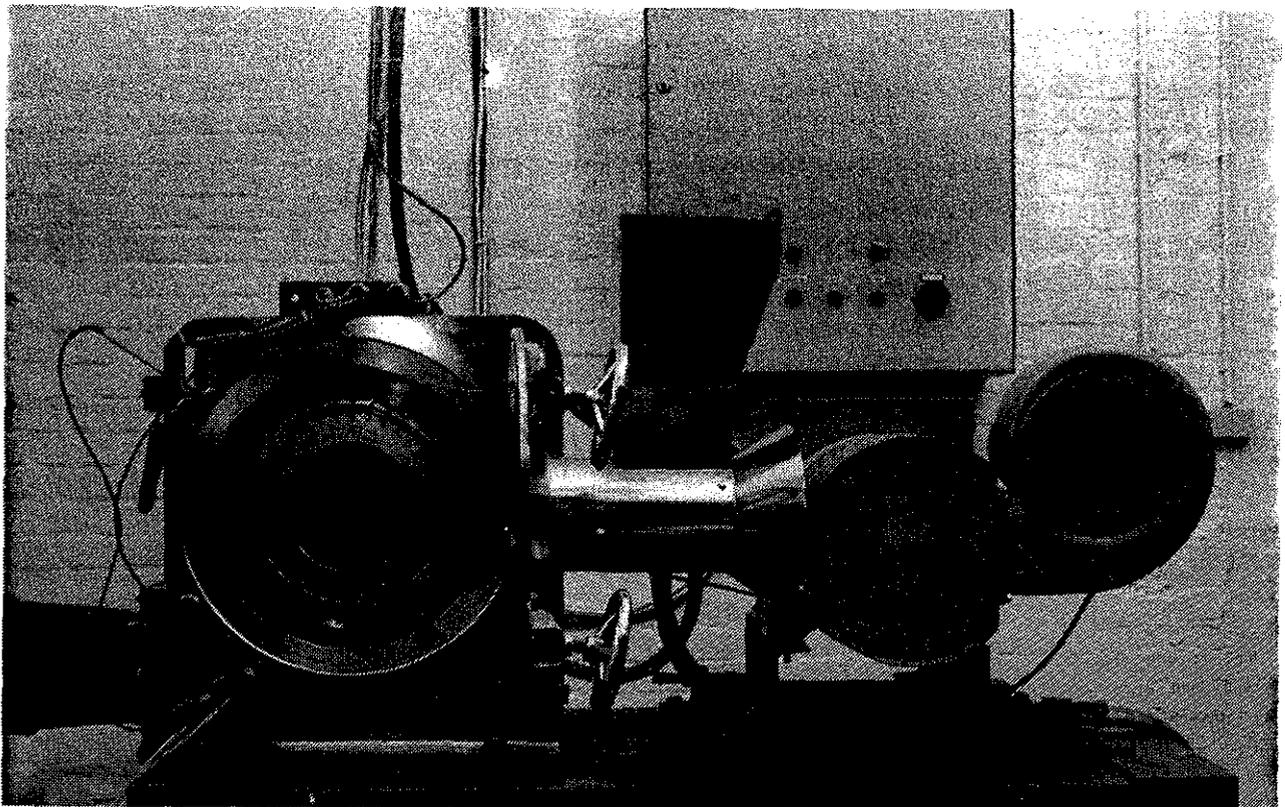
- Antrieb durch einen geregelten Gleichstrommotor (Nennleistung 18 kW, fremdbelüftet) mit einem Poly-V-Keilrippenriemen
- Hohlbohrung in der Welle mit einem Durchmesser von 15 mm
- Anflanschung einer Schleifringübertragereinheit am rotorabgewandten Wellenende
- Montage eines 16-poligen Rotorsteckers in der Wellen-Hutmutter (für die Rotorbefestigung); die Hutmutter wurde hierfür aufgesägt
- Anbringung zweier Druckschalter an der Türseite des Mühlengehäuses, davon einer in Kombination mit einer mechanischen Tür-Verriegelung durch einen pneumatischen Zylinder

Mühle und Antriebsmotor sind gemeinsam auf ei-

nem *Gußfundament* (Masse ca. 1000 kg) montiert, welches auf Schwingungsdämpfer-Füßen steht. Die angesaugte Raumluft wird durch das spiralförmige Gehäuse seitlich abgeblasen und gelangt über einen 6 m langen *Spezialschlauch* zur Geräuschdämpfung (10 mm Wandstärke, drahtverstärkter Schaumstoff, Nennweite 180 mm) an anderer Stelle wieder in den Raum oder auch ins Freie.

Die Rotorbeanspruchung und das Drehmoment werden mit Dehnungsmeßstreifen ("DMS") ermittelt, die überwiegend als Vollbrücken (Verschaltung nach Wheatstone) an verschiedenen Stellen angebracht sind (s. **Bild 2**); dadurch erzeugen diese bei Anlegung einer Speisespannung aufgrund der dehnungsproportionalen Widerstandsänderung eine elektrische Brückenspannung (ohne Beeinträchtigung durch Wärmeeinflüsse!), aus der sich die mechanische Bauteilspannung errechnen läßt.

Alle Meßstreifen sind mit einem Einkomponentenkleber aufgeklebt und mit Silikonkautschukmasse abgedeckt. Über Lötstützpunkte bzw. Kupferlitzen



**Bild 2:** Frontansicht des Mühlenprüfstands mit aufgeklappter Tür und beklebtem Gebläserotor

werden Versorgungs- bzw. Meßsignale aller Brücken weitergeleitet und am (*Rotor*-)Stecker (s.o.) gebündelt. Die zugehörige *Buchse* ist fest in der Welle verschraubt und gibt die Signale durch in der Wellenbohrung befindliche Kabel an einen *Schleifring* (s.o.) weiter. Kabel und Stecker sind mit Klebeband auf dem Rotor fixiert.

Durch die Begrenzung des Schleifrings bzw. Steckers auf 16 Kanäle bzw. Pole lassen sich allerdings nur vier Vollbrücken-Signale (in Vierleiterschaltung) übertragen; sind mehr als vier Meßstellen von Interesse, müssen deren Brücken-Zuleitungen im Wechsel am Rotorstecker angelötet werden.

An den Schleifringen liegen *Silber-Bandbürsten* an, von denen aus die Signale über geschirmte Leitungen zu der Aufbereitungselektronik gelangen. Um die Bürsten nicht unnötig zu verschleifen, befindet sich der gesamte Schleifringübertrager in einem druckluftgekühlten Gehäuse; zudem sind die Bandbürsten grundsätzlich abgeklappt und werden nur während der eigentlichen Meßzeit pneumatisch angelegt.

Neben den Bauteilspannungen werden außerdem die Temperatur im Mahraum (Platin-Widerstandsthermofühler), ebenso der Druck dort (DMS-Druckmembran), ferner die Gehäuse-/Fundamentalschwingungen (Piezoelektrischer Triaxialbeschleunigungsaufnehmer) und die Drehzahl der Mühlenwelle (Lichtschranke mit Fächerscheibe) gemessen.

Innerhalb der Signalaufbereitung (vgl. Bild 3) erfolgt zunächst eine Verstärkung der überwiegend analogen Spannungswerte durch *Meßverstärker*, die gleichzeitig die Brückenversorgungsspannung liefern. Nach einer *Analog-Digital*-("AD-") *Wandlung* speichert sie ein *Personal-Computer* ("PC") schließlich auf seinen *Festplattenspeicher*. Lediglich das Drehzahlsignal liegt prinzipbedingt bereits in digitaler Form vor und wird direkt von einem speziellen *Zeit-/Zähler-/Impuls-Modul* erfaßt. Der PC ist letztendlich für den gesamten Meßablauf verantwortlich bzw. gestattet mittels eines geeigneten *Programmes* erst das vollautomatische Durchmessen eines Rotors; hierbei werden die Meßstellen ebenfalls automatisch kalibriert.

Eine Messung kann über einen beliebigen Drehzahlbereich erfolgen; die gewünschten Drehzahlwerte sind dazu vorher in eine entsprechende Datei einzutragen. Ebenso lassen sich aber auch über die Rechnertastatur Drehzahlen ansteuern, die Schütze schalten und damit Sicherheitsfunktionen bedienen bzw. gezielte Einzelmessungen durchführen.

Um eine geeignete *Steuerspannung* für den Antriebsmotor zu erzeugen und das Schalten verschiedener *Schütze* (Sicherheitsfunktionen bei Störungen, Motor-Stillstand) sowie *elektrischer Pneumatikventile* (mechanische Türverriegelung durch Pneumatikzylinder (s.o.), Anlegen und Abklappen der Silber-Bandbürsten) zu ermöglichen, ist dem PC eine *speicherprogrammierbare Steuerung* ("SPS") zur Seite gestellt, die - über eine Verdrahtungseinheit mit Spezialkabel, eine Einsteckkarte im PC und entsprechende Software mit diesem gekoppelt - jene Funktionen übernimmt. Sämtliche Schütze, Ventile und zugehörige Drosseln, die SPS sowie alle elektrischen Schalter und Sicherungen befinden sich in einem *Schaltschrank*, dessen Kontrolleuchten auf der Frontseite für den Benutzer gut sichtbar den momentanen Betriebszustand anzeigen.

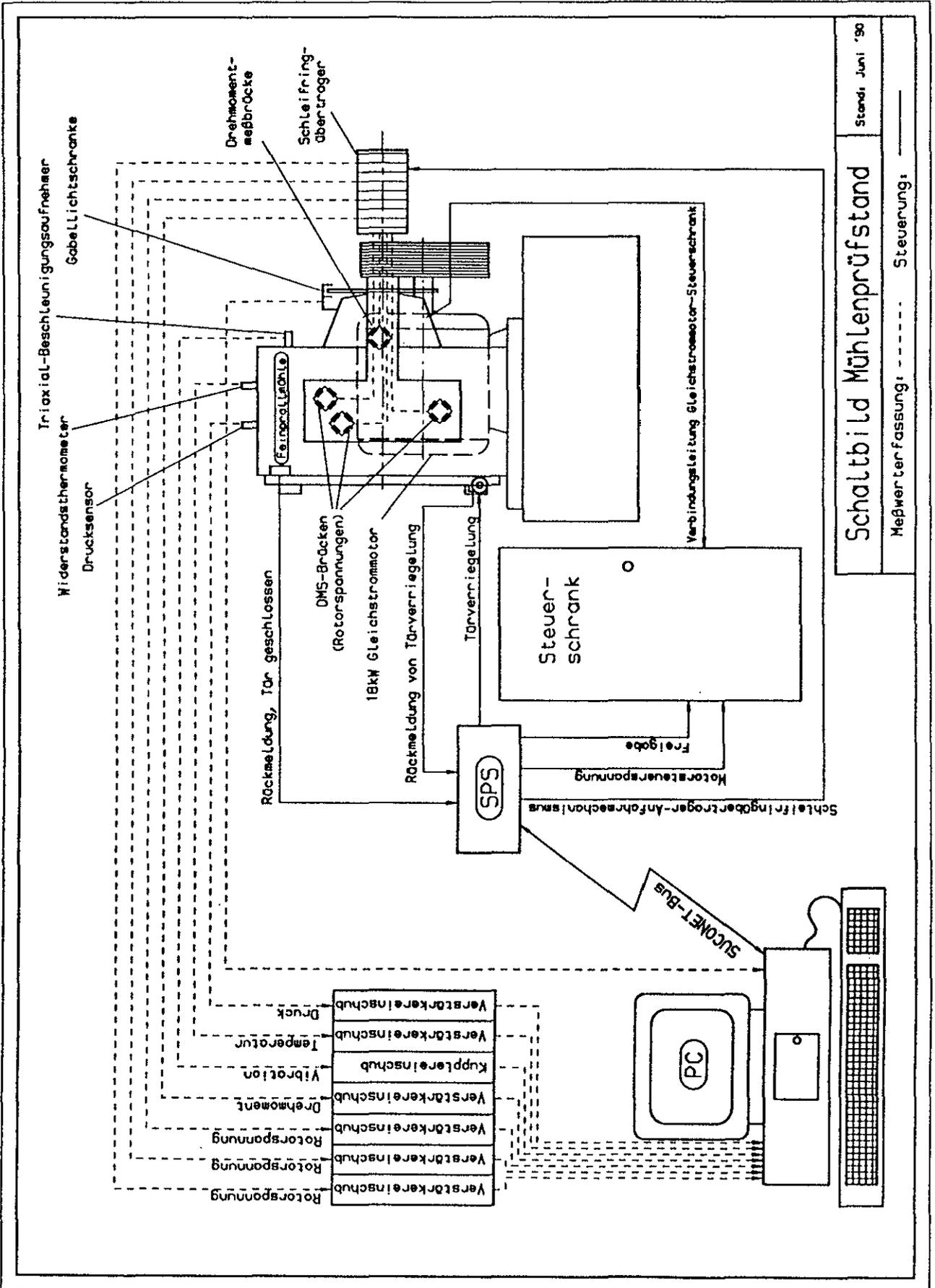
Die ebenfalls vorn angebrachten Druckschalterfunktionen sind auch vom PC aus über Tastendruck ausübbar.

Der Messende kann somit sämtliche Bedienfunktionen vom Rechner aus in hinreichendem Sicherheitsabstand zur Mühle ausüben; er kann aber auch bei einer Fehlreaktion des Rechners (Programmabsturz o.ä.) die entscheidenden Schalter zum Herunterfahren des Prüfstandes direkt am Schaltschrank betätigen.

Für Testzwecke läßt sich die Mühle auch ohne PC über ein reines SPS-Programm bei beliebigen Drehzahlen (Drehpotentiometer) fahren; eine Messung erfolgt in diesem Fall nicht.

### 3. Ablauf von Messungen

Bei menügesteuertem Ablauf besteht für den Benutzer die Möglichkeit, entweder gezielt einzelne



Schaltbild Mühlenprüfstand  
 Meßwertfassung: ..... Steuerung: \_\_\_\_\_  
 Stand: Juni '90

Bild 3: Schaltbild des Prüfstands (schematisch) nach /2/

Drehzahlen anzufahren und dabei zu messen oder eine bestimmte Reihe von Drehzahlwerten vom Rechner sukzessive anfahren und messen zu lassen. In diesem Fall sind Anfangs- bzw. Enddrehzahl und die gewünschte Differenz zwischen zwei Drehzahlschritten durch den Bediener einzugeben; anschließend verfährt die automatische Prüfstandssteuerung nach folgendem Muster (/2/):

- 1) Betätigung von Pneumatikventil I; dadurch mechanische Verriegelung der Tür. Überprüfung durch Endkontakt (jeweils SPS)
- 2) Schließen von Schütz II; dadurch Anlegen der Steuerspannung an den Motor (SPS)
- 3) Abfrage der Meßverstärker von Druck- und Temperaturwerten bei Drehzahl "Null" (PC)
- 4) Schrittweise Annäherung an die Sollvorgabe des ersten Drehzahlwertes (PC) in Form von binären Signalen an die SPS; dort Umwandlung in eine analoge Spannung, die nun am Regler des Steuerschranks anliegt
- 5) Langsames Hochfahren des Motors (Regler/Motorsteuerung), dabei Rückmeldung des Drehzahlsignals an den PC (Lichtschrankengeber) und evtl. Korrektur der schrittweisen Annäherung (PC)
- 6) Nach Erreichen einer - vorher eingestellten - Toleranz zwischen Soll- und Istwert der Drehzahl ca. 5-minütiges Halten der Drehzahl, um ein thermodynamisches Gleichgewicht zu erlangen (PC)
- 7) Anlegen der Schleif-Bandbürsten mittels Betätigung des Pneumatikventils II (SPS)
- 8) Abfragen aller Meßkanäle einschließlich Druck-, Temperatur- und Beschleunigungswerte sowie Speicherung (PC)
- 9) Abklappen der Schleif-Bandbürsten (SPS)
- 10) Wiederholung der Schritte 6 - 11, bis die Enddrehzahl erreicht ist; Abbremsen des Motors auf Drehzahl "Null" (SPS, Regler)

Die gespeicherten Daten befinden sich im Anschluß an eine Messung in bestimmten Dateien

(ASCII-Format) auf der Festplatte des Rechners und stehen dann für eine Auswertung zur Verfügung.

#### 4. Ergebnisse

Erste Messungen nach /3/ bestätigen die Resultate bereits durchgeführter Finite-Elemente-Rechnungen (s. /4/).

Anhand von vier ausgewählten Bauteilen (Schlagleiste, Haltestab, Nabe, Gegenring) eines Gebläserotors (s. Bild 4) läßt sich recht eindeutig der charakteristische parabolische Spannungsverlauf über der Drehzahl erkennen, was auf die Zentrifugalkraftbelastung zurückzuführen ist. Die Betrachtung der absoluten Spannungshöhe belegt allerdings ebenso eindeutig, daß die Verwendung rostfreier Stähle bzw. anderer Edelstähle (z.B. im Lebensmittel- oder Pharmaziebereich) keine besonders hohe Bauteilsicherheit gegen plastische Verformung bedeutet.

Die progressive Tendenz der Kurven verbietet sogar den Einsatz solcher Rotoren bei höheren Drehzahlen selbst dann, wenn hochfeste Stähle eingesetzt werden. Insbesondere die Aufbiegungen verschiedener Rotorelemente führen mit z. T. starken Kerbeeinflüssen zu hohen Spannungsspitzen, die sich nur mit durchgreifenden konstruktiven Umgestaltungen vermeiden lassen.

Untersuchungen über Optimierungen an herkömmlichen Rotoren konnten zwar theoretisch Spannungssenkungen um ca. 20...25% erbringen; die Herstellung würde jedoch mit erheblich höheren Fertigungskosten einhergehen.

Hinzu kommt die Tatsache, daß im vorliegenden Fall die Umfangsgeschwindigkeit bei etwa 110 m/sec liegt, was ungefähr der Hälfte des von der Verfahrenstechnik verlangten Wertes entspricht. Eine Verdopplung der Umfangsgeschwindigkeit bedeutet aber ein Vervierfachung der Zentrifugalkräfte und damit der Beanspruchungen, so daß hier grundsätzlich andere Rotoren zum Einsatz kommen müssen.

Die im Zusammenhang damit stehenden Forschungsarbeiten haben das Ziel, neuartige und be-

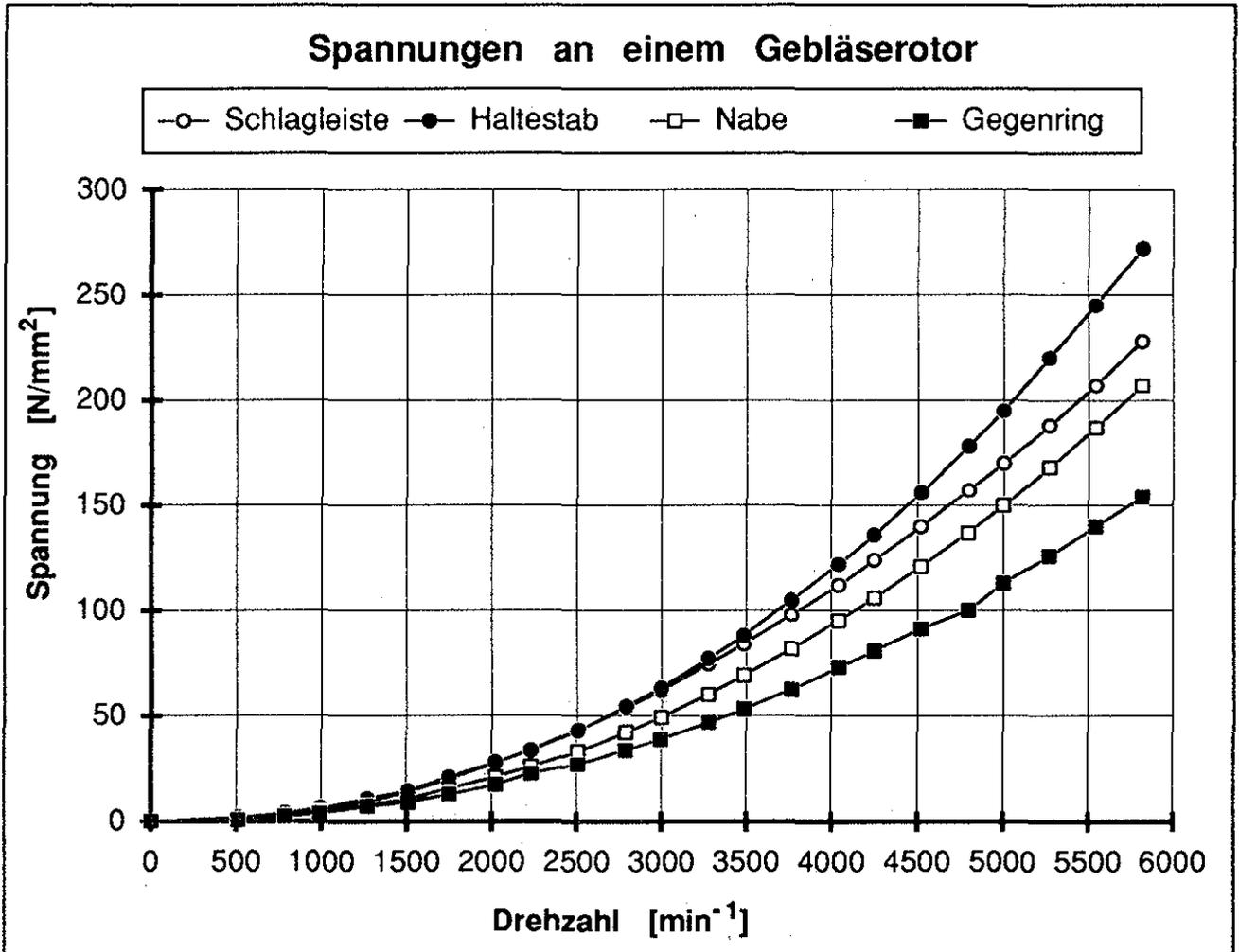


Bild 4: Spannungen an verschiedenen Bauteilen eines Gebläserotors (Universalmühle)

anspruchungsgerechter gestaltete Rotoren zu entwerfen, welche sich in weitem Maße vorauslegen lassen.

Nach Fertigstellung von Prototypen sollen diese ebenfalls auf dem Prüfstand getestet und meßtechnisch untersucht werden, wobei die Umfangsgeschwindigkeiten deutlich über den bisher üblichen liegen werden.

Die zur Zeit erreichbaren Drehzahlen liegen bei ca.  $10000 \text{ min}^{-1}$  und sind im wesentlichen durch die fettgeschmierten Wälzlager begrenzt. Geplant ist nach Absprache mit dem Hersteller der Einbau höherwertiger Lager, um auch Werte um  $15000 \text{ min}^{-1}$  fahren zu können. Bei einem Rotordurchmesser von 350 mm ergibt dies mögliche Umfangsgeschwindigkeiten bis zu 250 m/sec.

Eine Veröffentlichung aller weiteren Meßergebnisse sowohl von den bislang in Universalmühlen eingesetzten als auch von den neu entwickelten Rotoren erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt.

#### Literaturhinweise:

- /1/ Jungemann, Lothar:  
Konstruktion eines Prüfstandes für die Erfassung von mechanischen Meßgrößen an Feinprallmühlen unter besonderen Vorgaben  
Diplomarbeit TU Clausthal 1989
- /2/ Timmermann, Andreas:  
Entwurf und praktische Realisierung einer meßtechnischen Peripherie für einen Mühlenprüfstand  
Studienarbeit TU Clausthal 1990
- /3/ Odendall, Bodo:  
Meßtechnische Untersuchung von Rotoren in Feinprallmühlen  
noch nicht abgeschlossene Studienarbeit TU Clausthal 1990
- /4/ Deppermann, Georg:  
Arbeitsbericht 1988-1990 des SFB 180 (A4)  
TU Clausthal 1990

# Die Lehre am Institut für Maschinenwesen

M. Wächter

## Einleitung

*Dieser Beitrag soll einen Einblick in die vom Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen angebotenen Lehrveranstaltungen für die Studierenden der Fachrichtungen Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Bergbau, Hüttenwesen und Chemieingenieurwesen im Grund- und Hauptstudium geben.*

## 1 Angebot an Lehrveranstaltungen

Im Fachbereich Maschinen- und Verfahrenstechnik der TU Clausthal können die Diplomstudiengänge

- Maschinenbau
- Verfahrenstechnik
- Chemieingenieurwesen

absolviert werden. Das Institut für Maschinenwesen bietet Vorlesungen, Übungen, Praktika und Seminare für diese Fachrichtungen sowohl im Grundstudium als auch im Hauptstudium an.

Im Grundstudium werden zusätzlich die Studenten der Fachrichtungen Bergbau und Hüttenwesen betreut.

Die TU Clausthal ist mit rund 3800 Studenten die kleinste Universität in der Bundesrepublik Deutschland, so daß als Regelfall der Beginn des Studiums im Wintersemester angesehen wird, da das komplette Vorlesungsangebot nicht zweigleisig angeboten werden kann; Ausnahmen sind unter erschwerten Bedingungen möglich.

Für das Institut für Maschinenwesen hat das nachfolgenden Vorlesungsplan zu Folge:

Wintersemester		
Technisches Zeichnen	Mb, Vt	3Ü
Maschinenelemente II	Mb, Vt	4V/2Ü
Maschinenelemente I	Bb	2V/2Ü
Konstruktionslehre I		2V/1Ü
Konstruktionslehre III		2V
Fluidische Schaltungstechnik		2V/1Ü
CIM-Maschinenbau		2V/1Ü
Technische Normung I		1V
Experimentielle Festigkeitsermittlung		3V
Praktikum Spannungsoptik		4P
Praktikum CIM I		2P
Seminar Maschinenwesen		2S

Sommersemester		
Technisches Zeichnen	Mb, Vt	3Ü
Maschinenzeichnen	Bb	2Ü
Maschinenelemente I	Mb, Vt	2V/1Ü
Maschinenelemente III	Mb, Vt	2V/1Ü
oder wahlweise		2V/3Ü
Maschinenelemente II	Bb	2V/2Ü
Konstruktionslehre II		2V/1Ü
Pneumatische Anlagen und Systeme		2V/1Ü
Pneumatische Antriebstechnik		2V
Einführung in die Pneumatik		2V
Technische Normung II		1V
Praktikum zur Pneumatik		2P
Praktikum CIM II		2P
Maschinenlabor		4P
Seminar Maschinenwesen		2S

### Legende:

Mb Fachrichtung Maschinenbau  
 Vt Fachrichtung Verfahrenstechnik  
 Bb Fachrichtung Bergbau, Hüttenwesen und Chemieingenieurwesen

V Vorlesung  
 Ü Übung  
 S Seminar  
 P Praktikum

Die Maschinenelemente - Vorlesung I-III für die Fachrichtungen Maschinenbau und Verfahrenstechnik, sowie die Konstruktionslehre - Vorlesung I-III werden von Prof. Dr.-Ing. P. Dietz gehalten. Die zugehörigen Übungsstunden werden von den wissenschaftlichen Mitarbeitern abgehalten. Prof. Dr.-Ing. P. Dietz ist ebenfalls verantwortlich für die Praktika Maschinenlabor und CIM, sowie die Übungen zum Technischen Zeichnen und Maschinzeichnen.

Die Vorlesung Maschinenelemente I-II für die Fachrichtungen Bergbau, Hüttenwesen und Chemieingenieurwesen liegt in den Händen von Prof. Dr.-Ing. H.-J. Barth, ebenso die Vorlesungen Einführung in die Pneumatik, Fluidische Schaltungstechnik, Pneumatische Anlagen und Systeme und Pneumatische Antriebstechnik und das Praktikum Pneumatik sowie das Gemeinschaftsseminar Maschinenwesen, wobei die Übungen ebenfalls von den wissenschaftlichen Mitarbeitern des Institutes betreut werden.

Die Vorlesung Technische Normung wird als Gastvorlesung von Prof. Dr.-Ing. Sc. D. H. Reihlen abgehalten.

Gastvorlesungen sind weiterhin die Vorlesung Experimentielle Festigkeitsermittlung (Spannungsoptik) von Prof. Dr.-Ing. A. Hirchenhain und die Vorlesung CIM-Maschinenbau von Dr.-Ing. N. Müller.

Die Übungen zu Maschinzeichnen, Technisches Zeichnen und die Vorlesungen und Übungen zu Maschinenelemente sind Bestandteile des Grundstudiums, alle weiteren angebotenen Lehrveranstaltungen sind Inhalt des Hauptstudiums.

## 2 Durchführung

Nachfolgend sollen einige Details zu ausgewählten Lehrveranstaltungen einen Einblick in den Umfang der Lehraufgaben geben.

In den Übungen Technisches Zeichnen für die Fachrichtungen Maschinenbau und Verfahrenstechnik soll den Studenten die Fähigkeit zur Erstellung einer Technischen Zeichnung vermittelt werden.

Die Übungen werden als Gruppenübung in Zeichensälen abgehalten. Für die allgemeine Zeichenausbildung stehen 80 Zeichenmaschinen bereit und 12 CAD-Arbeitsplätze für die CAD-Ausbildung.

Es werden 7 Übungsaufgaben betreut, an Hand von 3 Tests wird das erarbeitete Wissen abgefragt. Die Übungsaufgaben erstrecken sich von einer Modellaufnahme als Handskizze, über eine Bemaßungsübung, Normteildarstellung, Schweißgruppenzeichnung, Passungs- und Toleranzaufgabe bis zum Umzeichnen einer Baugruppe und dem Erstellen einer werkstattgerechten Fertigungszeichnung. Bestandteil der Übung ist außerdem eine 3-teilige CAD-Einführung mit 12 Übungsstunden je Teilnehmer und ein Kurztest.

Im Wintersemester 90/91 werden in dieser Lehrveranstaltung 290 Studenten/innen betreut, sowie 105 Studenten der Fachrichtungen Bergbau, Hüttenwesen und Chemieingenieurwesen. Bei diesen Studenten entfällt die 7. Übungsaufgabe und die CAD-Ausbildung.

Die Übungen zur Maschinenelemente I-III Vorlesung der Fachrichtungen Maschinenbau und Verfahrenstechnik sind aufgegliedert in konstruktive Entwurfsübungen und Berechnungsübungen.

Voraussetzung für die Teilnahme an den konstruktiven Entwurfsübungen ist der erfolgreiche Abschluß der Übungen in Technischem Zeichnen.

Die Rechenübungen werden als Hörsaalübung abgehalten. Die 17 Übungstermine decken im wesentlichen den in der Vorlesung dargebotenen Stoff ab, so werden einleitende Festigkeitsberechnungen durchgeführt, Stoff-, Form- und Reibschlüssige Verbindungen berechnet, die Befestigungs- und Bewegungsschraube behandelt, eine Feder- und Wellenberechnung durchgeführt und

Aufgaben zur Gleit- und Wälzlagerberechnung gelöst. Das Thema Verzahnung wird in 2 Übungsterminen behandelt, die Berechnungsverfahren von Kupplungen und Bremsen werden vorgestellt und eine Zugmittelaufgabe gelöst.

Die konstruktiven Entwurfsübungen werden als Gruppenübung in verschiedenen Räumen durchgeführt. Ziel der Übungen ist die Anwendung des in der Vorlesung vermittelten Wissens auf konstruktive Problemstellungen.

Die Systematische Lösungsfindung wird in 2 Aufgaben behandelt. Gegenstand der Maschinenelemente I Übung ist außerdem die Detailgestaltung einer Gußkonstruktion und einer Schweißkonstruktion mit Berechnung.

Die Konstruktion und Berechnung einer Lagerung und eine Toleranzaufgabe, sowie die Detailkonstruktion einer Kupplung mit Berechnung sind Gegenstand der Maschinenelemente II Übung.

Die Getriebekonstruktion und Berechnung ist wahlweise gegen die Konstruktion eines Apparates tauschbar und zählt als Maschinenelemente III Übungsschein.

Während der Übungsstunden steht der jeweilige Betreuer für Fragen bereit. Je nach Ausstattung des Raumes steht dem Übungsteilnehmer während der Übungszeit eine Zeichenmaschine zur Verfügung, für begleitende Berechnungen sind im Rahmen der vorhandenen Ausstattung Rechner-Arbeitsplätze verwendbar, ebenso kann eine begrenzte Anzahl von CAD-Arbeitsplätzen genutzt werden.

Im laufenden Semester sind 215 Studenten in den Übungen zur Maschinenelemente - Vorlesung zu betreuen.

Zur Maschinenelemente - Vorlesung für die Fachrichtungen Bergbau, Hüttenwesen und Chemieingenieurwesen werden Berechnungsübungen angeboten, die im laufenden Semester von etwa 70 Studenten besucht werden.

Im Rahmen der Konstruktionslehre I Vorlesung findet ein CAD-Kurs, bestehend aus 5 Übungsaufgaben zu insgesamt 20 Übungsstunden je Kursteilnehmer, statt. Zur Zeit nehmen an dem CAD-Kurs 70 Studenten/innen teil.

Die Vorlesung Konstruktionslehre II wird entsprechend stark besucht. In den Übungsstunden werden Aufgaben zu den Ähnlichkeitsgesetzen, zur Baureihen- und Baukastenkonstruktion und zum wirtschaftlichen Konstruieren, um nur einige Themen zu nennen, gelöst.

Die Anschlußvorlesung Konstruktionslehre III mit dem Thema Konstruktion von Werkzeugmaschinen ist eine Wahlvorlesung und wird von ungefähr 20 Studenten gehört.

Das Maschinenlabor ist eine Pflichtveranstaltung im Hauptstudium und wird als Gemeinschaftsveranstaltung mehrerer Hochschulinstitute durchgeführt. Das Institut für Maschinenwesen bearbeitet einen Druckversuch mit Versuchsdurchführung, Protokoll und Test, an dem über 200 Studenten teilnehmen.

Die Wahlpraktika CIM-Labor und Spannungsoptiklabor werden von je 15 Studierenden besucht.

### 3 Prüfungstermine

Neben den erwähnten Lehrveranstaltungen, die im Semester stattfinden, sind noch die zwei Vordiplomklausurtermine zum Fach Maschinenelemente zu nennen, an denen die Klausuren von circa 160 Maschinenbauern und Verfahrenstechnikern als auch 90 Klausuren von Bergbauern, Hüttenleuten und Chemieingenieuren zu erstellen und korrigieren sind, mit anschließender mündlicher Nachprüfung von ungefähr 65% der Teilnehmer.

Der eine Klausurtermin liegt im Anschluß an das Wintersemester im Prüfungszeitraum März/April und der zweite Termin im Anschluß an das Sommersemester im September/Oktober.

Die Hauptdiplomprüfung im Fach Konstruktionslehre wird als mündliche Prüfung abgehalten, ebenso die Scheinprüfungen in den weiteren Vorlesungsveranstaltungen im Hauptstudium. Diese Prüfungen können neben dem schon genannten Prüfungszeiträumen noch in den Zwischenprüfungszeitraum Januar/Februar und Juni/Juli abgelegt werden.

#### **4 Zusammenfassung**

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß das Institut für Maschinenwesen einen erheblichen Teil der Lehrveranstaltungen im Grundstudium abdeckt.

Durch die Fächer Maschinzeichnen, Technisches Zeichnen und Maschinenelemente erbringt jeder Student der Fachrichtungen Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Bergbau, Hüttenwesen und Chemieingenieurwesen im Grundstudium Prüfungsvorleistungen am Institut.

Ein weitgefächertes Angebot an Lehrveranstaltungen wird im Hauptstudium angeboten.

# Legierungsuntersuchungen am spannungsoptischen Modellwerkstoff Silberchlorid (AgCl)

W. Kalliwoda

## Einleitung

Die spannungsoptische Modelluntersuchung ist ein Verfahren der experimentellen Spannungsanalyse. Mit Hilfe eines transparenten spannungsoptischen Modells wird eine schnelle und anschauliche Übersicht zur Spannungsverteilung gewonnen, wobei das Ergebnis anschließend über Modellgesetze auf das Originalbauteil übertragen wird. Der Modellwerkstoff Silberchlorid (AgCl) ermöglicht spannungsoptische Untersuchungen auch im teilplastischen Bereich (Photoplastizität). AgCl zeigt ein Verformungsverhalten das dem von Leichtmetallen gleicht. Im folgenden werden Untersuchungen zur Erhöhung der mech. Festigkeitswerte von AgCl beschrieben, um teilplastische Vorgänge auch in höherfesten Konstruktionswerkstoffen zu simulieren.

### 1.0 Modellwerkstoff Silberchlorid (AgCl)

Der am Institut für Maschinenwesen verarbeitete Modellwerkstoff Silberchlorid zeigt metallähnliche mechanische Eigenschaften. Dieses Ergebnis folgt aus Spannungs-Dehnungs-Diagrammen von Zugversuchen und von aufgenommenen Fließkurven an AgCl-Stauchproben. Desweiteren wurde auch der Zusammenhang zwischen der Fließspannung  $k_f$  und dem Umformgrad  $\phi$  in Abhängigkeit von der Umformgeschwindigkeit ermittelt [1]. Mit diesen Werkstoffprüfversuchen ergab sich aufgrund des kubischen Kristallaufbaus und des flächenzentrierten Gittertyps von AgCl ein Fließ- und Verfestigungsverhalten ähnlich dem von Reinaluminium (Bild 1.0 und Bild 1.1).

Die für spannungsoptische Untersuchungen erforderlichen mechanischen und optischen Eigenschaften der AgCl-Proben werden durch eine besondere Herstelltechnik erreicht. Nach einer Kristallzüchtung durch ein Zonenschmelzverfahren wird der gewonnene AgCl-Monokristall in mehreren Stufen umgeformt und wärmebehandelt.

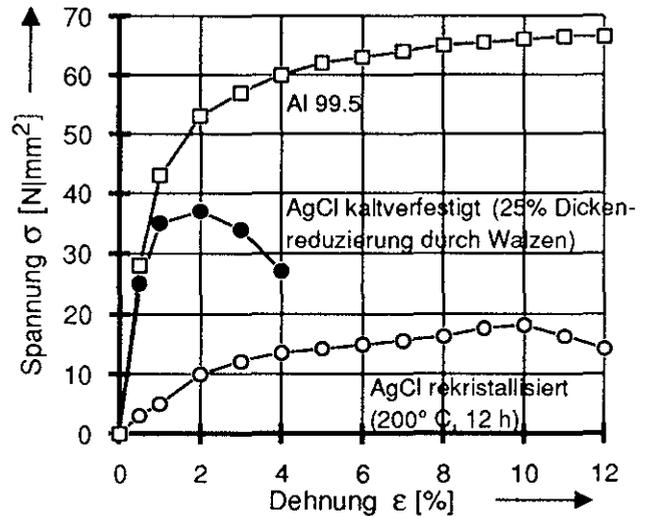


Bild 1.0: Spannungs - Dehnungs - Diagramm einer rekristallisierten und kaltverfestigten AgCl-Probe im Vergleich zu Al 99.5

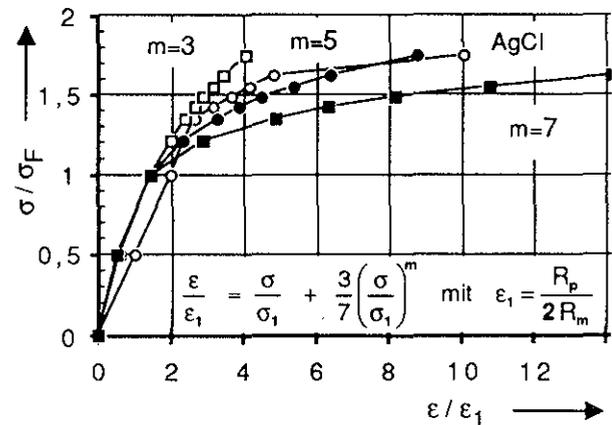


Bild 1.1: AgCl- Spannungs - Dehnungskurve (dimensionslos) und Approximation nach Ramberg und Osgood-Gln.

Durch die geeignete Wahl von Rekristallisationszeit und -temperatur als Funktion vom Umformgrad  $\phi$  der Probe ergibt sich ein feinkörniger, texturfreier Gefügebau. Diese polykristallinen optisch quasi-isotropen AgCl-Proben sind als photoplastischer Werkstoff anwendbar.

**2.0 Mechanismen zur Festigkeitssteigerung bei Metallen und Silberchlorid (AgCl)**

In vielkristallinen metallischen Werkstoffen bedeutet die wirksame Blockierung von Versetzungsbewegungen eine Erhöhung der Festigkeitswerte.

Mit Hilfe der Versetzungstheorie werden die verschiedenen Mechanismen der Verformungsbehinderung in metallischen Werkstoffen beschrieben. So wird bei höherfesten Stählen ein Gefügebautbau angestrebt, in denen die Bewegung von Gleitversetzungen nur unter sehr hoher Belastung möglich wird.

Am Beispiel der Stahlhärtung von  $\alpha$ -Ferrit ( $\alpha$ -Fe) werden einige Härtungsmechanismen in **Tab 2.1** angegeben. Die Hindernisarten die eine Versetzungsblockierung verursachen sind entsprechend ihren geometrischen Abmessungen unterteilt.

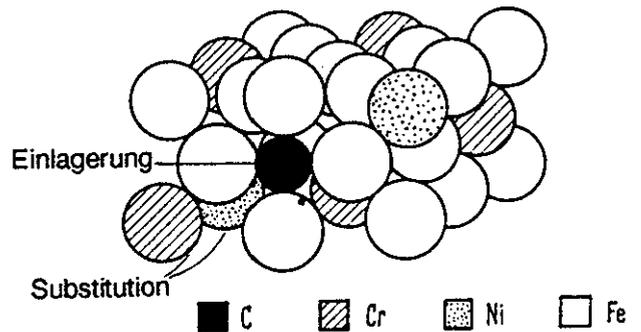
Nr.	Dimension	Gefügeelement	Härtungsmechanismus
1	0	gelöste Atome, Punktfehler	Mischkristallverfestigung Bestrahlungsverfestigung
2	1	Versetzungen	Kaltverfestigung
3	2	Korngrenzen, Phasengrenzen	Feinkornhärtung
4	3	Teilchen $\beta$ in $\alpha$	Ausscheidungshärtung Dispersionshärtung
5		Gefügeanisotropie	"Texturhärtung" (gerichtete Körner)

**Tab 2.1:** Festigkeitsteigernde Mechanismen am Beispiel von Ferrit (mit Ausnahme martensitischer Umwandlungshärtung)

**2.1 Mischkristallverfestigung:**

**Bild 1.0** zeigt den Anstieg von Streckgrenze und Zugfestigkeit einer gewalzten AgCl-Probe im Vergleich zu unverformten Probenmaterial.

Durch den Effekt der Mischkristallbildung wird ebenfalls eine Verfestigung durch die im Kristallgitter gelösten Fremdatome erzielt. **Bild 2.1** zeigt als Beispiel den Mischkristallaufbau eines korrosionsbeständigen austenitischen Stahls.



**Bild 2.1:** Schematische Darstellung eines  $\gamma$ -Mischkristalls: Austenitischer Stahl X10CrNi 18 8 mit 0,1% Kohlenstoff (im Kristall eingelagert) sowie Chrom und Nickel anstelle von Fe-Atomen substituiert.

Die Konzentration von gelösten Atomen die eine Mischkristallhärtung bewirken, ist dabei durch die max. Löslichkeit im festen Zustand begrenzt. Der Löslichkeitsgrad ist aus dem Zustandsdiagramm für die jeweilige Legierung zu bestimmen.

Über den Festigkeitsanstieg durch AgCl-Mischkristallbildung sind Untersuchungen mit der Legierung AgCl / NaCl und AgCl / AgBr durchgeführt worden. Bei den Legierungsproben ist dabei zu gewährleisten, daß die für die spannungsoptische Untersuchungen notwendige Transparenz erhalten bleibt.

**2.1.1 Die Legierung AgCl / NaCl [2]**

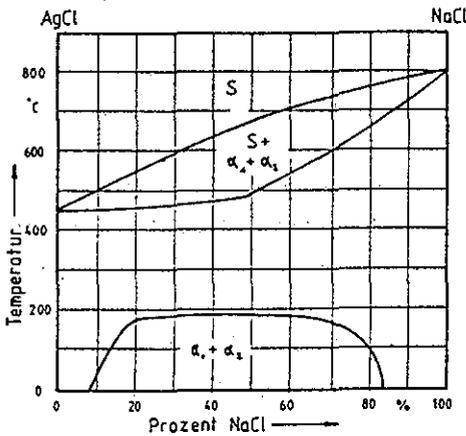
Durch Zulegieren von Natriumchlorid (NaCl) in Konzentrationen zwischen 8% - 85% erhöht sich z.B. die Druckfestigkeit bis um den Faktor 100 gegenüber den reinen Komponenten.

[1] Schmidt, O.A. : Untersuchung von Umformvorgängen beim Strangpressen mit Hilfe spannungsoptischer Methoden. Diss. IMW, TU Clausthal 1981

[2] Weber H.J. : Eigenschaften des spannungsoptischen Modellwerkstoffs Silberchlorid (AgCl) Diss. IMW, TU Clausthal 1986

Dies zeigt, daß es möglich ist, die mechanischen Eigenschaften von AgCl durch Legieren soweit zu ändern, daß photoplastische Modelluntersuchungen auch auf andere Metalle als Aluminium ausgeweitet werden können.

Aus dem Zustandsdiagramm von Silberchlorid und Natriumchlorid (**Bild 2.2**) geht hervor, daß sich nur bei höheren Temperaturen ( $T > 170^\circ\text{C}$ ) eine lückenlose Reihe von Mischkristallen bildet. Bei Raumtemperatur liegt die Entmischungszone der Legierung im Bereich von ca. 8% - 85% NaCl. In diesem Gebiet ist der Werkstoff infolge der Ausscheidung von  $\alpha$ -Mischkristallen nicht mehr transparent und deshalb spannungsoptisch nicht brauchbar [2]. Für die Legierungsversuche ist deshalb der Legierungsbereich von 1% - 8% NaCl ausgewählt worden.

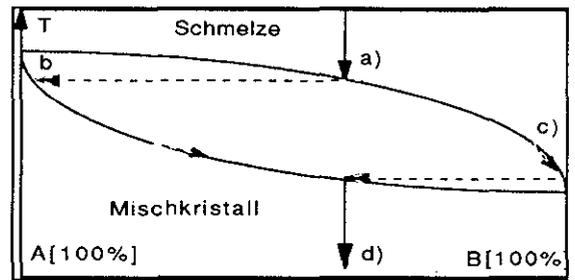


**Bild 2.2:** Binäres Zustandsdiagramm AgCl / NaCl

Als Untersuchungsergebnis der in unterschiedlichen Konzentrationen erschmolzenen Legierungen zeigte sich, daß nur AgCl mit einem NaCl-Anteil von 1% mit ausreichender Transparenz herzustellen war. Im Rahmen der Weiterverarbeitung des Mischkristalls zu polykristallinem Probengefüge zeigte sich allerdings schon bei geringen Umformgraden eine so hohe Materialversprödung, daß der Modellwerkstoff während der Kaltumformung (Fließpressen) zerbrach.

**2.1.2 Die Legierung AgCl / AgBr**

Im Gegensatz zum System AgCl / NaCl wird auch im festen Zustand eine vollkommene Löslichkeit von AgBr in Silberchlorid erreicht. Es bildet sich eine lückenlose Mischkristallreihe. Die schematische Darstellung in **Bild 2.3** zeigt das Zustandsdiagramm dieser Legierung.

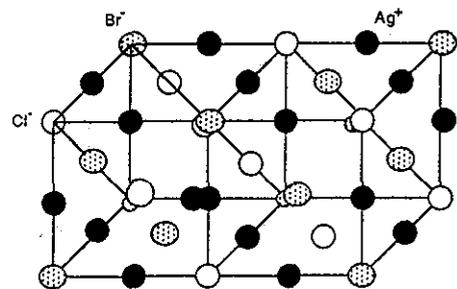


- a) Schmelze der Zusammensetzung a
- b) Mischkristall der Zusammensetzung b
- c) Schmelze wird B-reicher
- d) Einheitliche Mischkristalle der Zusammensetzung d (Ausgleich durch Diffusion)

**Bild 2.3:** Schematisches Zustandsdiagramm der Legierung AgCl (A) / AgBr (B)

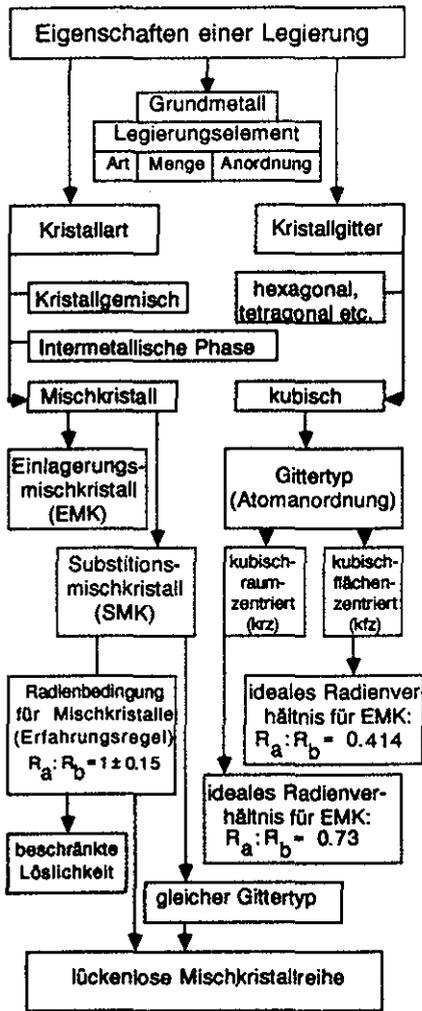
*Substitutionsmischkristall ("SMK")*

**Bild 2.4** zeigt das Gittermodell eines Substitutionsmischkristalls der Legierung AgCl / AgBr in regelmäßiger Anordnung (Überstruktur). Das Mischungsverhältnis beider Komponenten beträgt hier 1:1. In der AgCl-Elementarzelle ist dann jeweils ein Cl<sup>-</sup>-Anion durch ein Br<sup>-</sup>-Anion ersetzt.



**Bild 2.4:** Modellvorstellung zum System AgCl / AgBr (idealer Ordnungsgrad)

Zur Bildung eines Substitutionsmischkristalls sind einige Voraussetzungen bezüglich des Gefügeaufbaus und der Atomradien von Legierungselement und Grundmaterial notwendig. Zunächst muß gewährleistet sein, daß beide Komponenten die gleiche Kristallstruktur besitzen. Dies ist bei den ionischen Verbindungen NaCl und AgBr der Fall, beide haben einen kubisch-flächenzentrierten Gitteraufbau, ebenso wie die Grundverbindung AgCl. Zum Erhalt eines "SMK" in lückenloser Mischkristallreihe für transparente Proben ist eine weitere Voraussetzung, die "Radienbedingung"  $R_a : R_b = 1 \pm 0.15$ , zu erfüllen. **Tab 2.2** zeigt die idealen Atom- bzw. Ionenradienverhältnisse verschiedener Mischkristallarten.



Tab 2.2: ideale Radienverhältnisse von Mischkristallen

Die Bildung von Einlagerungs- bzw. Substitutionsmischkristallen ist dabei von Gittertyp und Ionenradienverhältnis beider Komponenten abhängig.

Tab. 2.3 gibt einige Ionenradien in Kristallen an. Es zeigt sich, daß das "kfz" System AgCl / AgBr im Gegensatz zum System AgCl / NaCl die "Radienbedingung" erfüllt:

$$R_{Br^-} / R_{Cl^-} = 0.195 / 0.181 = 1.07 \leq 1.15$$

$$R_{Ag^+} / R_{Na^+} = 0.126 / 0.095 = 1.32 \ngtr 1.15$$

Br-	0,195	Al3+	0,05	Cl-	0,181
Be++	0,031	Si4+	0,041	Sr++	0,113
B3+	0,02	S2-	0,184	Y3+	0,093
C4+	0,015	Ag+	0,126	La3+	0,115
O2-	0,14	K+	0,133	Ce4+	0,101
F-	0,136	Ca++	0,099	J-	0,216
Na+	0,095	Sc3+	0,081	Cs+	0,169
Mg++	0,065	Ti4+	0,068	Ba++	0,135
Cr6+	0,052	Zr4+	0,08	Au+	0,137

Tab 2.3: Ionenradien in Kristallen [nm] (Auszug)

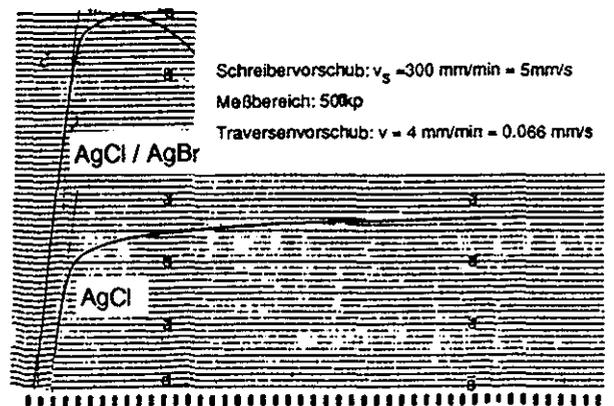
*mech. Eigenschaften der Legierung:*

Die AgCl / AgBr - Schmelzrohlinge wurden ebenfalls an der am Institut für Maschinenwesen vorhandenen Zonenschmelzapparatur hergestellt. Das angewandte Tiegelabsenkverfahren wurde aufgrund der Lichtempfindlichkeit der Schmelze im Dunkeln ausgeführt.

Es wurde ein AgCl - Schmelzrohling mit 5 % AgBr-Legierungszusatz fließgepreßt und anschließend gewalzt. Der Schmelzrohling wurde zwecks Verbesserung der Umformeigenschaften warmumgeformt und konnte anschließend für die Herstellung von Flachzugproben nach DIN 50125 verwendet werden.

Zwecks der noch vorzunehmenden Untersuchung der spannungsoptischen Eigenschaften wurden aus derselben Charge Biegeproben hergestellt. Mit Hilfe von querkräftfrei durchzuführenden Biegeversuchen sollen die max. Isochromatenordnung an der Randfaser bestimmt und damit die spannungsoptische Konstante S ermittelt werden.

Die legierten Zugproben wurden in einem Zerreißversuch auf ihre Kennwerte überprüft und mit denen polykristalliner unlegierter AgCl-Proben verglichen. Bild 2.5 zeigt den aufgezeichneten F-Δt-Meßschrieb aus dem Zugversuch und die errechneten mech. Kennwerte der Zugproben.



	AgCl	AgCl / AgBr
Streckgrenze $R_{p0.2}$	9.9 N/mm <sup>2</sup>	30.1 N/mm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit $R_m$	18.2 N/mm <sup>2</sup>	42.0 N/mm <sup>2</sup>
Gesamtdehnung $\epsilon_t$	32.6 %	7.6 %
Gleichmaßdehnung $\epsilon_G$	9.0 %	1.8 %
E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	22890	26380
Streckgrenzenverhältnis	51.8 %	71.6 %

Bild 2.5: Registrierte Kraft-Zeit (F-Δt)-Verläufe von Zugproben der Legierung AgCl / AgBr (5%) und Rein-AgCl sowie den ermittelten Werkstoffeigenschaften in tab. Übersicht

# Rechnergestützte Baureihenentwicklung von Kreislaufreaktoren

U. Neumann

## Einleitung

In der chemischen Reaktionstechnik bildet die Übertragung chemischer Umsetzungen vom Labormaßstab in die technische Größe einen konstruktiven Aufgabenschwerpunkt. Am Beispiel der Niederdruck-Methanolsynthese bei 55bar und 300 °C ist deshalb im Rahmen eines Forschungsvorhabens geplant, für gradientenfreie Reaktoren ein Baukastensystem bis zu einem Katalysatorvolumen von 1m<sup>3</sup> zu entwickeln.

In einem Teilschritt dieses Vorhabens sollen die schon realisierten Reaktorgrößen mit einem Katalysatorvolumen von 1l und 10l als Grundentwurf für die Maßstabsvergrößerung auf ein Katalysatorvolumen von 100l dienen. Dies soll mit Hilfe der Dimensionsanalyse und der Darstellung dimensionsloser Kennzahlen unter Verwendung von Potenzbeziehungen in einem Datenblatt (Nomogramm) durchgeführt werden.

Anhand des Ergebnisses dieser Maßstabsvergrößerung, den Geometriedaten für Reaktorgrößen bis 100l Katalysatorvolumen, soll für diese Reaktoren ein Supersyntax-Programm erstellt werden, welches den 10l-Reaktor in seiner Grundform parametrisiert und es dem Anwender ermöglicht, im Dialog die mit Hilfe des Datenblatts ermittelten Baureihengrößen interaktiv zu erzeugen.

## 1. Vereinfachung des Reaktors in seine Grundform

Um eine Konstruktionszeichnung mit dem Parametric-Modul des CAD-Systems Prime-Medusa 5.1 parametrisieren zu können, muß diese Zeichnung vollständig und nach DIN bemaßt sein. Diese Forderung ist in dem Moment einsichtig, in dem man sich vor Augen führt, wie das Parametric-Modul arbeitet. Das Parametric-System erzeugt aus einer gegebenen Geometrie, durch individuelles Verschieben von Koordinatenpunkten, beliebige Varianten. Koordinatenpunkte sind in diesem Fall die Punkte einer

Linie.

Die Verschiebungen der einzelnen Punkte berechnet das Parametric-System mit Hilfe eines Verfahrens, das auf einem internen System von sogenannten "Gitterlinien" basiert. Aufgrund der vorhandenen Bemaßung wird ein netzartiges System von Linien erzeugt. Diese Linien entsprechen geometrisch einer Verlängerung der Maßhilfslinien. Alle Linienpunkte der zu variierenden Geometrie werden der Reihe nach daraufhin untersucht, auf welchem Schnittpunkt von Gitterlinien (Stützpunkt) sie liegen. Wenn nun Punkte des Objekts nicht bemaßt sind, existiert kein Stützpunkt und eine Fehlermeldung erscheint. Ist die Zeichnung überbemaßt, entspricht in ihrer Bemaßung also nicht der DIN, existieren widersprüchliche Stützpunktangaben, was wiederum eine Fehlermeldung zur Folge hat.

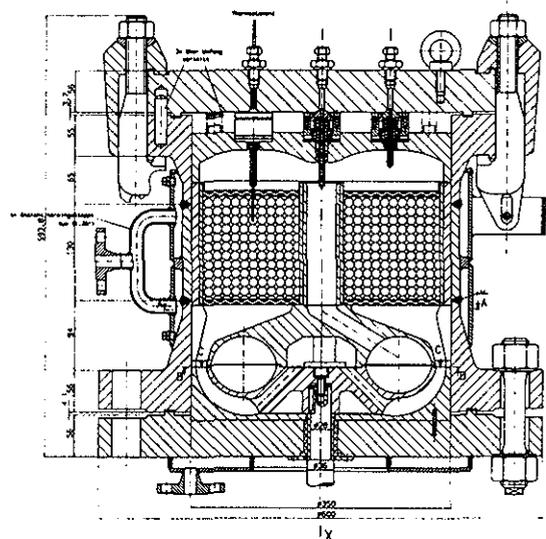


Bild 1.1 Konstruktionszeichnung

Ein Betrachten der Konstruktionszeichnung des 10l-Reaktors in Bild 1.1 zeigt, daß diese so komplex ist, daß eine vollständige, DIN-gerechte Bemaßung aller Bauteile an die Grenzen der Rechnerkapazität stoßen würde.

Um nun eine gewisse Überschaubarkeit zu erreichen und den Arbeitsaufwand des Rechners zu ver-

ringern, war es notwendig, den 10l-Reaktor in seine Grundform zu bringen, daß heißt, die Konstruktionszeichnung dahingehend zu vereinfachen, daß es möglich ist, sie vollständig und in den Grenzen der Überschaubarkeit zu bemessen.

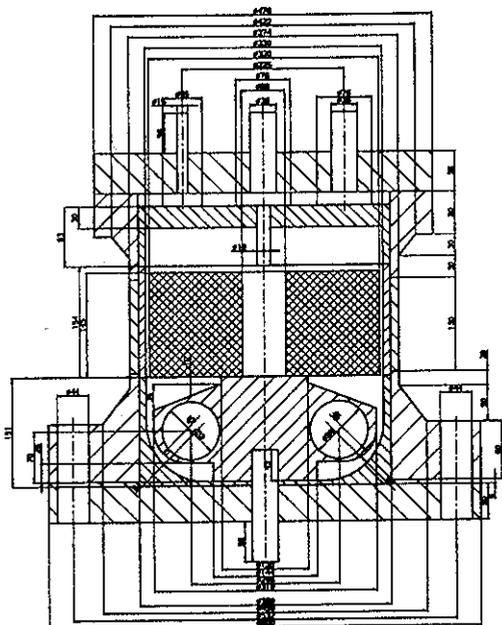


Bild 1.2: Darstellung des Reaktors in seiner Grundform

In Bild 1.2 ist diese Grundform des 10l-Reaktors dargestellt. Ein Vergleich mit der Konstruktionszeichnung (Bild 1.1) zeigt in allen Bereichen Vereinfachungen. Beginnend mit der Außenhülle des Reaktors erkennt man, daß auf die Darstellung der Klammerschrauben und der Schraubenbolzen verzichtet wurde. Des Weiteren wurden beim Erstellen der Grundform das Einzeichnen des Heizmantels und der Augenschraube unterlassen. Der Verzicht auf diese Bauteile wurde unter der Zielsetzung der Schematisierung der Funktionalität des Reaktors durchgeführt.

Alle anderen Bauteile sind in ihrer Form derart vereinfacht worden, daß sie in ihrer Funktion erkennbar geblieben und trotzdem komplett bemaßbar sind. Die Flansche wurden durch das Weglassen ihrer Radien und der Sitze für die Dichtungen vereinfacht, der Seitenkanalverdichter nur in seinen Umrissen dargestellt, genau wie die Thermokupplungen. Beim Katalysator wurde auf die symbolische Darstellung der Pellets verzichtet, den ein jeder dieser

Kreise hätte eine Durchmesserbemaßung und eine Bemaßung seines Mittelpunkts erfordert. Der Katalysator ist statt dessen durch eine doppelte Schraffur gekennzeichnet.

## 2. Erstellung des Programms

Die durch die Hilfe der Dimensionsanalyse gewonnenen Maße für die unterschiedlichen Reaktorbaugrößen sind die Grundlage für das zu erstellende Programm, das ermöglichen soll, die entsprechenden Baureihengrößen im Dialog interaktiv zu erzeugen.

### 2.1 Anforderungen an das Programm

Die durch die Dimensionsanalyse gewonnenen und im Nomogramm dargestellten Werte ergeben folgendes Bild:

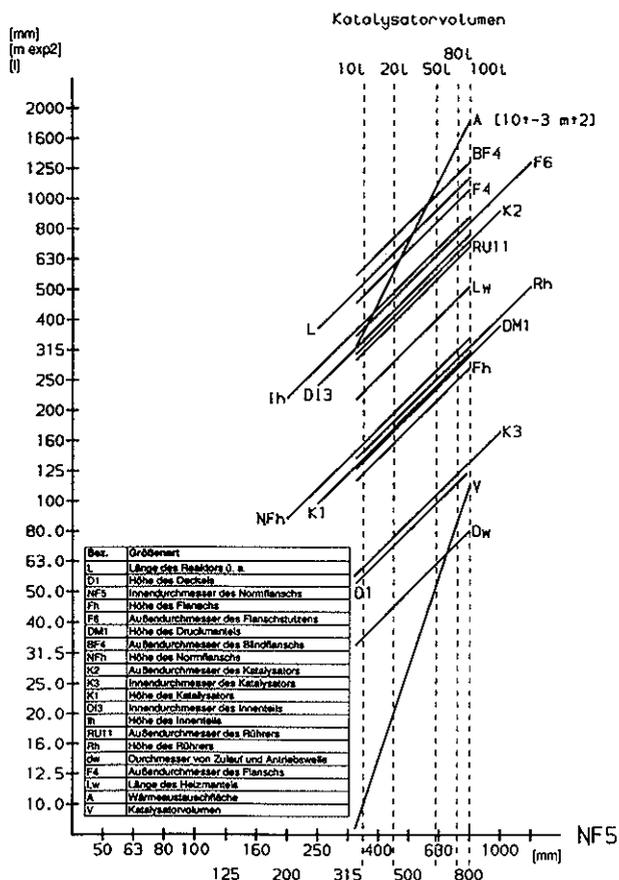


Bild 2.1.1 Nomogramm

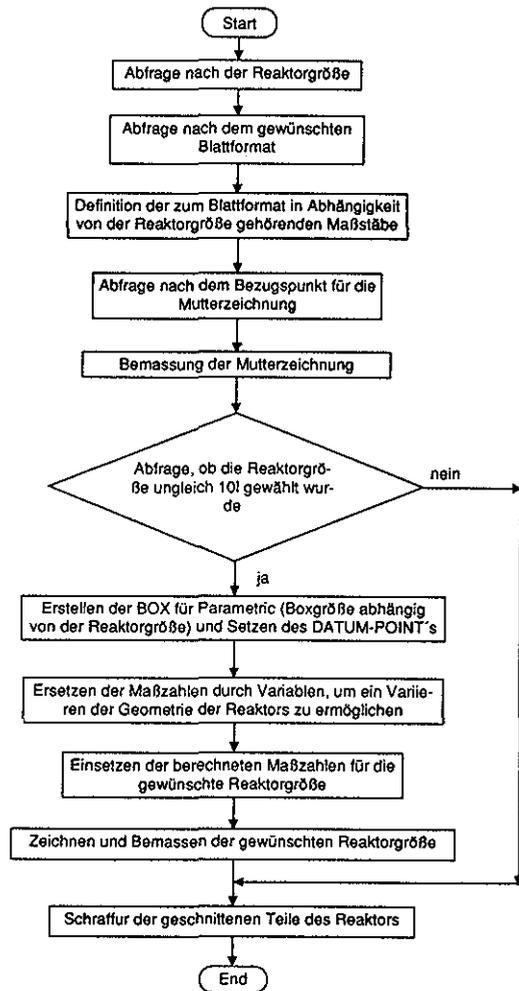
Es zeigt sich, daß die Maße des 10l-Reaktors und des 100l-Reaktors in ihren Beträgen große Unterschiede aufweisen.

Da aber für jede Reaktorbaugröße die Mutterzeichnung der Grundform des 10l - Reaktors ist, erscheint es sinnvoll, keine feste Mutterzeichnung zu erstellen. Eine feste Mutterzeichnung auf einem vorgegebenen Papierformat muß in einem so kleinen Maßstab gezeichnet sein, daß sich auch der 100l - Reaktor auf diesem Format darstellen läßt. Wenn aber die Darstellung eines 10l- oder 20l - Reaktor gewünscht ist, wirken die dazugehörigen Zeichnungen auf diesem Blattformat verloren. Wenn man dazu berücksichtigt, daß nicht jeder Anwender des Programms die gewünschte Reaktorbaugröße auf dem gleichen Papierformat wünscht, ist eine Mutterzeichnung in einem variablem Maßstab auf unterschiedlichen Blattformaten die logische Konsequenz. Das Ergebnis dieser Betrachtungen sind folgende Anforderungen an das Programm:

- freie Auswahl der gewünschten Reaktorbaugröße für den Anwender
- Auswahlmöglichkeiten des Blattformats für den Anwender
- Möglichkeiten, die Mutterzeichnung in unterschiedlichen Maßstäben in Abhängigkeit von der durch den Anwender gewünschten Baugröße und des Blattformats darzustellen.

**2.2 Realisierung der Anforderungen**

Der erste Schritt, um nun die erstellten Anforderungen programmtechnisch umsetzen zu können, ist die Erstellung eines Programmablaufplans. Dieser Plan ist in Bild 2.2.1 dargestellt.



**Bild 2.2.1** Programmablaufplan

Anhand dieses Ablaufplans wurde das Programm erstellt.

Die Abfrage nach der gewünschten Reaktorbaugröße geschieht durch ein Auflisten der möglichen Baugrößen mit anschließender Aufforderung, die gewünschte einzugeben. Bei der Abfrage nach dem Blattformat wird ähnlich vorgegangen, in Abhängigkeit von der Reaktorbaugröße werden unterschiedliche Formate zur Auswahl angeboten und das gewünschte Format ist durch den Anwender einzugeben.

Das Problem der Mutterzeichnung wurde durch das Schreiben eines Macros zu ihrer Erstellung gelöst. Der Anwender hat die Möglichkeit, die Mutterzeichnung nach seinen Wünschen durch die Eingabe eines Bezugspunktes zu plazieren, der Maßstab wird in Abhängigkeit von der Reaktorbaugröße und dem Blattformat von dem Programm festgelegt.

### 2.3 Beschreibung des Programms

Nach dem Einloggen in das System und dem Aufrufen von Medusa kann das Programm, es handelt sich dabei um ein Macro, mit dem Befehl MACRO REAKTOR gestartet werden.

Nach dem Starten des Programms erscheint auf dem alphanumerischen Bildschirm ein eingerahmter Text, der den Programmnamen, die Programmversion, den Autor und die Daten der Erstellung und der letzten Modifikation angibt.

An diese Information schließt sich die Abfrage nach dem gewünschten Reaktorvolumen an. Es erscheint ein Text, der die Auswahl der Reaktorgrößen von 10l, 20l, 50l, 80l und 100l Katalysatorvolumen anbietet. Dieser Text endet mit der Aufforderung, eine der angebotenen Reaktorgrößen über Tastatur einzugeben.

In der nächsten Frage an den Anwender wird das Blattformat festgelegt. Je nach Reaktorgröße werden unterschiedliche Formate angeboten. Auf die Abfrage des Programms muß der Anwender nun das von ihm gewünschte Format über die Tastatur eingeben. Bei den Reaktoren mit einem Katalysatorvolumen von 80l und 100l ist dies nicht der Fall, sie werden ausschließlich auf DIN A0 dargestellt. Nachdem nun vom Anwender die Reaktorgröße und das Blattformat ausgewählt wurden, wird nun vom Programm aus das gewünschte Blattformat aufgerufen und der dazugehörige Zeichnungsmaßstab und ein Maßstabsfaktor definiert.

Nachdem auf dem Graphik - Bildschirm das gewünschte "Zeichnungsblatt" erschienen ist, erfolgt an den Anwender die Aufforderung, mit Hilfe des Fadenkreuzes und einer "FREE-Probe" auf dem Menu-Tablett den Mittelpunkt der Unterseite des Reaktors festzulegen. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die Zeichnung nach eigenen Wünschen auf dem gewählten Blatt zu plazieren. Dabei sollte aber berücksichtigt werden, daß dieser Bezugspunkt, wie angegeben, in der Mitte der Unterkante des Reaktors liegt.

Wenn nun der durch Reaktorgröße und Blattformat bedingte Zeichnungsmaßstab nicht 1 : 1 ist, liegen der Punkt, auf dem das Fadenkreuz steht und der durch ihn definierte Bezugspunkt nicht mehr an der gleichen Stelle. Dies wird durch eine Umrechnung

mit Hilfe des zuvor definierten Maßstabsfaktor ausgeglichen und ein Punkt P1 definiert. Die Koordinaten dieses Punktes sind nun die Berechnungsgrundlagen für alle weiteren Punkte, die durch das Programm definiert werden, um die Mutterzeichnung erstellen zu können.

Für die Mutterzeichnung werden jeweils die für die einzelnen Bauteile benötigten Punkte definiert und dann durch Linienzüge verbunden. Um nach der Erzeugung der gewünschten Baugröße ein Schraffieren einzelner Einzelbausteine zu ermöglichen, wird jeder geschlossene Linienzug, der schraffiert werden soll, auf einen separaten Layer abgelegt.

Nachdem so die Mutterzeichnung erstellt ist, werden die Bauteile in der Reihenfolge der Erstellung bemaßt. Auch in diesem Fall werden zuerst die benötigten Punkte zur Bemaßung des jeweiligen Bauteils definiert und dann das jeweilige Bauteil bemaßt.

Nachdem die Mutterzeichnung bemaßt ist werden wiederum Punkte definiert.

Um mit dem Parametric - Modul arbeiten zu können, müssen existierende Maße überschrieben werden. Da sich aber die Plazierung der Maßzahlen innerhalb der Mutterzeichnung mit dem jeweiligen Maßstab ändern, ist es notwendig, nochmals einige Punkte zu definieren, um ein Überschreiben von jeder Maßzahl zu gewährleisten.

Wenn nun eine Reaktorbaugröße mit einem Katalysatorvolumen von mehr als 10l gewählt wurde, wird als nächstes durch das Programm die sogenannte BOX definiert. Die BOX ist ein Rahmen um die zu variierende Zeichnung und bildet die Abgrenzung für die Parametric - Routine. Zeichnungselemente, die außerhalb der BOX liegen, lassen sich nicht variieren. Nachdem die BOX definiert ist, wird über das Programm der DATUM - POINT festgelegt. Dies ist ein Referenzpunkt, den das System benötigt, um die Geometrie variieren zu können. Abschließend erfolgt der Aufruf der Parametric - Routine. Alle Linienpunkte der zu variierenden Geometrie werden nun durch Schnittpunkte von Gitterlinien unterlegt.

Um nun das Ersetzen der einzelnen Maßzahlen durch die der jeweiligen Reaktorbaugröße zu erleichtern, werden alle Maßzahlen durch festgelegten Kurzbezeichnungen (Variablen) ersetzt. Eine programminterne Abfrage überprüft die gewählte

Reaktorbaugröße und ordnet dann den Variablen die zu der gewählten Baugröße gehörenden Maße zu. Nach diesen Maßen wird dann die Mutterzeichnung variiert.

Nachdem nun die gewünschte Reaktorgröße erstellt wurde, werden die für die Schraffur notwendige

gen Layer aktualisiert und die dadurch gekennzeichneten Linienzüge schraffiert.

Das Programm endet mit der Angabe des Zeichnungsmaßstabs auf dem alphanumerischen Bildschirm.

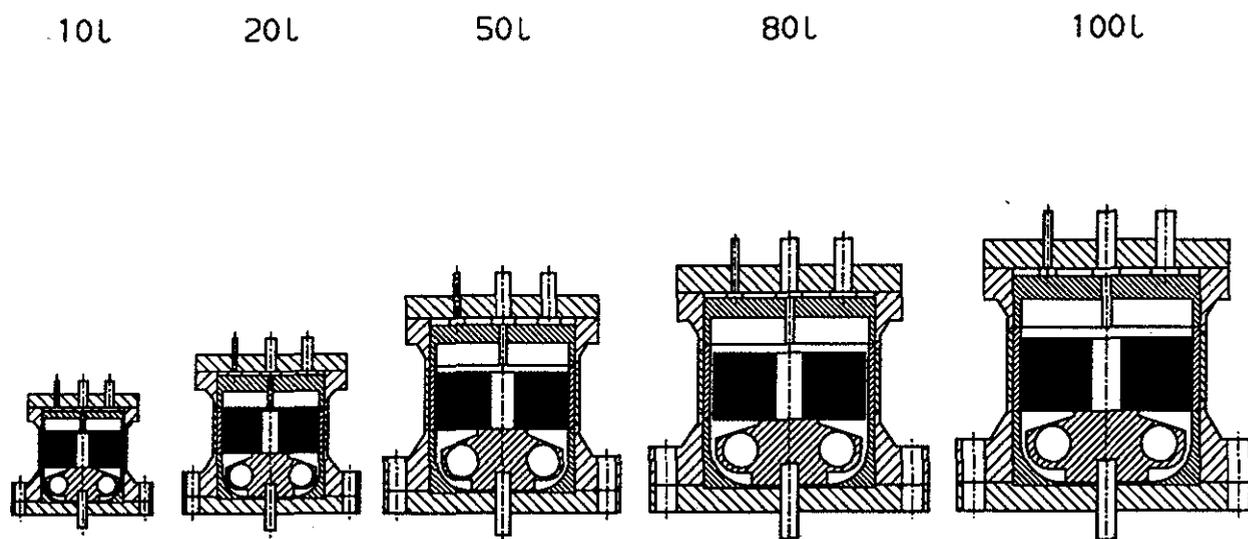


Bild 2.3.1 Darstellung der einzelnen Reaktorgrößen

### 3. Zusammenfassung

Am Beispiel der Niederdruck - Methanolsynthese soll im Rahmen eines Forschungsvorhabens für gradientenfreie Reaktoren ein Baureihen-Baukastensystem bis zu einem Katalysatorvolumen von  $1\text{m}^3$  entwickelt werden.

In einem Teilschritt dieses Vorhabens wird ein Scale-up, basierend auf den schon realisierten Reaktorgrößen von 1l und 10l Katalysatorvolumen, durchgeführt.

Um dies zu realisieren, wurde der 10l - Reaktor anhand seiner Konstruktionszeichnung in seine Grundform gebracht. Aus den wichtigsten geometrischen Abmessungen und den relevanten Prozeßgrößen wurden mit Hilfe der Dimensionsanalyse dimensionslose Kennzahlen gebildet und in einem Nomogramm dargestellt.

Anhand dieses Nomogramms ließen sich die Abmessungen und Prozeßgrößen für Reaktoren mit einem Katalysatorvolumen von 20l, 50l, 80l und 100l bestimmen.

Mit den so gewonnenen Abmessungen der einzelnen Reaktorgrößen wurde ein Programm für das CAD - System Prime Medusa 5.1 erstellt, welches dem Anwender die Festlegung der zu erstellenden Reaktorgröße und in Abhängigkeit davon die Auswahl des gewünschten Blattformats ermöglicht. Auch die Platzierung des Reaktors auf dem gewählten Blattformat steht dem Anwender frei.

Ausgehend von der durch das Programm erstellten Grundform des 10l - Reaktors als Mutterzeichnung, werden die jeweils gewählten Reaktorgrößen durch Ersetzen der Maßzahlen durch das Programm und anschließendes Variieren der Geometrie durch das Parametric - Modul des CAD - Systems erstellt.

## Der Datenaustausch zeichnungsrelevanter Daten

### Das Drafting - Konzept in STEP

Peter J. Kruse

In der Konstruktionspraxis bildet die Zeichnung trotz zunehmender Rechnerunterstützung eine grundlegende Informationseinheit zur Herstellung oder Änderung eines Produktes. Neben den geometrischen Daten werden hier auch organisatorische Hinweise (z.B. in der Zeichnungsnummer oder im Prüfvermerk), fertigungstechnische Vorgaben oder Hinweise zur Produktstruktur abgelegt. Mit den Zusatzinformationen aus der Stückliste, den Arbeitsplänen und weiteren Produktunterlagen ist das Produkt dann vollständig beschrieben.

Die fortschreitende Entwicklung der rechnerunterstützten Tätigkeiten im Produktionsablauf mit dem Ziel der Integration in ein CIM - Konzept (CIM = Computer Integrated Manufacturing) hat jedoch eine Änderung und Verlagerung der in einer technischen Zeichnung enthaltenen Informationen zur Folge.

Besonders deutlich wird diese Entwicklung bei der Betrachtung der dreidimensionalen Konstruktion. Sie führt als Ergebnis zu einem räumlichen Modell des zu konstruierenden Teiles. Wird nun an dieses Modell die begleitende Information zu diesem Produkt, wie z.B. Fertigungs-, Toleranz- oder Materialinformationen mit angefügt, so ergibt sich ein Datensatz, der das Produkt und seinen Entstehungsablauf vollständig beschreibt.

Dieser Produktmodellansatz wird international von CAD-Systemanwendern (CAD= Computer Aided Design) durch Definition und Normung vorangetrieben. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf der Austauschbarkeit der Konstruktionsdaten zwischen unterschiedlichen Rechnerumgebungen durch systemneutrale Schnittstellen (**Bild 1**).

Das Beispiel eines Großbetriebes mit zahlreichen Unterauftragnehmern, wie in der Automobilindustrie, macht das große wirtschaftliche Interesse an diesem Austausch von Produktinformationen deutlich. Dieses Ziel wird mit der Entwicklung der Schnittstelle **STEP** (Standard for the Exchange of Product Model Data) angestrebt /1/. Die zu einem Produkt gehörenden Informationen werden in Informationseinheiten, sogenannten *Entities*, formuliert und ihre Beziehungen untereinander festgelegt. So ergibt sich bei Verwendung einer Modellierungssprache wie z.B. NIAM oder EXPRESS ein Informationsmodell, das zur Auslegung der Prozessoren für die Datenübertragung dient.

Für den Datenaustausch von Zeichnungsinformationen sind seit der Einführung von CAD bereits mehrere Komponenten entwickelt worden. Die gebräuchlichen Schnittstellen sind IGES (Initial Graphics Exchange Standard, USA), SET (Standard d'Échange et de Transfert, Frankreich) und VDAFS (VDA-Flächenschnittstelle, Deutschland).

Die am weitesten verbreitete Schnittstelle ist IGES. Sie wurde in Amerika entwickelt und ist inzwischen im Lieferumfang vieler CAD-Systeme bereits enthalten. Der Schwerpunkt liegt hier auf dem Austausch von Zeichnungsdaten, in der fortschreitenden Entwicklung werden jedoch auch immer stärker weitere Produktionsdaten berücksichtigt.

Einige Nachteile von IGES sind (nach /1/)

- ein hoher Speicheraufwand auch für kleinere Zeichnungen, da IGES mit einem festen Dateiformat arbeitet;
- Informationsverlust bei der Übertragung durch Auflösen bestehender Assoziationen in der

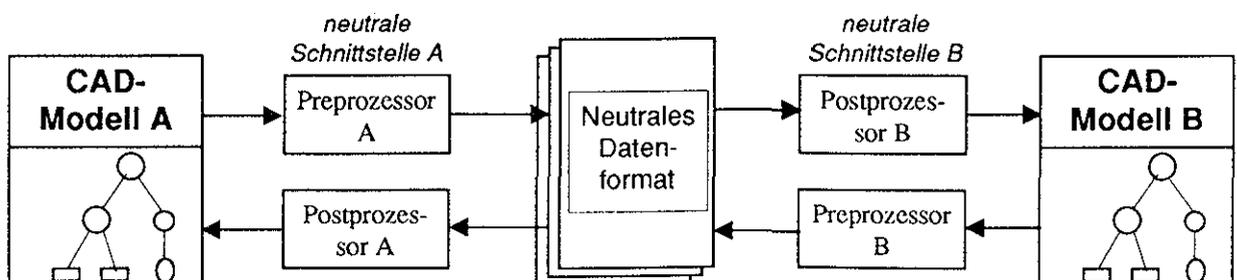


Bild 1: Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Rechnerumgebungen durch systemneutrale Schnittstellen

Zeichnung;

- Fehlinterpretation der IGES - Spezifikation durch ungenaue Beschreibung; dadurch Varianz bei der Prozessorprogrammierung /2/.

Aus den vielfach negativen Erfahrungen mit den bestehenden Schnittstellen heraus wurde von der ISO (ISO= International Standardisation Organisation) beschlossen, ein Komitee einzusetzen und mit der Entwicklung der Schnittstelle STEP zu beauftragen. Dabei wurde eine wissenschaftliche Vorgehensweise mit Analysen der vorhandenen Informationsgehalte von Produktdaten und deren Interpretation in Modellen vereinbart.

Da die vollständige Informationsmenge eines Produktes für eine Bearbeitungsgruppe zu komplex ist, sind Teilmengen definiert worden, die sogenannten Partialmodelle. Neben einem Geometriemodell, einem Toleranzmodell, einem Präsentationsmodell (Informationen zur grafischen Darstellung der Daten am Rechner) gibt es auch ein Partialmodell **Drafting**. Dieses Modell hat die Beschreibung der Inhalte technischer Zeichnungen zum Zweck des Zeichnungsaustausches zum Thema.

Der funktionelle Aufbau des Drafting-Teilmodells wird aus **Bild 2** deutlich. Die Größen, die die Kon-

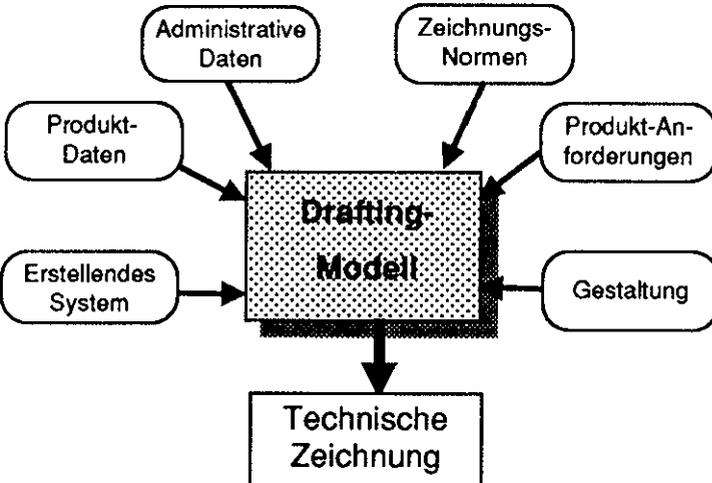


Bild 2: Funktioneller Aufbau des Drafting-Modells (nach /3/)

struktion direkt beeinflussen, sind:

- Das Zeichnungssystem, also das CAD-System, mit dem die Zeichnung erstellt worden ist;
- die Produktdaten aus dem Produktmodell;
- administrative Daten wie Zeichnungsnummer, Version usw.;

- Zeichnungsnorm nach DIN, ANSI, JNC ...
- Anforderungen an das Produkt aus Pflichtenheft, Anforderungsliste usw.;
- Gestalterische Vorgaben (Ästhetik)

Als Ergebnis wird die grafische Representation einer technischen Zeichnung erzeugt

Nach der Identifikation der die Zeichnung beeinflussenden Parameter muß deren Zugehörigkeit zu den

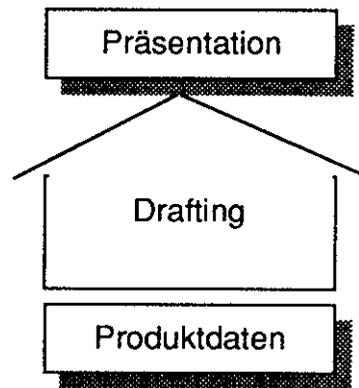


Bild 3: Einordnung des Partialmodells Drafting

einzelnen Partialmodellen geprüft werden. **Bild 3** zeigt die Stellung des Drafting Modells als Bindeglied zwischen Produktinformationen und ihrer Darstellung.

Nach der Drafting-Terminologie wird in folgende Informationsgruppen auf einer technischen Zeichnung unterschieden:

- *Geometrie* : Zeichnungselemente, die die wahre geometrische Ausprägung des dargestellten Teiles beschreiben; und
- *Annotation* : Zeichnungselemente, die Informationen außerhalb der reinen Geometriedarstellung enthalten. Hier sind z.B. Symbole, Text und der Zeichnungsrahmen zu finden.

Als Beispiel zur Modellierung sind die Strukturelemente höchster Ebene des Drafting-Modell in **Bild 4** aufgezeigt.

Das erste Element **drawing** faßt alle Dokumente eines Produktes zusammen, zu denen außer den Zeichnungen auch beispielsweise die Stücklisten gehören. In einem *drawing-Entity* sind ein oder mehrere **drawing\_sheets** enthalten. Hier sind nicht nur die reinen Zeichnungen gemeint, sondern

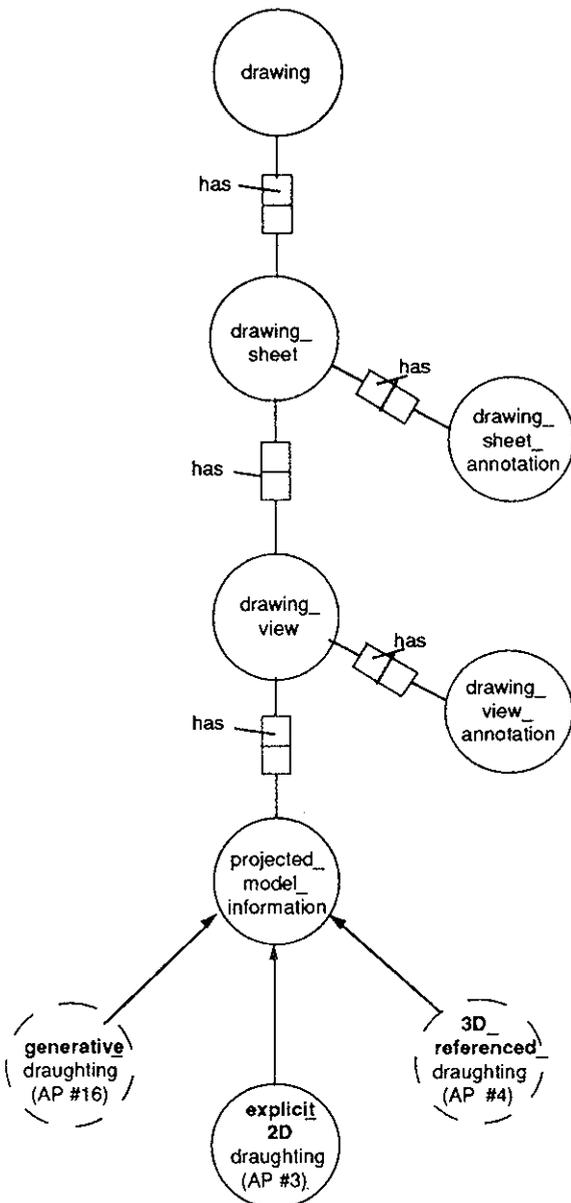


Bild 4: Informationseinheiten des Drafting-Modells /4/

auch z.B. die zu den Zeichnungen gehörenden Stücklisten. Informationen, die nur zu dem Zeichnungsblatt gehören und von der Produktgeometrie unabhängig sind, werden in der **drawing\_sheet\_annotation** definiert. Sie beschreibt z.B. den Zeichnungsrahmen und das Schriftfeld.

Die Geometrie des dargestellten Teiles ist in einer **drawing\_view**, also einer Ansicht, enthalten, die neben der Geometrie aber auch nichtgeometrische Informationen enthält. So sind in der **drawing\_view\_annotation** z.B. beschreibender Text und Symbole festgelegt, die zu der Ansicht gehören.

In jede Ansicht gehen nun **projected\_model\_in-**

**formation** ein. Diese Informationen sind abhängig von der Art der Zeichnung, die in unterschiedlichen Leistungsstufen des Drafting-Modells Berücksichtigung findet. Das **explicit\_2D\_drafting** dient zum Austausch von zweidimensionalen Zeichnungen, die keine Beziehung zum Produktmodell besitzen. Das **3D\_referenced\_drafting** enthält Informationen, die vom Produktmodell abgeleitet werden, und das **generative\_drafting** bietet generative Möglichkeiten, z.B. das automatische Erzeugen von Bemessungen.

Das heutige Entwicklungsstadium der CAD-Systeme läßt eine Realisation von 2D und 3D Drafting-Möglichkeiten zu, der generative Aspekt kann jedoch erst in einigen Jahren umgesetzt werden.

Basierend auf den heutigen Realisationsmöglichkeiten wurden für das Drafting-Modell Realisationsebenen definiert, die eine stufenweise Umsetzung des Modells in die Schnittstellenspezifikation STEP zulassen. Folgende Level sind vorgesehen:

**LEVEL 0** : Auf dieser Ebene ist nur der Austausch eines Plotfiles möglich; Strukturen, Assoziationen usw. sind nicht übertragbar.

**LEVEL 1** : Diese Realisationsstufe umfaßt das *explicit\_2D-Drafting*. Nur zweidimensionale Geometrie ist vorgesehen; eine Beziehung zum Produktmodell besteht nicht.

**LEVEL 2** : In dieser Ebene wird das *3D\_referenced\_drafting* definiert. Ein Bezug zum Produktmodell ist gegeben.

**LEVEL 3** : Diese Stufe beschreibt die generativen Möglichkeiten des Drafting. Eine Realisation ist noch nicht vorgesehen.

Um diese verschiedenen Realisationsebenen durch ein Modell beschreiben zu können, ist eine aufeinander aufbauende Modellstruktur erforderlich. Die erste und grundlegende Stufe dieser Struktur ist das eigentliche Drafting-Modell, das sogenannte **Resource-Modell** /5/. Hier sind die Informationseinheiten so abgelegt, daß sie alle oben definierten Level des Zeichnungsaustausches abdecken. Unabhängig von dem Anwendungsgebiet, in dem eine Zeichnung erstellt wird, kann es durch dieses Modell

beschrieben werden. Parallel existiert ein **Information-Model** /6/, das die Strukturen des Resource Modells erklärt und mit Beispielen belegt. Besonders in der noch andauernden Entwicklungsphase sind diese Erklärungen sehr wichtig.

Da die einzelnen Anwendungsgebiete technischer Zeichnungen unterschiedliche Schwerpunkte im Resource Modell adressieren und daher auch applikationsspezifische Besonderheiten benötigen, werden **Application Protocols (AP's)** erstellt. Diese Modelle werden von Experten der jeweiligen Fachgebiete definiert und in Zusammenarbeit mit den Entwicklern des Resource Modells vervollständigt. Dafür sind feste Regeln von der ISO vorgegeben /7/. Die Anforderungen der AP-Entwicklung an das Resource - Modell werden in dem Modell eingearbeitet und machen es auf diese Weise konsistent. Aus diesem Grund vereinbarte das internationale Komitee der ISO, die Einführung der STEP-Spezifikation durch Definition von Anwendungs-Protokollen zu erreichen.

Die Zusammenhänge der einzelnen Modelle ist in **Bild 5** dargestellt.

Da vom ISO-Komitee beschlossen worden ist, daß die erste Version der STEP-Schnittstelle nicht ohne Drafting - Möglichkeiten veröffentlicht werden

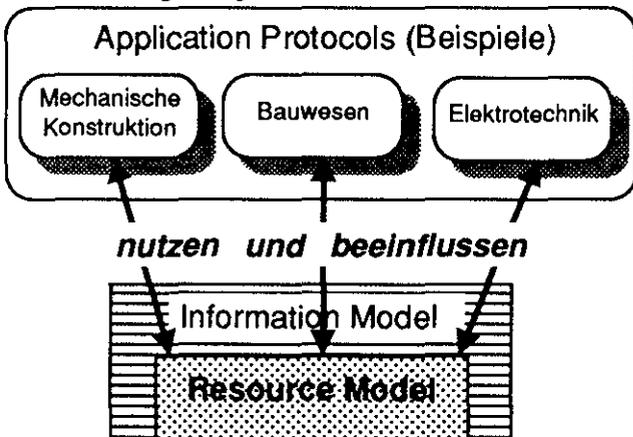


Bild 5: Zusammenhang der Modellebenen

soll, sind im Bereich des Drafting zur Zeit zwei AP-Entwicklungen in Bearbeitung. Ihre Auswahl wurde nach Befragung der im STEP-Projekt mitarbeitenden Länder vorgenommen. Sie sind in Bild 4 bereits dargestellt: Der *explicit\_2D\_drafting* Umfang sowie der *3D\_referenced\_drafting* Bereich. Die Entwicklung des 2D-Protokolls wird von europäischer Seite

unter deutscher Leitung durchgeführt, das 3D-Protokoll wird in den USA unter Leitung der Industrie entwickelt. Als Vorgabe für die Modelle ist lediglich festgelegt, daß sie mindestens den Umfang der bereits existierenden Schnittstellen-Spezifikation IGES abdecken müssen.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß die vorgesehene Entwicklung des Drafting-Modells im Rahmen der STEP-Spezifikation für den Anwender eine Vielzahl von Vorteilen bringt. Durch die vollständigen Austausch aller zeichnungsrelevanten Daten wird die Mehrarbeit beim Empfänger reduziert und die gleiche Arbeitsunterlage von allen an der Produktentstehung beteiligten Bereichen verwandt. Außerdem ist durch die Festlegung zukünftiger Möglichkeiten im Zeichnungsaustausch wie z.B die generativen Prozesse eine Beeinflussung der CAD-Systementwicklung ermöglicht.

Der entscheidende Vorteil liegt jedoch in der internationalen Zusammensetzung des ISO-Gremiums. Wird die Spezifikation zur ISO-Norm erklärt, so verringern sich die Probleme des Datenaustausches zwischen den Systemen der einzelnen Länder. CAD-Entwicklungen, die bisher länderspezifisch konzipiert waren, sind dann auch international für die Anwender interessant, da eine internationale Schnittstelle zur Kommunikation vorhanden ist.

Obwohl bei vollständiger Normung des angestrebten Umfangs von STEP die technische Zeichnung als Informationsträger im Produktionsablauf stark an Bedeutung verlieren wird, da sämtliche Informationen direkt im Rechnernetz den bearbeitenden Stellen zugeleitet werden sollen, ist im Augenblick und für die nächsten Jahre auf den Informationsträger technische Zeichnung und die hier beschriebenen Entwicklungen nicht zu verzichten.

**Literatur:**

/1/ Grabowski, H und Glatz, R:  
Schnittstellen zum Austausch produktdefinierender Daten  
VDI-Z 128 (1986) S. 333-343



# Verschleißuntersuchungen an Zahnwellenverbindungen

G. Schäfer

Ausgehend von vorangegangenen Arbeiten in Darmstadt /1/ befaßt sich das Institut für Maschinenwesen seit 1980 mit der Erforschung des Betriebs- und Tragfähigkeitsverhaltens von Zahnwellenverbindungen. Die Forschungsarbeiten werden gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA). Im folgenden sollen kurz die derzeit laufenden Vorhaben vorgestellt werden.

## 1. Einleitung

Für die sichere Auslegung von Zahnwellenverbindungen ist die genaue Kenntnis der die Lebensdauer beeinflussenden Parameter unabdingbar. Eng verbunden mit der Lebensdauer von Zahnwellenverbindungen ist deren abrasiver Verschleiß, in dessen Folge es schließlich zum Verlust der Funktion

"Drehmoment übertragen" kommt. Dieser Zeitpunkt stellt die äußerste Grenze der Lebensdauer einer Zahnwellenverbindung dar, bereits vor Erreichen dieser Grenze kann vergrößertes Spiel, Einschränkung der Verschieblichkeit oder der sogenannte "Treppenverschleiß" die Lebensdauer der Verbindung begrenzen. Handelt es sich um eine Zahnwellenverbindung mit Preßsitz, so ist nach einer kurzen Zeit des Verschleißfortschritts die Preßpassung zerstört und die Verbindung kann axial gleiten. Das Ausfallkriterium muß also für den jeweiligen Anwendungsfall durch den Konstrukteur festgelegt werden. Diesem Ausfallkriterium wird für die Berechnung ein zulässiger Flankenverschleiß zugeordnet, der dem Einsatzfall der Verbindung entspricht. Im Gegensatz zu den früheren Vorstellungen einer "zulässigen Flächenpressung" bildet der Verschleiß,

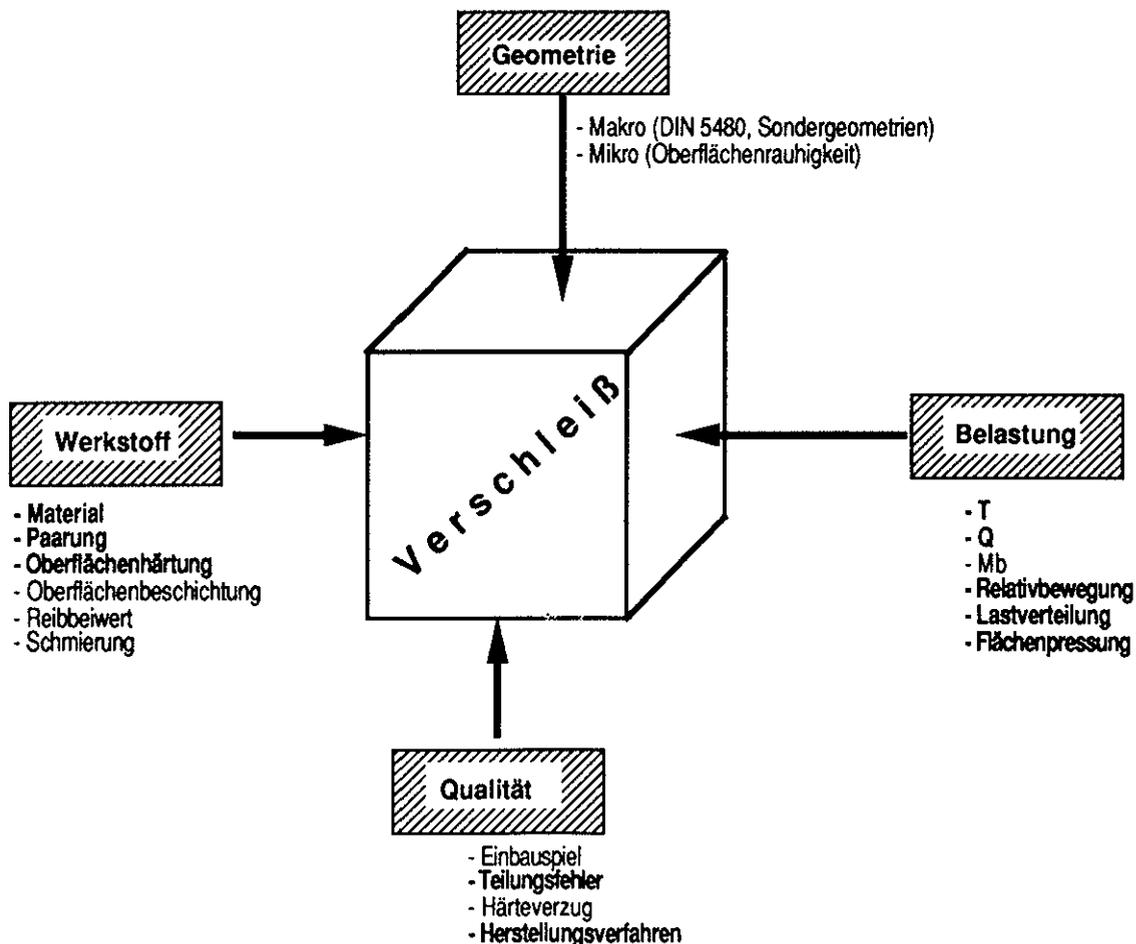


Bild 1.1: Einflüsse auf den Verschleiß von Zahnwellenverbindungen

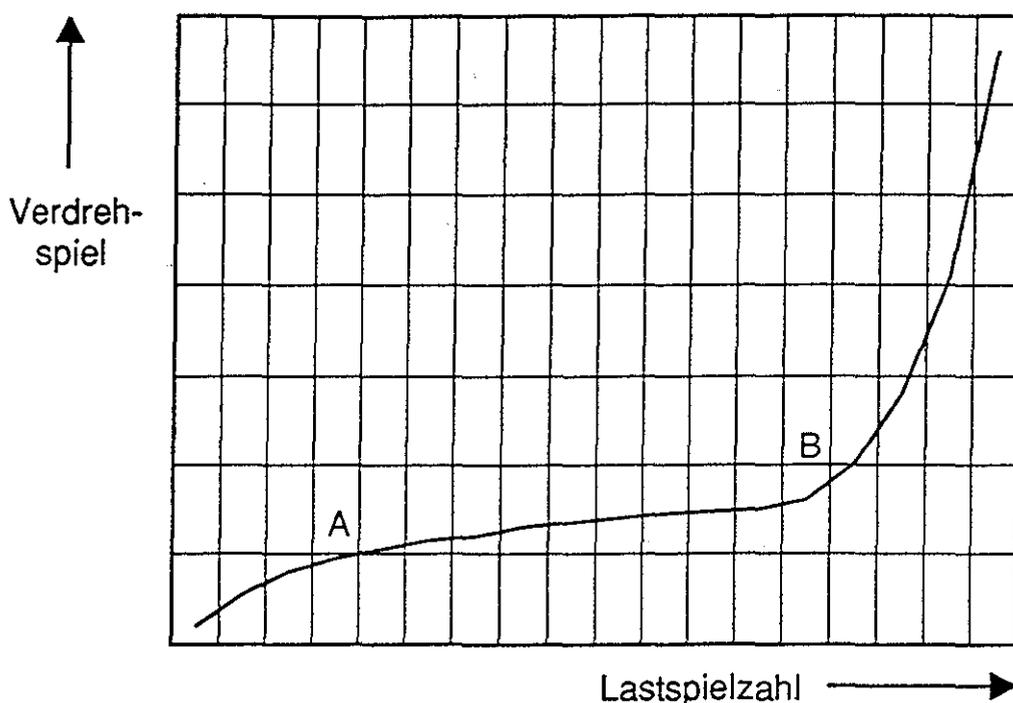
der von den in **Bild 1.1** dargestellten Parametern abhängt, den Ansatz für eine Lebensdauerberechnung von Zahnwellen. Die in Bild 1.1 fett gedruckten Parameter waren Gegenstand der Untersuchungen des letzten Jahres. Im Bereich der Werkstoffe wurden 4 verschiedene Materialien (16MnCr5, 42CrMo4, 25MoCr4e, C35) eingesetzt. Die Proben aus 25MoCr4e und C35 standen auch in gasnitriertem Zustand zur Verfügung, sodaß auch der Einfluß der Oberflächenhärtung untersucht werden konnte. Der Einfluß der Paarung auf das Verschleißverhalten wurde durch die Variation der Welle-/Nabe-Kombination bezüglich ihrer Werkstoffe und Oberflächenhärtung bestimmt.

Im Bereich der Qualität wurde der Einfluß der Teilungsfehler untersucht, wobei hier ein Schwerpunkt auf die umfangreichen Vermessungen der Zahnflanken in den verschiedenen Verschleißstadien gelegt wurde.

Als wichtigster Einfluß wurde die Belastungskombination aus Torsion und Querkraft und die sich damit einstellenden Relativbewegungen variiert. Die Problematik der Lastverteilung wurde von der meßtechnischen Seite aus angegangen, indem die lokalen Abtragsraten auf den Zahnflanken bestimmt wurden.

## 2. Einlaufverschleiß

Die Lebensdauer einer Zahnwellenverbindung ist durch das Erreichen bestimmter Verschleißbeträge begrenzt. In **Bild 2.1** sind zwei charakteristische Punkte auf der typischen Verschleißkurve einer solchen Verbindung eingetragen. Der Punkt A markiert das Ende des Einlaufverschleißes. Für Einsatzfälle mit Festsitz kann diese Grenze schon die Lebensdauer darstellen, da darüber hinaus das Übermaß durch die Verschleißzunahme aufgehoben wird. In den meisten Fällen wird der Punkt B die Lebensdauerergrenze markieren, insbesondere bei Zahnwellenverbindungen mit Schiebeseitz, da ab diesem Punkt der sogenannte Endverschleiß mit exponentiell zunehmenden Verschleißraten beginnt. Der Bereich zwischen den Punkten A und B, die sogenannte Verschleißtieflage, ist durch die kleinsten Abtragsraten während der Gesamtlaufzeit gekennzeichnet. Der Anteil der Verschleißtieflage an der Gesamtlaufzeit liegt bei überwiegend drehmomentbelasteten Verbindungen zwischen 50% und annähernd 90%. Für die rechnerische Erfassung des Verschleißfortschritts ist die Kenntnis der Verschleißmechanismen in den verschiedenen Laufzeitbereichen notwendig. Die konstante Abtragsrate im Bereich der Verschleißtieflage deutet auf einen quasistatischen



**Bild 2.1:** Verschleißfortschritt in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl

abrasiven Verschleiß der Flanken hin. Der zugrundeliegende Verschleißmechanismus ist zum Ende des Einlaufverschleißes ausgebildet und bleibt während der Verschleißtieflage unverändert. Zur Bestimmung des Punktes A und damit für die Erforschung der Verschleißmechanismen wurde daher das Phänomen des Einlaufverschleißes genauestens untersucht. Es wurde dabei auf verschiedenen Wegen vorgegangen. Die experimentellen Untersuchungen zum Einlaufverschleiß, die inzwischen zum Ende kommen, werden auf drei Arten ausgewertet. Als erstes wird nach jedem Laufzeitintervall in eingebautem Zustand das Verdrehspiel der Verbindung gemessen. Danach werden die nach jedem Intervall ausgebauten Verbindungen gereinigt und die Flanken optisch begutachtet und fotografiert. Als drittes und aufwendigstes Auswerteverfahren wird die gesamte Verzahnungsgeometrie mit Hilfe einer Koordinatenmeßmaschine ZEISS UMM 550 vermessen. Der erhebliche Aufwand ist jedoch durch die erzeugte Informationsmenge durchaus gerechtfertigt. Auf diese Weise können Einzel- und Summenteilungsfehler sowie lokale Abtragsraten der einzelnen Flankenoberflächenpunkte bestimmt werden. Ferner werden Änderungen in der Verzahnungsgeometrie (Flankenprofil und Flankenlinie) erfasst. Die Bestimmung der lokalen Abtragsraten brachte entscheidende Erkenntnisse zum Verschleißverhalten, als Stichwort sei an dieser Stelle das wechselnde Tragen nur einiger weniger Zähne genannt

**3. Einfluß von Oberflächenhärte und Werkstoff**

In Prüfstandsversuchen wurden zwei verschiedene Zahnwellenverbindungen unterschiedlicher Größe und insgesamt sechs Werkstoffen für Welle und Nabe eingesetzt.

Neben den Verbindungen der Größe 50 x 2 x 24 DIN 5480 mit einer gemeinsamen Verzahnungsbreite von L = 38 mm und den Werkstoffen 42CrMo4 für die Welle und 16MnCr5 für die Nabe im ungehärteten Zustand laufen in den Verspannungsprüfständen Torsionsdämpfer-Antriebswellen der Größe 45 x 2 x 21 DIN 5480 mit einer Verbindungslänge von L = 40 mm, wobei es sich in beiden Fällen um wälzgefräste

Wellen und geräumte Naben handelt. Die Welle der kleineren Verbindung besteht aus 25MoCr4 und die Nabe aus C35. Beide Verbindungselemente sind im Anlieferungszustand gasnitriert. Es konnte aber auch auf ungehärtete Wellen und Naben zurückgegriffen werden, die vorzeitig dem Produktionsprozeß entnommen wurden, um so ein größeres Spektrum an Werkstoffen bzw. Oberflächenhärten zu erhalten.

Als erstes Härteverfahren wurde das Gasnitrieren untersucht. Konkurrierende Verfahren bestehen im Einsatzhärten und Badnitrieren. Einsatzgehärtete Verbindungen werden nicht untersucht, da sie nach dem Härten dem kostspieligen Schleifen unterworfen sind. Dieses Verfahren findet bei aufgeschumpften Verbindungen - z.B. in der Automobilindustrie - seine Anwendung, da es hier auf besonders geringe Teilungsabweichungen und glatte Flankenoberflächen ankommt, wird aber aufgrund des Zeit- und Kostenaufwands für Schiebesitze nicht berücksichtigt. Das Badnitrieren, das auf den ersten Blick durch die größere Einsatzhärte und die Oberflächenausbildung gegenüber dem Gasnitrieren geeigneter erscheint, hat aufgrund der Ausmusterung der Nitrierbäder in den meisten Firmen aus Umweltschutzgründen an Bedeutung verloren.

Von besonderem Interesse sind Erkenntnisse, ob durch eine Oberflächenhärtung der Verschleißfortschritt entscheidend beeinflussbar ist. Hierzu wurden alle denkbaren Paarungen der Welle aus 25MoCr4 und Nabe aus C35 zusammengestellt und im Prüfstand bei gleicher Last untersucht. Die folgende Tabelle zeigt die untersuchten Kombinationen.

	Welle	Nabe
W 121	gefräst, gehärtet 60 HRC	geräumt, ungehärtet
W 122	gefräst, ungehärtet	geräumt, gehärtet 50 HRC
W 123	gefräst, gehärtet 60 HRC	geräumt, gehärtet 50 HRC
W 124	gefräst, ungehärtet	geräumt, ungehärtet

Die Verschleißverläufe für die Zahnwellenverbindungen

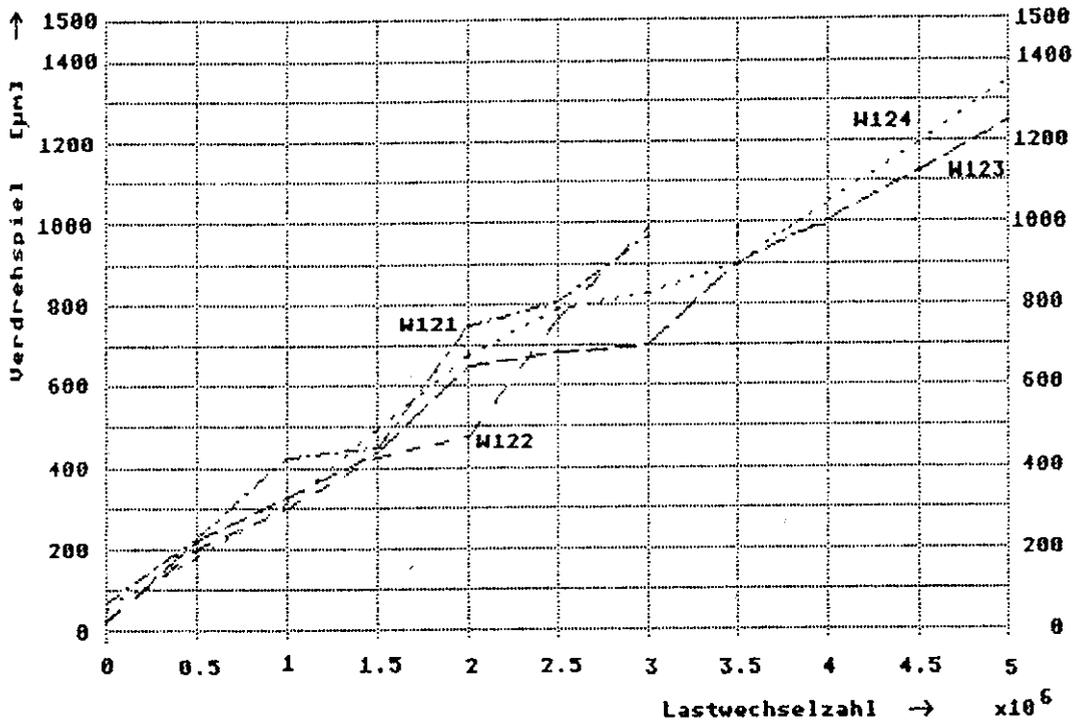


Bild 3.1: Einfluß der Oberflächenhärte auf den Verschleißverlauf von Zahnwellenverbindungen unter gleicher Last

dungen gehen aus Bild 3.1 hervor. Das Ergebnis überrascht, da offensichtlich durch das Härten bei der aufgetragenen Belastung mit überwiegendem Drehmoment keinerlei Erfolg erzielt wird. Völlig unabhängig von Härte und Werkstoff nimmt der Ver-

schleiß im gleichen Maß zu und zwar gleichmäßig bei Welle und Nabe, selbst wenn eine gehärtete Welle aus 25MoCr4 und eine ungehärtete Nabe aus C35 zusammen laufen.

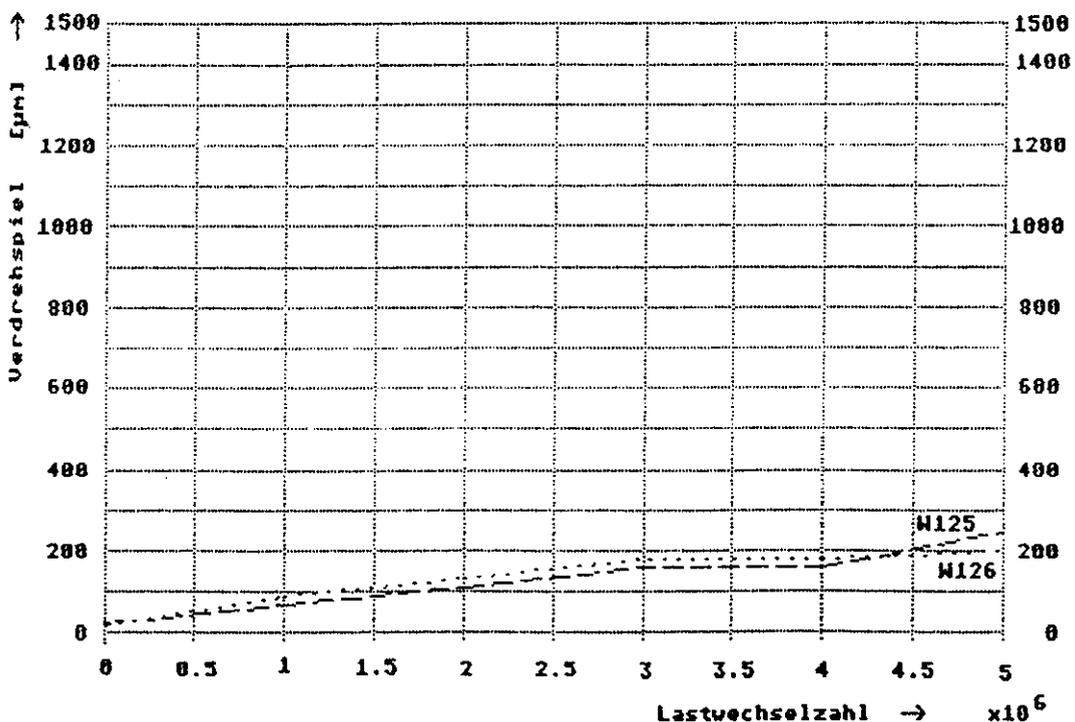


Bild 3.2: Verschleißverhalten bei weit überwiegendem Drehmoment; W125: ungehärtete Verbindung; W126: gehärtete Paarung

In einem weiteren Versuchslauf mit einer ungehärteten und gehärteten Verbindung wurde die Belastung geändert. Bei einem Drehmoment von  $T = 900$  Nm und einer Querkraft von  $Q = 3000$  N - das entspricht einem ideellen Radius von  $R_i = 300$  mm gegenüber  $R_i = 100$  mm im vorherigen Lauf - konnte ebenfalls kein nennenswerter Unterschied im Verschleißverhalten beobachtet werden (**Bild 3.2**). Es wird aber deutlich, daß sich trotz einer höheren Flächenpressung von nun ca.  $p_{\max} = 900$  N/mm<sup>2</sup> ein erheblich geringerer Verschleißfortschritt aufgrund der außerordentlich kleinen Relativbewegungen zeigt.

#### 4. Berechnung der Flächenpressung

Wenn man von den bisher üblichen Dimensionierungsverfahren ausgeht, dann ist die erste Frage, die sich der Anwender bei der Auslegung einer Zahnwellenverbindung stellt, die Frage nach der herrschenden Flächenpressung. Mit den bisher bestehenden Berechnungsansätzen nach Niemann /4/ oder DIN 5466 E (1983) /5/ werden erheblich zu niedrige Flächenpressungen berechnet. Grund dafür ist die Vernachlässigung der Einflüsse der Steifigkeiten, des Flankenspiels und der Teilungsfehler auf die Lastverteilung in der Verbindung. Die im Rahmen der FVA 99 -Vorhaben durchgeführten Untersuchungen wurden nach dem damals modernsten Berechnungsverfahren so ausgelegt, daß ein Vergleichswert der Flächenpressung von 37 N/mm<sup>2</sup> eingehalten wurde. Die Untersuchungen zeigten sehr schnell, daß die in den Dauerversuchen erzeugten Abriebe und die verschleißbedingten Veränderungen des Betriebsverhaltens mit diesem Berechnungsansatz nicht erklärbar sind.

Im Verlauf des Vorhabens 99 wurden umfangreiche Untersuchungen mit Hilfe der Rechnersimulation zum Einfluß der Parameter Steifigkeit, Flankenspiel und Teilungsfehler durchgeführt. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wurde begonnen eine neue DIN 5466 zu erstellen. Die Berechnung der Flächenpressung nach dieser neuen Norm liefert aufgrund der Berücksichtigung der Lastaufteilung über dem Umfang und der Verbindungslänge Werte, die einen direkten Vergleich mit den Werkstoffkennwerten der Zahnradauslegung erlauben. Dadurch ist es möglich die gesamten bestehenden Werkstoffda-

tenbanken aus dem Bereich der Zahnradauslegung zu nutzen.

Durch die Fülle der Einflußfaktoren sind die Berechnungsansätze zur Zeit noch nicht als anwenderfreundlich einzustufen. Das Hauptproblem bei der Anwendung besteht darin, die Größe der Einflüsse aus Lastfall, Einbaubedingungen und Herstellung für den Anwendungsfall korrekt zu bestimmen. Wenn dieser Input für die Berechnung durch den Konstrukteur erstellt worden ist, kann in noch zu erstellenden Auslegungsdiagrammen und Programmen die Haltbarkeit der Verbindung überprüft werden.

#### 5. Gestaltfestigkeituntersuchungen

Neben den Untersuchungen zum abrasiven Verschleiß, die durch die FVA gefördert werden, führt das Institut für Maschinenwesen auch Forschungen auf dem Gebiet der Gestaltfestigkeit von Zahnwellenverbindungen durch. Hierbei wird speziell die Zahnfußfestigkeit untersucht. Diese Aktivitäten werden von der DFG unterstützt. In **Bild 5.1** ist der Gestaltfestigkeitsprüfstand prinzipiell dargestellt. Die Hauptkomponente des Prüfstandes, der hydraulische Drehschwingantrieb für Frequenzen bis zu 400 Hz und einem Nenndrehmoment von 1000 Nm, wurde in Zusammenarbeit mit der Firma GLYCO-Antriebstechnik entwickelt. Bei der Prüfstandkonstruktion wurde besonderer Wert auf die universelle Anwendbarkeit der Probeneinspannung gelegt, da im Rahmen dieses Vorhabens Proben mit unterschiedlichen Anschlußgeometrien eingespannt werden müssen. Im Verlauf dieses Vorhabens sollen Gestaltfestigkeitschaubilder für Zahnwellenverbindungen erstellt werden. Da in den Versuchen nur eine begrenzte Zahl von Werkstoffen eingesetzt werden kann, soll anhand dieser Ergebnisse ein Verfahren aufgestellt werden, daß es erlaubt für jeden Werkstoff das Gestaltfestigkeitschaubild der Zahnwellenverbindung aus dem des glatten Probenstabes zu erstellen. Im zweiten Schritt soll dann die Kerbwirkung der Fußausrundung untersucht werden. Daran schließt sich eine Geometrieoptimierung der Fußausrundung an. Der vierte Schritt beinhaltet die Untersuchung des Längeneinflusses auf die Lastverteilung in der Verbindung. Dazu werden unterschiedlich lange Zahnwellenverbindungen mit verschiedenen Drehmomentmaximalwerten belastet. Geplant

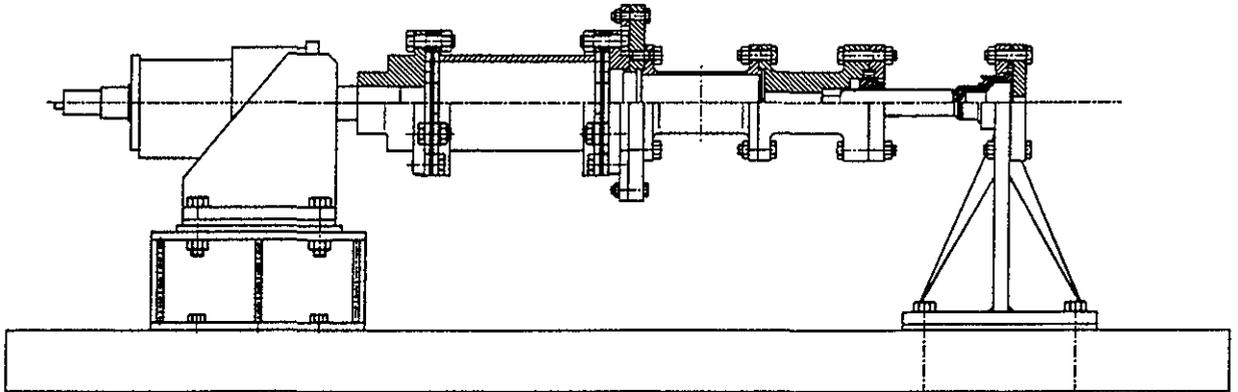


Bild 5.1: Prinzipskizze des Gestaltfestigkeitsprüfstandes

sind außerdem Untersuchungen zum Einfluß des Spiels und der Toleranz auf das dynamische Verhalten von Zahnwellenverbindungen. Dabei soll insbesondere der Effekt des "Aufschlagens" der Flanken bei größerem Spiel untersucht und die damit verbundenen dynamischen Einflüsse auf die Gestaltfestigkeit der Verbindung bestimmt werden. In der Frage des Toleranzeinflusses soll untersucht werden, ob die durch die Teilungsfehler bewirkte ungleichförmige Aufteilung der äußeren Belastung auf die einzelnen Zahnpaare einen entscheidenden Einfluß auf die Gestaltfestigkeit der Verbindung hat.

## 6. Literaturverzeichnis

- /1/ Dietz, P.: Die Berechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen, Büttelborn 1978, Selbstverlag des Verfassers
- /2/ Zapf, R.: Betriebs- und Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen mit Schiebesitz, Dissertation, TU Clausthal, August 1986
- /3/ Villmer, F.J.: Zum Mechanismus der Lastverteilung in Zahnwellenverbindungen, Dissertation, TU Clausthal, 1984
- /4/ Niemann, G.: Maschinenelemente, Band I, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag 1982
- /5/ DIN 5466: Normentwurf, Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen, 1983

# Untersuchung viskoelastischer Probleme unter Einsatz von Spannungsoptik Moiré und digitaler Bildverarbeitung

G. Wan  
J. Albers

## 1. Einleitung

Bei einem Prallzerkleinerungsprozeß tritt häufig das viskoelastische Verhalten des Mahlgutes bei einer Temperaturerhöhung auf. Die Folge davon ist, daß die Zähigkeit des Mahlgutes steigt und dadurch der Wirkungsgrad des Prallmahlprozesses sinkt.

Bei einer Gestaltungsoptimierung eines Aggregatträgers versucht man, die hochfrequenten Körperschallanteile durch mehrfache Reflexion im Aggregatträger abzdämpfen. Auch hier ist wichtig, das dynamische Dämpfungsverhalten des Materials zu kennen.

Aus diesen Grunde sollte eine Untersuchung über das viskoelastische Verhalten der Spannungswellen durchgeführt werden. Dazu gehören die Herstellung eines spannungsoptisch aktiven viskoelastischen Materials und die Ermittlung der statischen bzw. dynamischen Kenndaten. Mit den gewonnenen Daten ist dann eine Ganzfeldanalyse der untersuchten Modelle unter Anwendung von Spannungsoptik, Moiré und digitaler Bildverarbeitung möglich.

## 2. Viskoelastische Erscheinungen:

In einem viskoelastischen Material sind bei vorgegebener Beanspruchung die resultierenden Verformungen zeitabhängig und umgekehrt. Die bekannten Erscheinungen sind das Kriechen, bei dem die Dehnung bei einer konstanten Belastung anwächst und die Relaxation, bei der die Spannung gegen eine konstant gehaltene Dehnung nachgibt. (Bild 1,2) Der Zusammenhang des viskoelastischen Spannung-Dehnungsverhältnisses wird durch eine sogenannte nachlassende Gedächtnisfunktion über eine Integration dargestellt.

$$\epsilon(t) = \int_{-\infty}^t K_{\sigma}(t - \tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \quad (1)$$

Der dynamische viskoelastische Effekt ist zunächst durch eine Phasenverschiebung zwischen der auftretenden Spannung und Dehnung charakterisiert. (Bild 3) Andererseits zeichnet sich durch eine hohen Materialdämpfung unter hoch dynamischer Beanspruchung ab. (Bild 4)

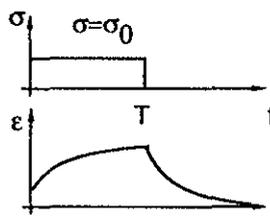


Bild 1 : Das Kriechen

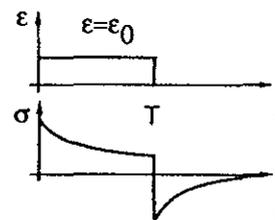


Bild 2 : Die Relaxation

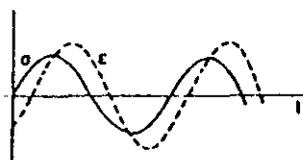


Bild 3 : Die Phasenverschiebung bei einer Schwingung

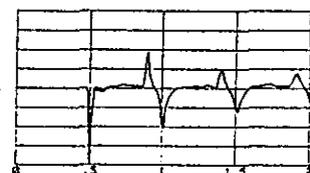


Bild 4 : Die Dämpfung der Spannungswellen

Mathematisch wird das Spannungs-Dehnungsverhältnis durch einen frequenzabhängigen komplexen Modul verknüpft:

$$\sigma(\omega) = E(\omega)\epsilon(\omega) \quad (2)$$

$E(i\omega)$  besteht aus einem realen und einem imaginären Teil bzw :

$$\begin{aligned} E(i\omega) &= E_1(\omega) + iE_2(\omega) = E_1(\omega) \left[ 1 + i \frac{E_2(\omega)}{E_1(\omega)} \right] \\ &= E_1(\omega) [1 + i \tan(\varphi(\omega))] = E_1(\omega) [1 + i\beta] \\ \text{mit } \varphi(\omega) &= \arctan\left(\frac{E_2(\omega)}{E_1(\omega)}\right) \quad \beta = \tan[\varphi(\omega)] \end{aligned} \quad (3)$$

Das Verhältnis zwischen der Kriech- bzw. Relaxationsfunktion und dem komplexen Modul lautet:

$$\begin{aligned} R(t) &= \int \frac{E(i\omega)}{i\omega} e^{i\omega t} d\omega \\ E(\omega) &= \int \frac{dR(t)}{dt} e^{-i\omega t} dt \end{aligned} \quad (4)$$

Der komplexe Modul läßt sich bei niedriger Frequenz durch eine Messung der Phasenverschiebung bei einem Schwingungsversuch mit systematischen Anregungsfrequenzen feststellen. Die hoch dynamischen Kenndaten, z.B. die Dämpfung bzw. den E-Modul können durch Messung der Amplituden- und Geschwindigkeitsänderung der

Spannungswellen in einem stoßbelasteten Stab ermittelt werden.

### 3. Ermittlung der statischen Kenndaten:

Wenn die Belastung nur bei  $t=0$  aufgebracht und dann konstant gehalten wird (Wie in Bild 1), wird die Spannungsverlauf wie folgt beschrieben :

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \text{step}(t) = \begin{cases} \sigma_0 & t > 0_+ \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = \sigma_0 \cdot \delta(t) = \begin{cases} \sigma_0 & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Für diesen Fall gilt :

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \cdot \int_0^t K_e(t-\tau) \delta(\tau) d\tau \quad (6)$$

Die Kriechfunktion  $K_e(t)$  läßt sich bei konstant gehaltener Belastung feststellen.

$$K_e(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (7)$$

Eine Näherungslösung für die Relaxationsfunktion lautet:

$$R_e(t) = \frac{1}{K_e(t)} \quad (8)$$

Da die viskoelastische Erscheinung bei erhöhter Temperatur ausgeprägter ist, wird der Versuch in einem Ofen bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt.

Im Zugversuch werden die Längs- und Querdehnung und die Intensität der spannungsoptischen Doppelbrechung aufgenommen.

### 4. Ermittlung der dynamischen Kenndaten

Die hoch dynamischen Kenndaten, z.B. die Dämpfung bzw. den E-Modul können durch Messung der Amplituden- und Geschwindigkeitsänderung der Spannungswellen in einem stoßbelasteten Stab ermittelt werden.

Als Probe wird ein rechteckiger Stab ( $450 \times 10 \times 10$  mm) verwendet. Der Stab wird unter Stoß belastet. Es werden zwei Dehnungsmeßstreifen in einem Abstand von 250 mm in Längsrichtung appliziert, um die Dehnungen der Longitudinalwellen zu messen.

Die Stoßbelastung erfolgt durch einen kleinen zylinderförmigen Amboß, auf den eine mittels Druckluft beschleunigte Kugel prallt.

Der Amboß überträgt seinen Impuls auf die Stirnseite einer stabförmigen Probe mit quadratischem Querschnitt ( $10 \times 10$  mm). Die Gesamtlänge der Probe beträgt 465 mm. Ein Umkippen wird durch seitliche Abstützungen verhindert, so daß sich die Position des Modells nach der dynamischen Belastung nicht verändert.

Die Probe befindet sich in einem kleinen Ofen, der Untersuchungen bis zu Temperaturen von  $80^\circ\text{C}$  zuläßt. Auf seinen Stirnseiten ist er mit Glasscheiben versehen, um spannungsoptische Aufnahmen zu ermöglichen. Die auftretenden Dehnungen werden mit DMS aufgenommen, wobei die Brückenspannung 1 V beträgt, um eine Erwärmung der Meßstelle auszuschließen.

Die Meßwerterfassung erfolgt durch eine Zuordnung von DMS-Verstärker, digitalem Oszillographen und Meßrechner. Aufgrund des großen angelegten Frequenzspektrums (über 50000 Hz) tritt an die Stelle des Trägerfrequenzverstärkers ein Gleichspannungsverstärker. Die Stoßdauer beträgt 20 bis 30  $\mu\text{s}$ , die Meßsignale werden mit einer Abtastfrequenz von 10 MHz aufgenommen, die Speicherkapazität für jedes Signal beträgt 8000 Datenpunkte, die Datentiefe ist 12 Bit. Die Steuerung und Regelung der einzelnen Funktionen sowie die Auswertung der Meßdaten übernimmt ein Rechnerprogramm.

Die Welle kann theoretisch wie folgt dargestellt werden.

$$U(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} A_j \cdot \exp[-i(\omega_j t - K_j x)] \quad (9)$$

Für die Geschwindigkeit gilt:

$$c^2 = \frac{E}{\rho} \quad (10)$$

Handelt sich um ein viskoelastisches Material, so ist die Geschwindigkeit mit (11) anzugeben:

$$c^2 = \frac{E(i\omega)}{\rho} \quad (11)$$

$E(i\omega)$  ist der komplexe Modul.

Bild 5 stellt einen typischen Verlauf der Spannungswellen im Stab dar. Die regelmäßig auftretenden Peaks des Signals lassen sich auf die durch den Stoß angeregten Longitudinalwellen zurückführen, die am Ende des Stabes reflektiert werden. Hierbei kommt es zu einem Vorzeichenwechsel der Signa-

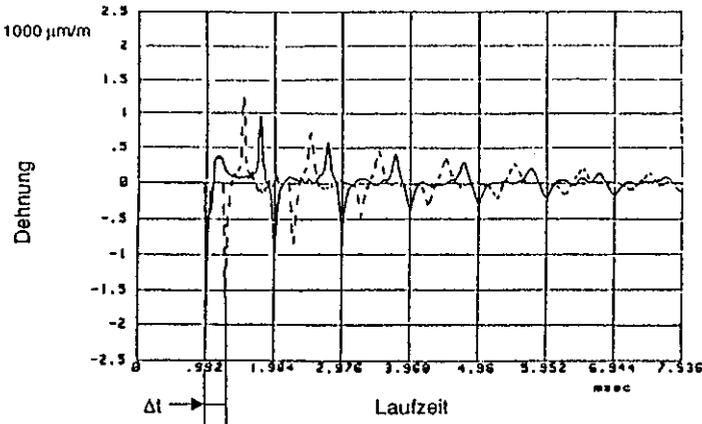


Bild 5: Dehnungen in Abhängigkeit der Zeit

le.

Aus dem zeitlichen Versatz der Signale des oberen und des unteren DMS läßt sich die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit errechnen.

$$C(t) = \frac{S}{\Delta t} = \frac{S}{t_{\text{obere}} - t_{\text{untere}}}, \quad E(t) = \rho \cdot C^2(t) \quad (12)$$

Bild 6 stellt die Geschwindigkeitsänderung und den Betrag des komplexen Moduls in Abhängigkeit mit Zeit dar.

Ermittlung der frequenzabhängigen Materialdämpfung

Bei einer weiteren Betrachtung der Dehnungsverläufe fällt die höhere Dämpfung auf. Unter der Annahme einer geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung ergibt sich die Beziehung zwischen der Dämpfungsrate und der Amplitude aus:

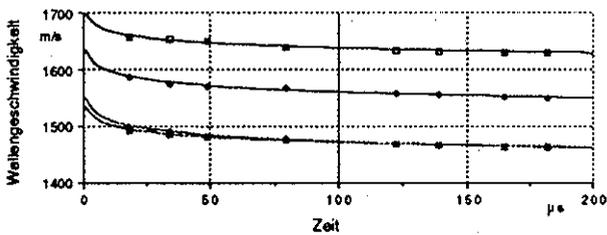


Bild 6 a Änderung der Geschwindigkeit bei erhöhten Temperaturen

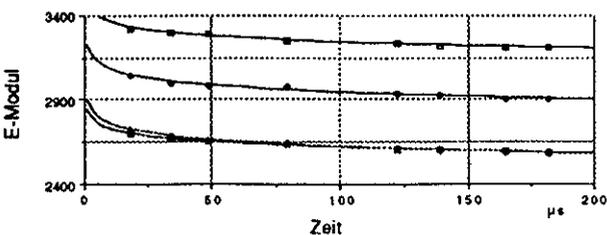


Bild 6 b Betrag des komplexen E-Moduls bei erhöhten Temperaturen

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{S} \quad (13)$$

Hierbei gilt:  $\alpha$ : Dämpfungswert,  $S$ : durchlaufene Strecke,  $A$ : maximale Amplituden zweier Meßsignale

In einem viskoelastischen Material ist die Dämpfung frequenzabhängig:

$$\alpha(\omega) = \left\{ \frac{\omega^2 \left[ (1 + \beta^2)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]}{c_1^2 \left[ (1 + \beta^2)^{\frac{1}{2}} + 1 \right]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

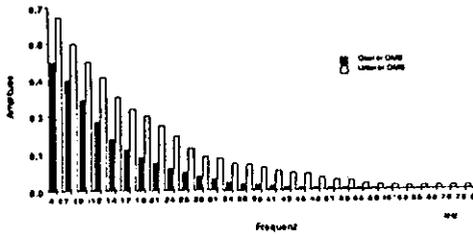
Die Dämpfung nimmt mit der Frequenz  $\omega$  zu. Dadurch werden die Wellen mit höherer Frequenz stärker gedämpft.

Soll die frequenzabhängige Materialdämpfung bestimmt werden, ist eine Betrachtung im Frequenzbereich durchzuführen. Die Fourier-Frequenzanalyse erfolgt durch ein FFT-Rechenprogramm, das das Zeitsignal der Stoßwelle in mehrere harmonische Wellenanteile mit entsprechenden Amplituden und Frequenzen zerlegt. Damit läßt sich die spektrale Verteilung der Signalanteile bezogen auf die Bandbreite der Frequenzspektren darstellen. In Bild 7 werden als Beispiel die Amplituden der diskreten harmonischen Wellen der Dehnungssignale bei 50°C gegen die Frequenzspektren aufgetragen. Außer der Ähnlichkeit der beiden Signale wird deutlich, daß die spektralen Amplituden des zweiten Signals bei höheren Frequenzen stärker abnehmen.

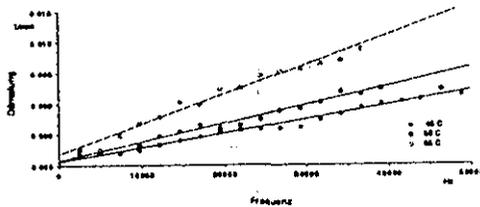
Durch die Frequenzspektren der oberen und unteren DMS, die in einem Abstand von 200 mm von einander angebracht sind, lassen sich die frequenzabhängigen Dämpfungsrate wie folgt berechnen :

$$\alpha(\omega) = \frac{\ln\left(\frac{A_1(\omega)}{A_2(\omega)}\right)}{S} = \frac{\ln\left(\frac{A_1(\omega) \cdot A_2(\omega)}{A_2(\omega) \cdot A_2(\omega)}\right)}{S} = \frac{\ln\left(\frac{G_{12}(\omega)}{G_{22}(\omega)}\right)}{S} \quad (15)$$

mit  $a(\omega)$  : Frequenzabhängige Dämpfung,  $A(\omega)$  : Frequenzspektrum der jeweiligen Meßsignale,  $G_{12}(\omega)$  : das Kreuzspektrum und  $G_{22}(\omega)$  : das Leistungsspektrum (power spektrum).



**Bild 7 :** Das Frequenzspektrum der Meßsignale



**Bild 8 :** Die frequenzabhängige Materialdämpfung

Werden nun die Amplitudenverhältnisse der einzelnen Frequenzintervalle nach (15) gebildet, fällt eine nahezu linear zunehmende Dämpfung bei steigender Frequenz auf (Bild 8). Die Dämpfungsrate liegt zwischen 0.001 bei niedriger Frequenz und 0.012 im höheren Frequenzbereich.

Die Dämpfungsrate ist gleichzeitig wiederum von Meßtemperatur abhängig, die Tendenz ist, daß die Dämpfungsrate mit Temperatur steigt.

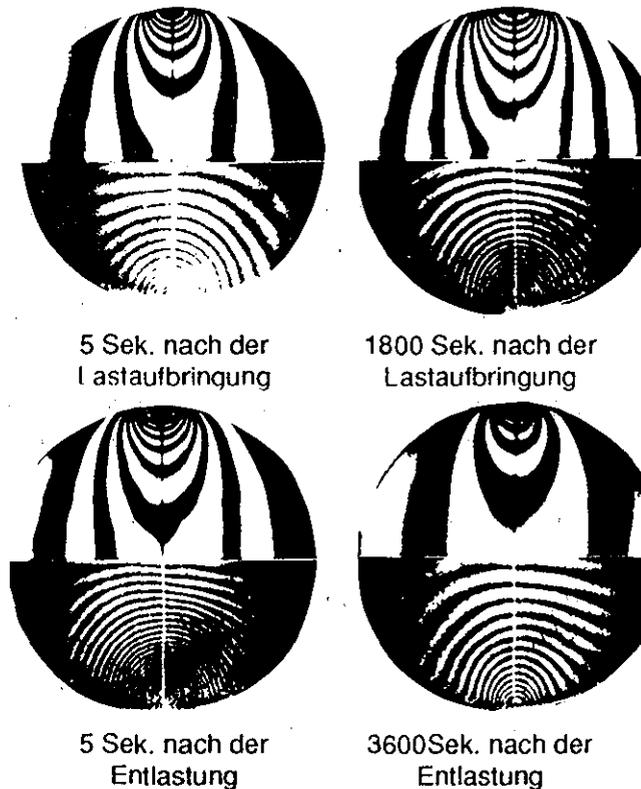
### 5. Anwendung

Als Versuchsmodell wird eine Kreisscheibe bei einer Temperatur von 50° C statisch belastet. Bei dieser Temperatur tritt das viskoelastische Verhalten des verwendeten Materials in den Vordergrund. Durch Anwendung eines kombinierten Verfahrens von Spannungsoptik und Moiré lassen sich parallel die Isochromaten und die Verschiebungsisotheten ermitteln. (Bild 9). Durch gezielte Merkmalsextraktion werden unter Anwendung digitaler Bildanalyseverfahren die für eine Auswertung erforderlichen Isochromaten- und Verschiebungsinformationen digital aufbereitet und bilden so die Grundlage für numerische Ganzfeldauswertungen der untersuchten Modelle. Bild 10 zeigt die Gegenüberstellung einer Originalaufnahme einer Isochromatenverteilung und der extrahierten Linienverläufe.

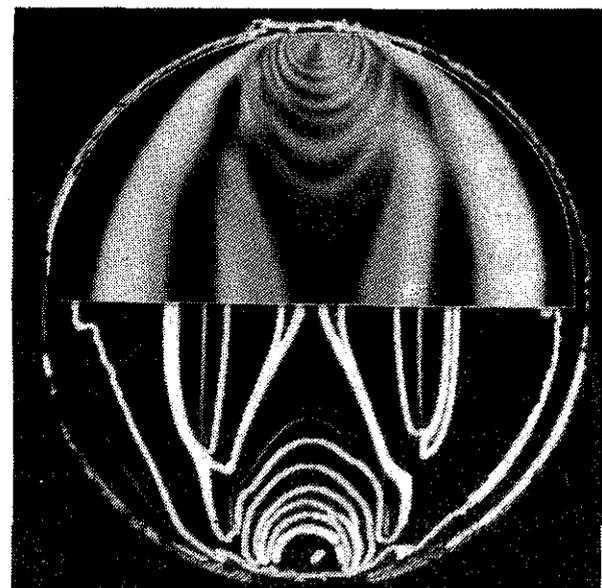
### 6. Zusammenfassung

Die Anwendung viskoelastischer Modellwerkstoffe bietet bei genauer Kenntnis der Werkstoffeigenschaften die Möglichkeit, eine Vielzahl technischer

Probleme, wie zum Beispiel das Körperschallverhalten von Aggregateträgern oder das Verhalten von Partikeln beim Prallmahlvorgang, durch Modellversuche zu simulieren. Durch Anwendung hybrider Meß- und Auswerteverfahren kann der Spannungszustand innerhalb der Modelle ermittelt werden und somit Aufschlüsse über das reale Verhalten von Bauteilen und Vorgängen liefern.



**Bild 9** Verschiebungsisotheten und Isochromaten



**Bild 10** Original- und digitalisierte Isochromaten

# Zur Notwendigkeit der Korrektur des Toleranzsystems und Prüfverfahrens nach DIN 5480 für Zahnwellenverbindungen

Z. Tan

## 1 Einleitung

Eine Zahnwelle bzw. -nabe kann mehrere Einzelverzahnungsfehler haben, beispielsweise Zahndicken-, Zahnform-, Teilungs-, Flankenrichtungsfehler usw.. Diese Verzahnungsfehler beeinträchtigen die Zahnwellenverbindungen in folgenden Bereichen:

(1) Fügbarkeit der Verbindung. Wenn irgendein Verzahnungsfehler zu groß ist, kann man die Welle und die Nabe entweder überhaupt nicht zusammenfügen, oder es gibt beim Passen zu große ungleichmäßige Flankenspiele.

(2) Tragfähigkeit der Verbindung. Jeder Zahn soll zur Kraftübertragung dienen. Wenn zu große ungleichmäßige Flankenspiele beim Passen da sind, wird das Drehmoment auch ungleichmäßig auf die einzelnen Flanken verteilt, was dazu führt, daß manche Flanken schon erheblich belastet werden, während die anderen ihre Gegenflanken gar nicht oder nur unvollständig berühren. Diese ungleichmäßige Kraftverteilung verringert die Tragfähigkeit der Verbindung.

(3) Lebensdauer der Verbindung. Unter Drehmoment und Querkraft wird eine fehlerhafte Verbindung exzentriert. Die Exzentrizität verursacht dann eine Relativbewegung zwischen den Zahnflanken der Welle und der Nabe beim Drehen der Verbindung und somit den Verschleiß der Zahnflanken.

Um die Fügbarkeit zu gewährleisten und die Flankenspiele zu begrenzen, sollte man die ganze Verzahnung nach dem Taylorschen Grundsatz tolerieren. Die Istverzahnung muß danach innerhalb des Dunkelfeldes in Bild 1 bleiben.

## 2 Eine Übersicht über DIN 5480 T 14 und T 15

In der Praxis ist eine vollständige Prüfung nach dem Taylorschen Grundsatz kaum realisierbar. Die

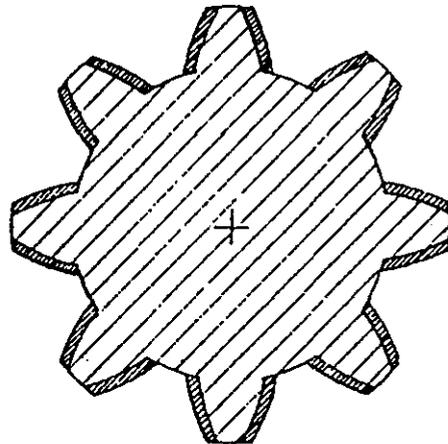


Bild 1 Toleranzfeld einer Verzahnung

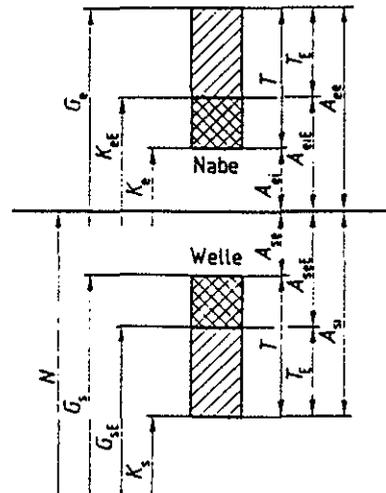
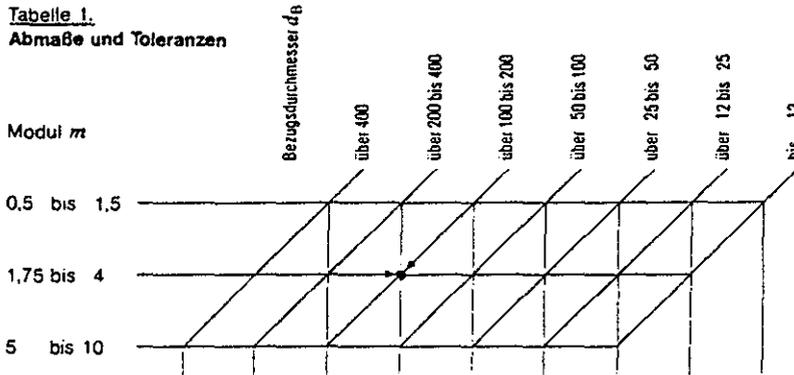


Bild 2. Passung Naben-Lückenweite/Wellen-Zahndicke

Schwierigkeiten liegen in der Kontrolle der Ausschußgrenze des Dunkelfeldes, vergleiche Bild 1. Bild 2 und Tabelle 1 zeigen den Aufbau des derzeit verbindlichen Toleranzsystems für die Passung von Zahnwellenverbindungen nach /1/. Die zulässigen Grenzen der Ist-Profile von Welle und Nabe werden durch Zahndicken- und Lückenweitenabmaße festgelegt. Ihre Toleranzfelder werden durch Zahlen und Buchstaben gekennzeichnet; Zahlen stellen die für die Toleranzgröße maßgebende Toleranzreihe dar und Buchstaben die Toleranzlage. Die Toleranzlagen sind an den Gutgrenzen (unteres Abmaß  $A_{ei}$  der Lückenweite/Nabe, oberes Ab-

**Tabelle 1.**  
**Abmaße und Toleranzen**



Beispiel:

Nabe N 120 × 3 × 30 × 38 × 9H

$$A_{ci} = 0$$

$$A_{vc} = A_{ci} + T = 0 + 90 = 90 \mu\text{m}$$

$$A_{vit} = A_{vc} - T_E = 90 - 56 = 34 \mu\text{m}$$

Welle W 120 × 3 × 30 × 38 × 8f

$$A_{sc} = -28 \mu\text{m}$$

$$A_{si} = A_{sc} - T = -28 - 63 = -91 \mu\text{m}$$

$$A_{scb} = A_{si} + T_E = -91 + 40 = -51 \mu\text{m}$$

Toleranzfeld	Gutseiten - Abmaße $A_{ci}$ bzw. $A_{sc}$ in $\mu\text{m}$										
	v	200	180	160	140	125	110	100	90	80	
	u	180	162	144	126	112	99	90	81	72	
	t	160	144	128	112	100	88	80	72	64	
	s	140	126	112	98	88	77	70	63	56	
	r	120	108	96	84	75	66	60	54	48	
	p	100	90	80	70	62	55	50	45	40	
	n	80	72	64	56	50	44	40	36	32	
	m	60	54	48	42	37	33	30	27	24	
F	k	40	36	32	28	25	22	20	18	16	
G	j	20	18	16	14	12	11	10	9	8	
H	h	0									
J	g	-20	-18	-16	-14	-12	-11	-10	-9	-8	
K	f	-40	-36	-32	-28	-25	-22	-20	-18	-16	
M	e	-60	-54	-48	-42	-37	-33	-30	-27	-24	
	d	-80	-72	-64	-56	-50	-44	-40	-36	-32	
	c	-120	-108	-96	-84	-75	-66	-60	-54	-48	
	b	-160	-144	-128	-112	-100	-88	-80	-72	-64	
	a	-200	-180	-160	-140	-125	-110	-100	-90	-80	

Toleranzreihe
4
5
6
7
8
9
10
11
12

Toleranzen $\mu\text{m}$		
T	$T_E$	$T - T_E$
9	6	3
10	6	4
11	7	4
12	8	4
14	9	5
16	10	6
18	11	7
20	12	8
22	14	8
25	16	9
28	18	10
32	20	12
36	22	14
40	25	15
45	28	17
50	32	18
56	36	20
63	40	23
71	45	26
80	50	30
90	56	34
100	63	37
112	71	41
125	80	45
140	90	50
160	100	60
180	112	68
200	125	75
224	140	84
250	160	90
280	175	105
320	200	120
360	225	135

maß  $A_{se}$  der Zahndicke/Welle) für jede Toleranzreihe konstant. Die Toleranzen T sind für die Gesamtlehrung gültig und die Toleranzen  $T_E$  für die Einzelabmaße bei Einzelmessung. Die Toleranzen

T sind ungefähr um das 1.6-fache größer als die Einzeltoleranzen  $T_E$ . Dies berücksichtigt, daß die mit Gesamtlehren geprüften Gutgrenzen infolge des Einflusses von Form- und Teilungsabweichun-

gen einer engeren Lückenweite der Nabe und einer größeren Zahndicke der Welle entsprechen müssen. Die Prüfvorschriften sind in DIN 5480 Teil 15 /2/ angegeben:

(1) Prüfen der Gutseite

Beim Prüfen der Gutseite ist festzustellen, ob das Ist-Profil innerhalb des oberen Grenzprofils der Welle bzw. außerhalb des unteren Grenzprofils der Nabe liegt. Wenn sich das Ist-Profil außerhalb des oberen Grenzprofils der Welle oder unterhalb des unteren Grenzprofils der Nabe befindet, ist das Werkstück nicht gut, und eine Nacharbeit ist notwendig. Die Gutseite-Prüfung ist im überwiegenden

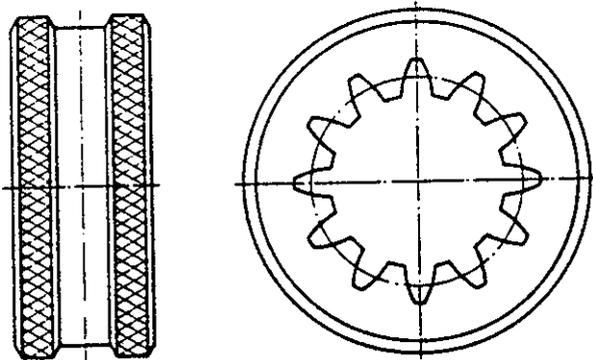


Bild 3. Vollverzahnter Gutlehring

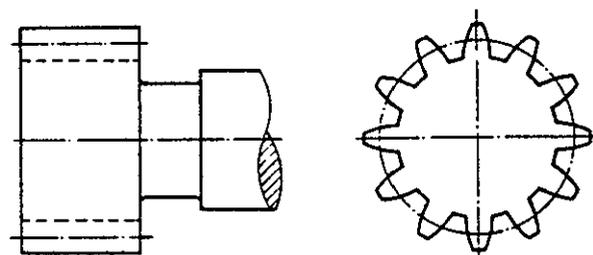


Bild 4. Vollverzahnter Gutlehrdorn

den Falle mit den das obere Grenzprofil der Welle bzw. untere Grenzprofil der Nabe verkörpernden Gutlehren (siehe Bild 3 und Bild 4) durchzuführen. Mit einem guten Prüfling lassen sich die Gutlehren immer ohne Gewaltanwendung paaren. Für den Fall, daß eine Gutprüfung mit Gutlehre unmöglich ist, muß man durch Einzelmessungen die Gutprüfung vornehmen, was eigentlich dem Taylorschen Grundsatz nicht mehr entspricht. Bei der Gutprüfung mit Einzelmessung kommen nach /2/ bei Wellen die Messung über Rollen und die Zahnweiten-

messung (Bild 5 und Bild 6) und bei Naben die Messung zwischen Rollen und die Lückenweitenmessung (für grobe Qualitäten) in Frage.

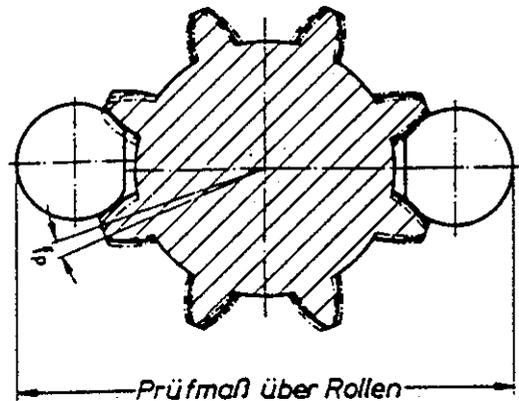


Bild 5. Messung über Rollen (Teilungsabweichung  $f_p$  wird nicht erfaßt)

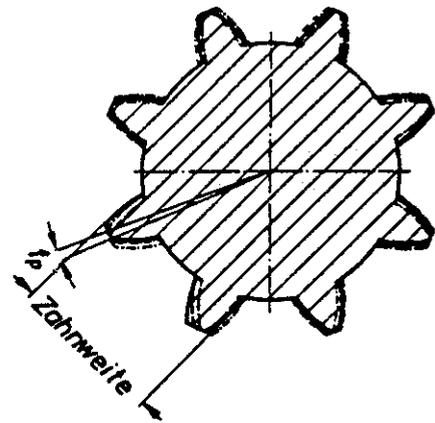


Bild 6. Zahnweitenmessung (Teilungsabweichung  $f_p$  wird erfaßt)

(2) Prüfen der Ausschußseite

Das Ziel der Ausschußseite-Prüfung ist, zu überprüfen, ob das Ist-Profil der Verzahnung oberhalb des unteren Grenzprofils der Zahnwelle bzw. unterhalb des oberen Grenzprofils der Zahnnahe liegt. Um dieses Ziel zu erreichen, sollte man die Istmaße aller voneinander unabhängigen Bestimmungsstücke einzeln prüfen, was praktisch fast unmöglich ist. In /2/ sind dafür drei Ersatz-Prüfverfahren angegeben:

- Durch Einzelmessung (Bild 5 und Bild 6)
- Aus den Ausschußgrenzabmaßen für die Zahndicke der Welle bzw. die Lückenweite der Zahnnahe ergeben sich nach Tabelle 3 in /1/ als Prüfmaße

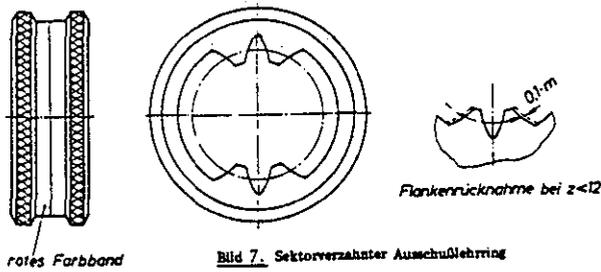


Bild 7. Sektorverzahnter Ausschußlehrring

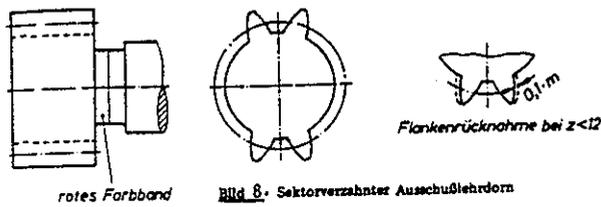


Bild 8. Sektorverzahnter Ausschußlehrring

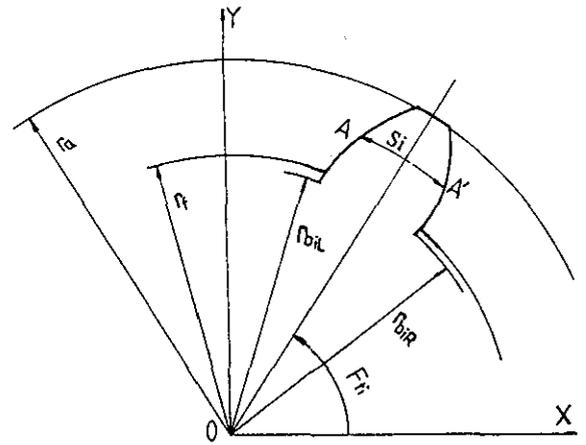


Bild 9a. Die aussagekräftigen Maße im Stirnschnitt der Zahnwelle

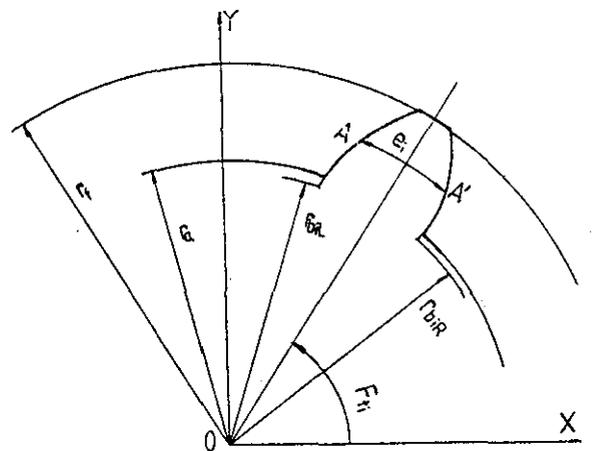


Bild 9b. Die aussagekräftigen Maße im Stirnschnitt der Zahnnahe

das Bolzenmaß über bzw. zwischen den Rollen und die Zahn- bzw. Lückweiten und ihre jeweiligen Abmaße. Das Werkstück ist dann als Ausschuß zu betrachten, wenn die gemessenen Bestimmungsgrößen unterhalb des unteren Grenzabmaßes bei Zahnwellen bzw. oberhalb des oberen Grenzabmaßes bei Zahnnaben liegen.

- Mit einer Ausschußlehre (Bild 7 und Bild 8)

Die sektorverzahnte Ausschußlehre darf in keiner geprüften Zahnstellung mit dem Prüfling gepaart werden können, sonst ist das Werkstück Ausschuß. Dies ist in mindestens drei verschiedenen Zahnstellungen zu prüfen.

- Mit Stichmaßen oder Rachenlehren

Zur Ausschußprüfung kann man auch bei der Nabe Stichmaße mit Kugelenden und bei der Welle Rachenlehren mit Kugelmeßflächen verwenden. Die Vorgehensweise ist wie die bei Ausschußlehren.

### 3 Ein Kommentar zu DIN 5480 T14 und T15

Die aussagekräftigen Maße der Zahnwellenverbindung wären (siehe Bild 9 und 10):

(1) Ist-Teilungswinkel  $F_{fi}$  des Zahns  $i$  oder der Lücke  $i$ , der die Position des Zahns oder der Lücke im Stirnschnitt bestimmt.

(2) Die Zahndicke des Zahns  $S_i$  bzw. die Lückenweite der Zahnücke  $e_i$  in einem bestimmten Kreis; z. B. dem Teilkreis. Mit der Zahndicke  $S_i$  oder der

Lückenweite  $e_i$  sind die Ausgangspunkte A - A' der Rechts- bzw. Linksflanke eindeutig bestimmt.

(3) Ist-Grundkreisradius  $r_{biL}$  der Linksflanke und  $r_{biR}$  der Rechtsflanke, der die Kontur der Evolventenflanken darstellt.

(4) Fußkreisradius  $r_f$ .

(5) Kopfkreisradius  $r_a$ , der zusammen mit dem Fußkreisradius den Bereich der Evolventenflanken bestimmt.

(6) Der Flankenlinienwinkel  $\beta_i$  zwischen der Ist-Flankenlinie und der Soll-Flankenlinie, Bild 10.

Wenn man die Rauigkeit und die Welligkeit des Evolventenprofils vernachlässigt und die Flankenrichtungslinie als eine Gerade annimmt, dann erfassen die oben genannten Maße im wesentlichen die Istverzahnung. Der Zahnfuß- und Zahnkopfra-

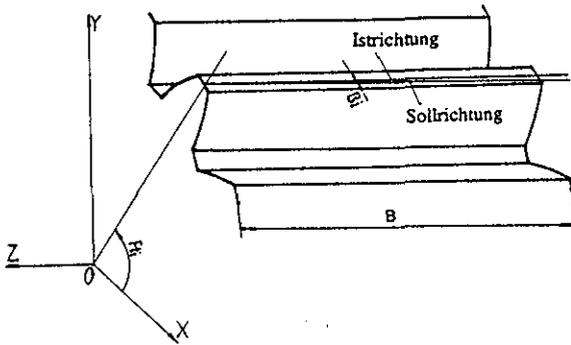


Bild 10. Die Flankenlinienabweichung  $\beta_i$

dius  $r_f$  und  $r_a$  haben keinen Einfluß auf die Flankenspiele, sie gefährden jedoch in seltenen Fällen die Fügbarkeit der Verbindung. Im Vergleich zu den übrigen Maßen spielen die Grundkreisradien der Zahnflanken bei der Bildung des Passungszustandes der Verbindung eine untergeordnete Rolle.

Bei der Gutseite-Prüfung mit Gutlehren sind alle aussagekräftigen Maße einwandfrei berücksichtigt, mit Ausnahme des Flankenlinienwinkels im Falle, daß die Verbindungslänge  $B$  (Bild 10) viel größer ist als die der Gutlehre  $B_0$ , die in /2/ festgeschrieben ist. Wenn  $B \gg B_0$ , dann sollte neben der Gutlehrung zusätzlich eine Flankenlinienmessung durchgeführt werden, damit die Gutseite-Prüfung fehlerfrei erfolgen kann.

Bei der Gutseite-Prüfung mit Einzelmessung sind viel weniger aussagekräftige Maße erfaßt als bei der mit Gutlehren. Die Messung über oder zwischen Rollen (Bild 5) erfaßt ausschließlich Zahndickenfehler, während andere wichtige Maße, wie Teilungsfehler usw. nicht berücksichtigt werden können. Die Zahnweitenmessung berücksichtigt in einem begrenzten Maß gleichzeitig Zahndicken- und Teilungsfehler, die weiteren Maße bleiben ebenfalls unerfaßt. Bei der Zahnweitenmessung ist allerdings eine größere Geschicklichkeit und Sorgfalt erforderlich. Um den Unsicherheiten bei der Gutseite-Prüfung mit Einzelmessung, bei der, wie erwähnt, viele wichtige Maße nicht erfaßt werden, Rechnung zu tragen, werden in /2/ die Abmaße der Zahndicke  $A_{SeE}$  bzw. der Lückenweite  $A_{eiE}$  (siehe Bild 2) als Gutgrenze betrachtet. Die Vorgehensweise der Berechnung von Abmaßen des jeweiligen Prüfmaßes ist in /1/ angegeben. Die Ein-

zeltoleranzen  $T_E$  spielen dabei eine wesentliche Rolle. Während es in /1/ schon vorgeschrieben ist, daß die Toleranzen  $T$  ungefähr um das 1.6-fache größer sind als die Einzeltoleranzen  $T_E$ , wie in Tabelle 1 gezeigt, kann  $T_E$  in manchen Fällen unnötig klein oder auch unzulässig groß gegenüber  $T$  sein, so in /2/. Die Gutseite-Prüfung mit Einzelmessung ist daher unsicher.

Bei der Ausschußseite-Prüfung verwendet man, wie zuvor erwähnt, Sektorlehren, Einzelmessung oder Stichmaße/Rachenlehren. Die Einzelmessung und die Stichmaße/Rachenlehren erfassen lediglich die Zahndickenfehler. Bei der Sektorlehrung (Bild 7 und Bild 8) sind zum Teil die Zahndickenfehler, die Zahnformfehler und Teilungsfehler gleichzeitig berücksichtigt. Dabei kann ein größerer einzelner Fehler, z. B. ein Teilungsfehler, dazu führen, daß sich die Sektorlehrung mit dem Prüfling nicht paaren läßt, so daß das Werkstück nicht als Ausschuß betrachtet wird, obwohl das Werk-

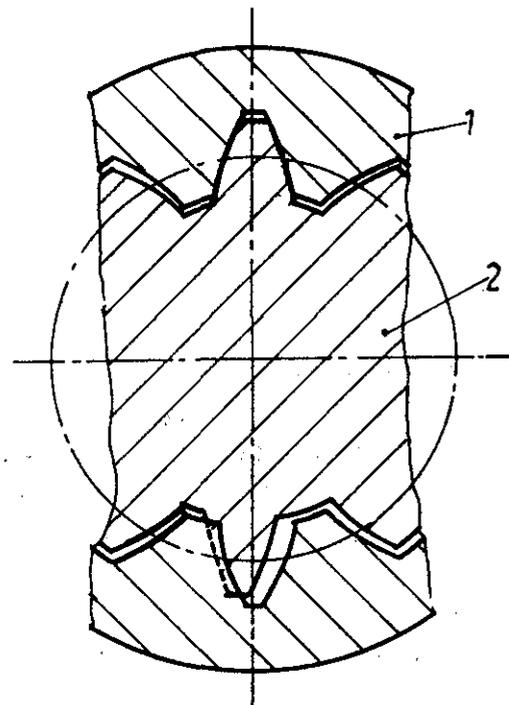


Bild 11. Widerspruch  
1 Sektorlehre  
2 Istverzahnung einer Welle

stück ohne diesen Fehler Ausschuß sein könnte. Aus diesem Grund kann sich auch nach einer durchgeführten Ausschußseite-Prüfung ein zu großes Flankenspiel in der Paarung der Verbindung

ergeben. Bild 11 zeigt ein Beispiel für diese widersprüchliche Situation bei der Ausschußseite-Prüfung mit Sektorlehre.

#### 4 Zusammenfassung

Das Hauptziel der Gutseite-Prüfung ist, die Fügbarkeit der Verbindung zu kontrollieren. Die Ausschußseite-Prüfung hat die Aufgabe, das Flankenspiel in der Paarung zu überprüfen. Mit der bisherigen Ausschußseite-Prüfung kann diese Aufgabe nur mit großer Unsicherheit erfüllt werden. Eine vollständige Ausschußseite-Prüfung wäre es, die Istmaße aller voneinander unabhängigen Bestimmungsstücke einzeln zu prüfen. In der Praxis werden jedoch aus vielen Bestimmungsstücken eines Werkstückes diejenigen ausgewählt und geprüft, die am aufschlußreichsten sind. Die technologischen "Gegebenheiten" werden ausgenutzt und es wird dabei vorausgesetzt, daß die anderen unerfaßten Bestimmungsstücke keine unzulässig großen Auswirkungen haben. Bei der Entwicklung des oben beschriebenen Verfahrens für die Ausschußseite-Prüfung hat man dieses sogenannte "Prinzip der Gegebenheitsnutzung" verwendet /3/. Dabei hat man den Teilungsfehler, der auch eines der aufschlußreichsten Maße ist und eine wesentliche Rolle bei der Lastverteilung in Umfangsrichtung der Verbindung spielt, nicht ausreichend berücksichtigt.

Moderne Maschinen verlangen von den Zahnwellenverbindungen nicht nur die Fügbarkeit, sondern auch einen gewünschten Paarungszustand in der Verbindung, der sich durch ein zuverlässiges Flankenspiel realisieren läßt. Um dies mit Sicherheit zu gewährleisten, muß das derzeit verbindliche Toleranzsystem und Verfahren zur Qualitätssicherung für die Zahnwellenverbindungen überarbeitet und ergänzt werden.

#### Schrifttum

- Verlag.
- (2) DIN 5480: Zahnwellenverbindungen mit Evolventenflanken. T 15 Qualitätssicherungsverfahren. Sept. 1974 Neuauflage 1978 Beuth-Verlag.
  - (3) H. Winter & A. Seifried, Friedrichshafen  
Der Taylorsche Grundsatz. Ein Beitrag zur Theorie des Prüfens mechanisch gefertigter Werkstücke  
TZ für prakt. Metallbearb. 59 Jahrgang 1965 Heft 7
  - (4) Dietz, P.  
Berechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen  
Selbstverlag des Verfassers, Juli 1978
  - (5) Glaubitz, W.  
Über spezielle Meß- und Auswerteverfahren für Toleranzuntersuchung an Zahnwellen und Zahnnaben mit Evolventenprofil  
Dissertation TU Dresden, 5. 1974
- (1) DIN 5480: Zahnwellen-Verbindungen mit Evolventenflanken. T 14 Flankenpassungen, Toleranzen. Sept. 1974 Neuauflage 1978 Beuth-

# CIM als Praktikum

U. Prengemann

## 1. Einleitung

CIM ist kein Schlagwort mehr, sondern in vielen Unternehmen bereits Realität. Deshalb stellt sich auch für die Universitäten die Aufgabe, das Lehrangebot im CIM-Umfeld zu erweitern. Neben der seit 1988 im IMW gehaltenen Vorlesung "CIM im Maschinenbau" wird deshalb seit dem Wintersemester 1990/91 auch ein CIM-Praktikum durchgeführt. Es hat zum Ziel, den Studenten zu ermöglichen, mit CIM-Komponenten praktisch zu arbeiten und das Zusammenspiel der Komponenten in einem CIM-Konzept kennenzulernen.

## 2. Begriffe

Zur Klärung der Begriffswelt soll zunächst die Definition des AWF (Ausschuß für wirtschaftliche Fertigung) aus dem Jahre 1986 herangezogen werden. Danach ist CIM das informationstechnische Zusammenwirken zwischen CAD, CAP, CAM, CAQ und PPS (Bild 1). Entsprechend bedeuten CAD = Computer Aided Design (rechnergestützte Konstruktion), CAP = Computer Aided Planning (rechnerunterstützte Fertigungsvorbereitung), CAM = Computer Aided Manufacturing (rechnerunterstützte Fertigung), CAQ = Computer Aided Quality Assurance (rechnerunterstützte Qualitätssicherung) und PPS = Produktionsplanung und -steuerung.

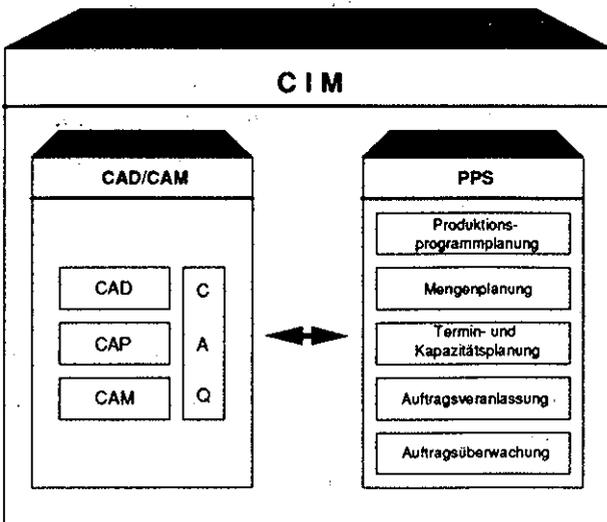


Bild 1: Definition von CIM nach AWF

CIM ist vor allem ein Konzept, das je nach Art, Größe und Tradition des Unternehmens sehr unterschiedlich sein kann. Gemeinsam ist allen Konzepten der integrative Aspekt, d.h., früher datentechnisch und organisatorisch getrennt operierende Unternehmensabteilungen und Tätigkeitsbereiche sollen mit dem Ziel der Steigerung der Effizienz der gesamten unternehmerischen Tätigkeit zusammengeführt werden.

Der integrativen Aspekt ist auch in Bild 2 dargestellt.

## 3. CIM in der Lehre

### 3.1. Was ist an CIM zu lernen?

CIM ist ein Konzept, mit dessen Hilfe die Effizienz der Tätigkeiten im technischen Bereich wesentlich erhöht werden kann. Dem entsprechend muß auch die Vermittlung von Kenntnissen in diesem Bereich aufgebaut sein. Einerseits muß ein Einblick in die Strategien der Informationsverknüpfung gewonnen werden. Dazu müssen Analysen der Informationsflüsse und -bedürfnisse durchgeführt werden. Andererseits muß die Leistungsfähigkeit und der Funktionsumfang einzelner Komponenten beherrscht werden, um deren effektiven Einsatz zu ermöglichen.

### 3.2. Wie wird der Stoff vermittelt

Die Vermittlung der Kenntnisse über CIM gliedert sich in Vorlesung, Übung und Praktikum.

#### 3.2.1. Vorlesung

Die Vorlesung wird vom Lehrbeauftragten Herrn Dipl.-Ing. Müller, Fa. Pittler Maschinenfabrik, Langen, als Blockvorlesung gehalten. Sie ist in die Kapitel Begriffe und Definitionen, Betriebsorganisation und Informationsfluß, Schnittstellen von Konstruktion und Entwicklung, Datenbank im CIM-Konzept, Integrierte Produktionsplanung und -steuerung, Integrierte Qualitätsüberwachung, CIM-Netzwerke, Anwendung von Automatisierung im CIM-Konzept,

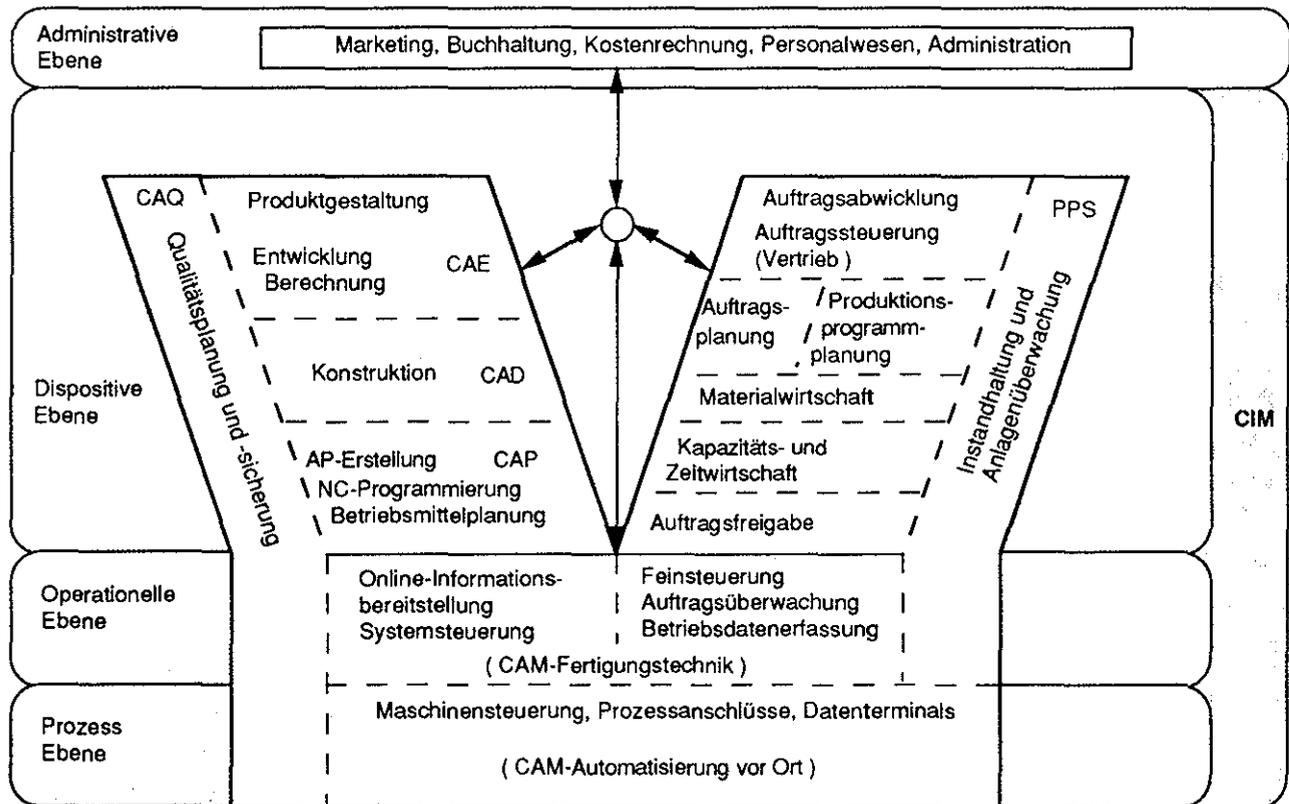


Bild 2:U Das "Y" von Scheer

Einführung und Betrieb von CIM-Lösungen und Zukunftsentwicklung untergliedert.

### 3.2.2. Übung

Die Übung findet parallel zur Vorlesung statt. Hier sollen am konkreten Beispiel die Leistungsfähigkeit einzelner CIM-Komponenten demonstriert sowie an ausgewählten Beispielen das Zusammenwirken erläutert werden. Hier werden vorrangig die Dinge gezeigt, bei denen aufgrund des hohen Einarbeitungsaufwands ein praktisches Üben nicht zweckmäßig erscheint. Daher ist die Übung als Vorführung ausgelegt. Neben einer Exkursion werden die Themenbereiche NC-Verfahrenskette, Normteile, Datenbanken und Netzwerke behandelt.

Bei der Übung NC-Verfahrenskette wird ähnlich wie beim Versuch CAD-NC-Kopplung ein Bauteil von CAD an das NC-System übergeben, dort programmiert und anschließend in die Maschine geladen. In der Übung wird jedoch ein komplexeres Teil verwendet, sodaß wesentlich mehr Funktionalität genutzt werden kann. Außerdem wird zur Übertragung das Standard-Austauschformat IGES genutzt. Die Übung Normteile zeigt die Einbindung von Normteilen in den Konstruktions- und Fertigungs-

prozeß. Hier werden die Handhabung von Normteillbibliotheken sowie die Probleme bei der Bereitstellung und ständigen Aktualisierung der Datenbestände vorgeführt.

Die Übung Datenbanken erläutert anhand der im IMW installierten Datenbank ORACLE die Möglichkeiten der Nutzung derartiger Werkzeuge im CIM-Konzept. Gezeigt werden das Vorgehen bei der Strukturierung der Datenbanken, die Definition von Zugriffsfunktionen und das Datenbankmanagement.

In der Übung Netzwerke wird anhand der im Hause installierten Netzwerke deren Bedeutung für das Funktionieren von CIM demonstriert. Es wird auf den Aufbau und die Konfiguration von Netzwerken eingegangen und die Leistungsfähigkeit und der Funktionsumfang verschiedener Netzwerkprodukte erläutert.

### 3.2.3. Praktikum

Für das Praktikum sind solche Elemente aus der CIM-Thematik ausgewählt worden, an denen der Student praktisch üben kann. Konzept und Inhalt sind im folgenden Kapitel beschrieben.

## 4. Das Praktikum

### 4.1. Ziel, Schwerpunkte

Ein Schwerpunkt des Praktikums ist das Üben und Verstehen einzelner CIM-Komponenten. Dabei wird ein Problem unter den Voraussetzungen des jeweiligen Themas gelöst. Die Studenten sollen dabei die Maschinen und Rechner möglichst selbständig bedienen. Der zweite Schwerpunkt ist das Erkennen der Integrationsmöglichkeiten und -grenzen sowie das praktische Üben des Zusammenwirkens der Komponenten. Entsprechend ist das Praktikum in zwei Teile gegliedert. Zunächst werden im ersten Teil im Wintersemester die einzelnen Komponenten vorgestellt. Ihr Zusammenwirken wird dann im zweiten Teil im Sommersemester untersucht, in dem der integrative Aspekt von CIM im Vordergrund steht.

### 4.2. CIM-Konzept

Der Aufbau des CIM-Labors erfolgte u.a. nach dem Grundsatz, eine möglichst heterogene Hard- und Softwareumgebung zu schaffen. Er wurde in den Institutsmitteilungen Nr. 14 (1989) beschrieben, ein Layout des Labors ist im Anhang enthalten.

Mit diesem Konzept entstanden eine Reihe von Kopplungsschwierigkeiten, wie sie auch in der industriellen Praxis auftreten, da im seltesten Fall davon ausgegangen werden kann, daß alle CIM-Komponenten von einem Hersteller sind. Alle Komponenten mußten so gekoppelt werden, daß eine vollständige Datendurchgängigkeit gewährleistet ist. Ausgangspunkt ist die im CAD-System Medusa erstellte Zeichnung. Die Geometrieinformationen dieser Zeichnung werden in das NC-Programmiersystem GNC übertragen und dienen dort nach erfolgter Arbeitsplanung als Grundlage für die NC-Programmierung. Ausgewählte Werkzeuge werden im Werkzeugverwaltungssystem zusammengestellt und ihre Sollwerte zum Werkzeugvoreinstellgerät übertragen. Die Istwerte werden zurückübertragen und über DNC der Werkzeugmaschinensteuerung zur Verfügung gestellt. Ebenso werden die fertigen NC-Programme nach erfolgreichem Postprozessorlauf und Freigabe im DNC-System zur Steuerung übertragen. Die gefertigten Produkte werden auf der

Koordinaten-Meßmaschine auf ihre Qualität geprüft. Hier können nach Auswertung der Abweichungen mögliche Änderungen für den Fertigungsprozeß abgeleitet werden.

### 4.3. Die einzelnen Versuche

#### 4.3.1. Werkzeugverwaltung

Der Versuch "Werkzeugverwaltung" soll einen Einblick in die Handhabung von Betriebsmitteldaten allgemein und speziell von Werkzeugdaten bieten. Probleme, die die Verwaltung von Daten mit sich bringt, die von verschiedenen Unternehmensbereichen genutzt und verändert werden, werden ebenso behandelt wie das datentechnische Verfolgen der Zustände einzelner Objekte (Werkzeuge) im Unternehmen. Neben der praktischen Nutzung eines Werkzeugverwaltungssystems wird auch der Zusammenbau und die Vermessung von Werkzeugen durchgeführt.

Der Versuch läuft so ab, daß zunächst eine gestellte Bearbeitungsaufgabe analysiert werden muß und dann mittels eines Werkzeugverwaltungssystems eine geeignete Werkzeugfolge ausgewählt wird. Für jedes Werkzeug der Folge wird dann die zugehörige Stückliste und das Einrichteblatt erzeugt. Mit diesen Informationen kann der Zusammenbau der Werkzeuge durchgeführt werden. Die zusammengebauten Werkzeuge werden nun vermessen. Dabei werden die durch die Werkzeugverwaltung bereitgestellten Sollwerte durch die nun ermittelten Istwerte ergänzt. Schließlich werden die gewonnenen Daten in den Werkzeugspeicher einer Maschine übertragen.

#### 4.3.2.

#### Werkstatorientierte Programmierung

Der Versuch "Werkstatorientierte Programmierung" bietet Einblicke in das Vorgehen bei der Planung und Programmierung von Fertigungsaufgaben im Werkstattbereich. Dabei werden die benötigten Informationen analysiert und ein Beispielteil gefertigt.

Dabei werden auch viele Werkstatt-typische Tätigkeiten durchgeführt wie die Inbetriebnahme der Maschine und das Einrichten des Werkstücks. Ein NC-Programm wird mit Hilfe der Bedienerführung, die

die CNC 432 des Bearbeitungszentrums MH 700 S bietet, erstellt, simuliert und abgearbeitet.

#### **4.3.3. CAD-NC-Verfahrenskette**

Beim nachfolgenden Versuch "CAD-NC-Verfahrenskette" steht dann der durchgängige Informationsfluß von der Konstruktion über die Arbeitsplanung in die Fertigung im Vordergrund. Anhand der praktischen Durchführung werden die Probleme der CAD-NC-Datenübertragung analysiert. Dazu wird eine Zeichnung aus dem CAD-System Medusa in das Programmiersystem GNC übertragen. Im Programmiersystem wird dann die Bearbeitung des Teils programmiert. Dazu werden Grundlagen der Bedienung des Programmiersystems vermittelt und entsprechende Hilfen bereitgestellt. Ergebnis der Arbeiten am Programmiersystem ist ein CLDATA-File, der im anschließenden Postprozessorlauf in ein NC-Quellcode umgewandelt wird. Dieser Quellcode wird dann mit dem NC-Programm aus dem vorherigen Versuch verglichen. Dabei werden die Unterschiede zwischen manueller und maschineller Programmierung am Beispiel herausgearbeitet.

#### **4.3.4. Qualitätssicherung**

Im Versuch "Qualitätssicherung" wird anhand der 3D-Koordinatenmeßmaschine die Integration der Qualitätssicherung im CIM-Umfeld dargestellt. Dazu wird das Koordinatenmeßgerät vorgestellt und erläutert und ein konkretes Meßproblem gelöst. Das beinhaltet vorbereitende Arbeiten wie Tasterwahl und Ausrichten, das praktische Messen und die Auswertung der Meßergebnisse. Dabei wird das Beispielteil, das die Gruppe im Versuch "Werkstatorientierte Programmierung" gefertigt hat, vermessen und Rückschlüsse auf die Fertigung gezogen.

#### **4.3.5. Stammdatenverwaltung**

Der Versuch "Stammdatenverwaltung" ist der erste Versuch im zweiten Teil des Praktikums im Sommersemester. In diesem Versuch steht die Funktion und der Aufbau eines PPS-Systems im Vordergrund. Dabei wird die Problematik der Stammdaten besonders betrachtet. Fragen der Gewinnung, Pflege und Nutzung von Stammdaten werden behandelt.

#### **4.3.6. Planung und Disposition**

Der Versuch "Planung und Disposition" beschäftigt sich mit den Problemen der Stücklistenauflösung sowie der auftragsneutralen und auftragsbezogenen Termin- und Kapazitätsplanung. Bei der Stücklistenauflösung werden die verschiedenen, im PPS-System verwalteten Stücklistenarten erläutert und die Schnittstelle zur Materialwirtschaft beschrieben. Die Termin- und Kapazitätsplanung zeigt das Vorgehen bei der Terminierung von Aufträgen unter Berücksichtigung von Losgrößen und Auslastungen.

#### **4.3.7. BDE, BDV, Fertigungssteuerung**

Der Versuch "BDE, BDV, Fertigungssteuerung" untersucht die Probleme der Fertigungs- bzw. Werkstattsteuerung. Die Arten von Betriebsdaten und ihre Erfassung sowie das Vorgehen bei der Verarbeitung dieser Informationen werden erläutert. Ein Modell für die Fertigungssteuerung wird aufgebaut und genutzt.

#### **4.3.8. Auftragsdurchlauf**

Das Zusammenspiel aller kennengelernten CIM-Komponenten wird im letzten Versuch "Auftragsdurchlauf" abschließend geübt. Ein Beispielauftrag wird durch das Modellunternehmen "CIM-Labor" geschleust. Alle vorhandenen CIM-Komponenten sollen effektiv eingesetzt und ihr Zusammenwirken ausgenutzt werden. Dabei geht es auch um Ausblicke und die Festlegung fehlender CIM-Komponenten.

### **5. Zusammenfassung**

Mit dem CIM-Praktikum wird im IMW ein neues, zeitgemäßes Praktikum angeboten. Im Wintersemester 1990/91 machen 14 Studenten des Hauptexamens von diesem Angebot Gebrauch.

# Konstruktion eines Hochleistungslinearroboters

R. Jakel

*Das Institut für Maschinenwesen vergibt nicht nur Studien- und Diplomarbeiten aus seinen eigenen Forschungsbereichen, sondern betreut auch Arbeiten, die Studenten in der Industrie durchführen. Als Beispiel solcher praxisorientierten Ausbildung beschreibt dieser Artikel die im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführte Konstruktion eines zweiachsigen Linearroboters, der in unveränderter Form von einem Verpackungsmaschinenhersteller, der Fa. ROCCO, Northeim, gebaut und auf der Interpack 1990 ausgestellt wurde. Der Roboter hat sich bereits bei einem Kunden bewährt.*

## 0 Zusammenfassung

Zunächst werden das Einsatzgebiet und die Anforderungen an den Linearroboter näher beschrieben.

Die sich anschließende Suche nach einer Lösung wird nicht nur von technischen Gesichtspunkten bestimmt, als wichtig wird auch eine besonders eigenständige Lösung erachtet.

Die gefundene Lösung zeichnet sich im wesentli-

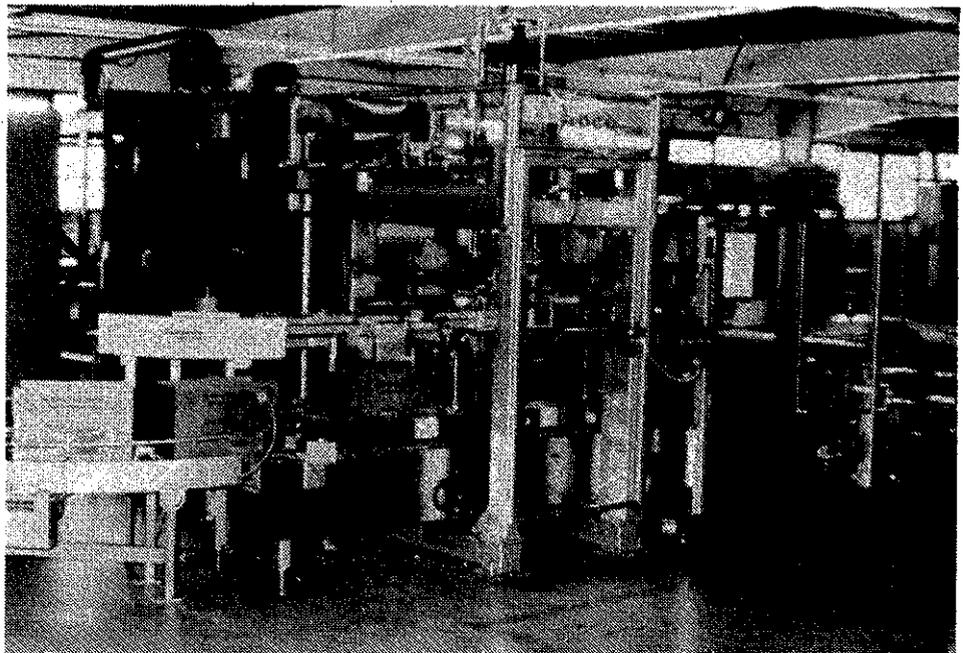
chen durch die gestellteste Anbringung der Antriebsmotoren für **beide** Roboterachsen aus. Dies sichert ein geringeres Gewicht der Achsen, womit eine höhere Tragfähigkeit realisiert wird. Die Vorschubkräfte werden durch Zahnriemen übertragen. Schwingungsproblemen, verursacht durch die nötigen großen Achsenbeschleunigungen, wird wirkungsvoll durch besonders steif konstruierte Führungen entgegengewirkt. Günstige Wahl der Übersetzungsverhältnisse durch Getriebe und Antriebsritzel bewirkt für beide Achsen sehr günstige Verhältnisse von Fremd- zur Eigenmasse; damit ist eine ausgezeichnete Regelbarkeit des Systems gewährleistet. Der Roboter zeichnet sich trotz hoher Dynamik durch einen sehr ruhigen Lauf aus.

## 1 Einleitung

Für Produkte zum Beispiel der Lebensmittel-, Getränke-, chemischen oder pharmazeutischen Industrie ist oft eine sogenannte Endverpackung erforderlich, um einen wirtschaftlichen und sicheren Transport vom Hersteller zum Konsumenten zu ermöglichen.

Bild 1:

Die komplette Endverpackungsstraße, bestehend aus Kartonaufrichter, Linearroboter und Fördersystemen. Es fehlt lediglich der Verschlussautomat.



In einer Endverpackungsanlage werden die einzelnen Produkte vollautomatisch zu größeren Einheiten in Pappkartons zusammengefaßt. Eine solche Anlage besteht im allgemeinen aus drei Komponenten:

- Einem Aufrichter, der die Faltkistenzuschnitte zu Kartons formt;
- einem Packer, der die Produkte vom produktführenden in die Pappkisten des kartonführenden Förderbandes bewegt
- und einem Verschlußautomaten, der die noch geöffneten Kartons verschließt.

Gegebenenfalls kann der Anlage noch ein Palettierer nachgeschaltet sein, um wiederum die Kartons zu transportfähigen Einheiten zusammenzufassen.

**Bild 1** zeigt die Endverpackungsstraße mit dem bereits fertiggestellten Linearroboter.

Die einzelnen Komponenten einer solchen Endverpackungsanlage können nach den unterschiedlichsten Funktionsprinzipien arbeiten; hier soll allerdings nur der Packer näher betrachtet werden.

Packer existieren in den verschiedensten Ausführungen, beispielhaft seien folgende Maschinenkonzepte vorgestellt:

- Sammelpacker, bei denen die Produkte von der Seite in den Karton geschoben werden;
- Fallpacker, bei denen die Produkte senkrecht in die Kartons fallen;
- Setzpacker, die die Produkte mit speziellen Werkzeugen auf-

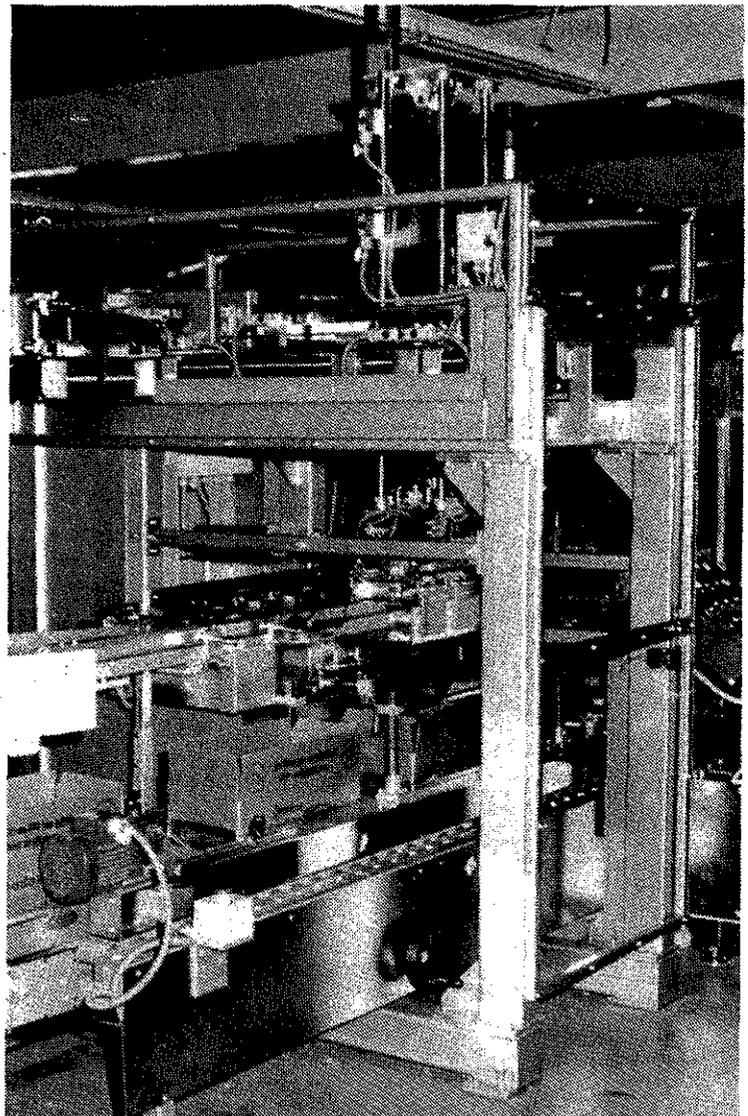
greifen und von oben in den Karton einführen.

## 2 Aufgabenstellung

Gefordert wird ein Linearroboter, der als Setzpacker eingesetzt werden soll.

Hiermit soll die Produktpalette um eine leistungsfähige und besonders flexibel einsetzbare Neuentwicklung erweitert werden.

Der Linearroboter soll beliebige Bewegungen in einer vertikalen, etwa 1 m<sup>2</sup> großen Ebene ermöglichen und sich durch besonders großes Beschleunigungsvermögen (bis zu 2 g) und hohe Tragfähigkeit (bis zu 100 kg) auszeichnen.



**Bild 2:**

Der komplett fertiggestellte Linearroboter

Aus der erarbeiteten Anforderungsliste ergibt sich weiterhin, daß die Robotermechanik für alle zukünftigen Einsatzfälle unverändert bleiben soll; die Anpassung an unterschiedliche Leistungsanforderungen geschieht nur über die Auswahl der elektrischen Antriebsmotoren. Eine Entwicklung zur Baureihe ist noch nicht geplant.

Die Greifwerkzeuge sollen austauschbar und zur Verringerung von Crash-Folgeschäden federnd gelagert sein. Die Positioniergenauigkeit soll  $\pm 1$  mm betragen.

Für hochdynamische Einsatzfälle ist eine SPS mit Positioniermodul vorgesehen; bei langsamen Anwendungen soll die Steuerung über Anschlagschalter erfolgen, d.h., das mechanische Aufbauprinzip muß steuerungsseitig eine kostengünstige "Sparversion" zulassen.

Bedingt durch die umfassenden Forderungen kann die zu konstruierende Maschine nicht nur für die Endverpackung, sondern grundsätzlich auch für jede Handlingaufgabe verwendet werden, bei der eine 2-dimensionale Bewegung ausreichend ist.

### 3 Lösungsfindung

Durch die Forderung, einen Setzpacker nach dem

Linearroboterprinzip zu bauen, ist für eine umfassende methodische Lösungsfindung nur wenig Raum vorhanden. Eine Analyse des Marktes zeigt aber dennoch eine Vielzahl an Lösungen. Diese unterscheiden sich im wesentlichen durch:

- die Art der Linearführungen (z.B. Laufrollen aus Stahl auf Profilwellen, Laufrollen aus Kunststoff auf Aluminiumträgern, Linearkugellager auf Präzisionsstahlwellen etc.);
- die Anbringung der Antriebsmotoren (feststehend oder mitfahrend);
- die Art der Kraftübertragung (z.B. Zahnstangen, Zahnriemen, Gewindespindeln, Kugelumlaufspindeln etc.);
- die Ausführung der vertikalen Achse (Teleskopachse oder gewöhnliche Achse);
- das Aufbauprinzip (modular oder "konventionell").

Durch Kombination aller dieser unterschiedlichen Konstruktionsmöglichkeiten ist die auf den vorgesehenen Einsatzfall am besten abgestimmte Lösung zu ermitteln. Dabei ist zu berücksichtigen, daß wegen der Vielzahl an Anbietern von Linearrobotern eine große Konkurrenz auf dem Markt besteht. Die Lösung sollte sich deshalb durch eine große Eigenständigkeit auszeichnen.

In bezug auf die gerade angesprochenen unter-

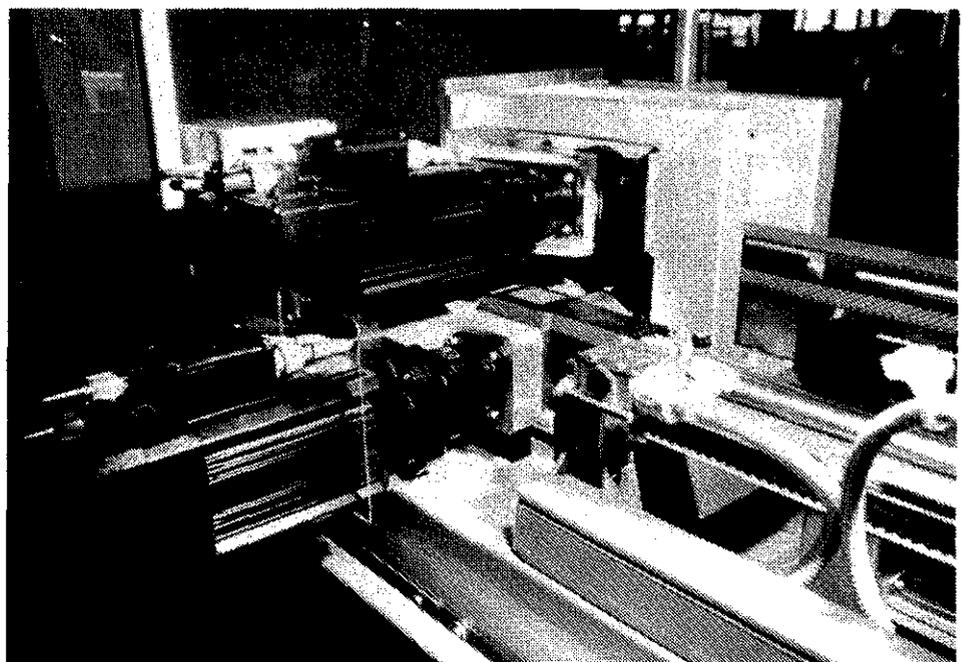


Bild 3:  
Die gestellfest angebrachten Drehstrom-Servomotoren

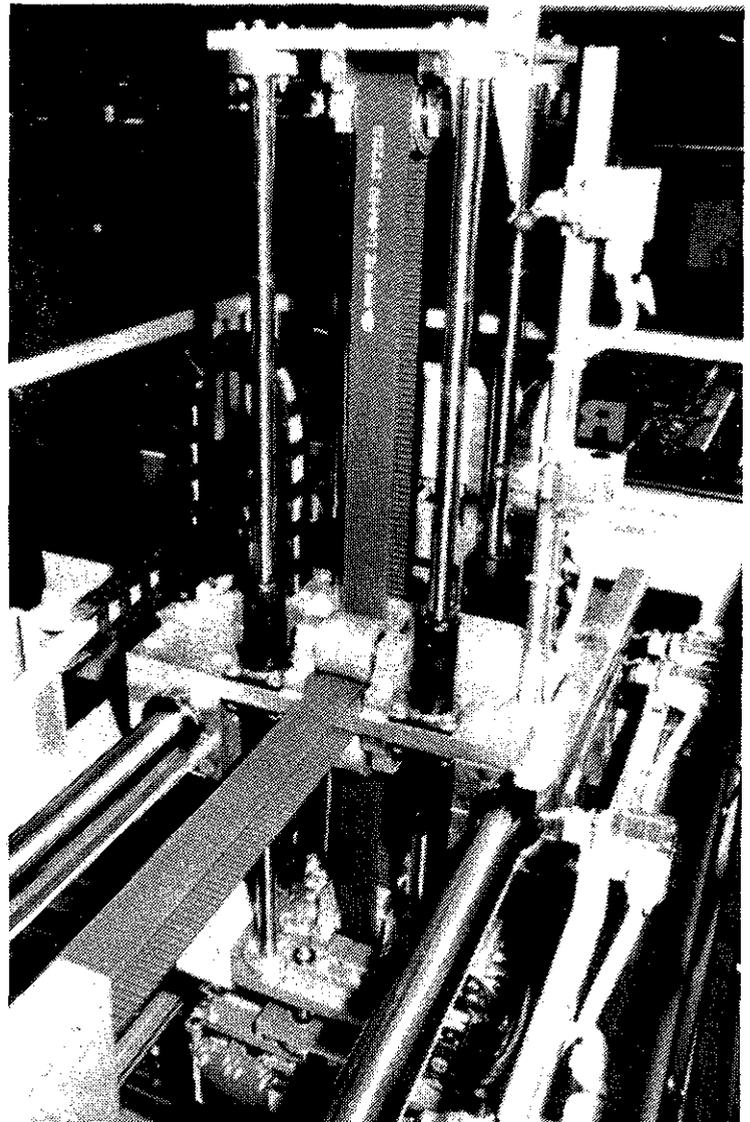
schiedlichen Ausführungsmöglichkeiten sollen folgende Punkte bei der Lösung beachtet werden:

- Die Führung der vertikalen Achse wird durch Linearkugellager auf Präzisionsstahlwellen realisiert, da diese Lagerung relativ kostengünstig ist. Für die horizontale Achse werden fertige Linearantriebseinheiten verwendet, die ebenfalls Präzisionsstahlwellen enthalten. Damit ergeben sich auch ästhetische Vorteile.
- Da eine sehr hohe Dynamik angestrebt wird, sind die bewegten Massen so niedrig wie möglich zu halten. Daher sollen beide Antriebsmotoren gestellfest angebracht werden.
- Wegen der gestellfesten Anbringung der Motoren können Zahnstangen und Spindeln nicht bzw. nur schlecht eingesetzt werden; außerdem zeichnen sich letztere durch einen geringen Wirkungsgrad aus. Daher werden Zahnriemen eingesetzt.
- Die vertikale Achse soll konventionell ausgeführt werden; durch den höheren konstruktiven Aufwand einer Teleskopachse würden sonst die bewegten Massen, ebenso wie die Kosten, zu groß werden.
- Ein modularer Aufbau ist nicht notwendig, da der Packer immer nur Bewegungen in einer senkrechten Ebene ausführen muß; ein Ausbauen auf höhere Achsenzahls wäre also sinnlos.

Die anhand dieser Gedanken gefundene Lösung wird in den beiden folgenden Kapiteln vorgestellt.

#### 4 Allgemeine Konstruktionsbeschreibung

Hauptmerkmal der Konstruktion ist die ortsfeste Anbringung auch des Antriebsmotors der vertikalen Achse im Gestell zur Reduktion der bewegten Masse (siehe **Bild 2** bzw. **Bild 3**). Bei einer Gesamtmasse aller Teile der beiden Achsen von etwa 80 kg (ohne Werkzeuge und Produkte) und einer Masse beider Motoren einschließlich Getrieben von etwa 25 kg beträgt die Ersparnis rund 25%. Dies bedeutet eine erhebliche Energie- und damit Kosteneinsparung gerade bei hohen Beschleunigungen. Da die angegebene Motorenmasse sich auf die relativ kleinen Servomotoren des Prototyps bezieht (Einschalt-dauer ca. 40 %, Nennleistung je 2 kW), kann die Ersparnis bei stärkeren Antrieben mit höherer zulässiger Einschalt-dauer weit mehr betragen.



**Bild 4:**

Blick von hinten auf die vertikale Achse. Deutlich zu sehen sind die vier Präzisionsstahlwellen zur besonders spiel- und schwingungsarmen Führung der Achse sowie der mehrfach umgelenkte Zahnriemen.

Die Leistung wird über einen mehrfach umgelenkten Zahnriemen in die vertikale Achse geführt (**Bild 4**). Die besondere Art der Riemenumlenkung erlaubt ein unabhängiges Positionieren der beiden Achsen voneinander, d.h., bei einem Verfahren der horizontalen Achse ändert sich der Hub der vertikalen Achse nicht. Dies ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Forderung nach dem möglichen Einsatz einer einfachen "Sparsteuerung", die ein Interpolieren zwischen beiden Achsen nicht erlaubt.

Wie bereits erwähnt, ist der Motor zum Antrieb der horizontalen Achse ebenfalls ortsfest angebracht. Hier erfolgt die Leistungsübertragung konventionell über zwei endliche Zahnriemen, die über jeweils ein Antriebs- und ein Umlenkritzel gelenkt werden.

Die ortsfest angebrachten Antriebmotoren sind durch Anflanschen leicht austauschbar. Eine Stromzuführung über Energieführungsketten und hochflexible Kabel entfällt. Die "Schnittstelle" für Änderungen bei den Antrieben liegt im Gestell und nicht in der Bewegungseinheit, diese bleibt für alle Anwendungsfälle unverändert.

## 5 Erläuterung der Konstruktionsdetails

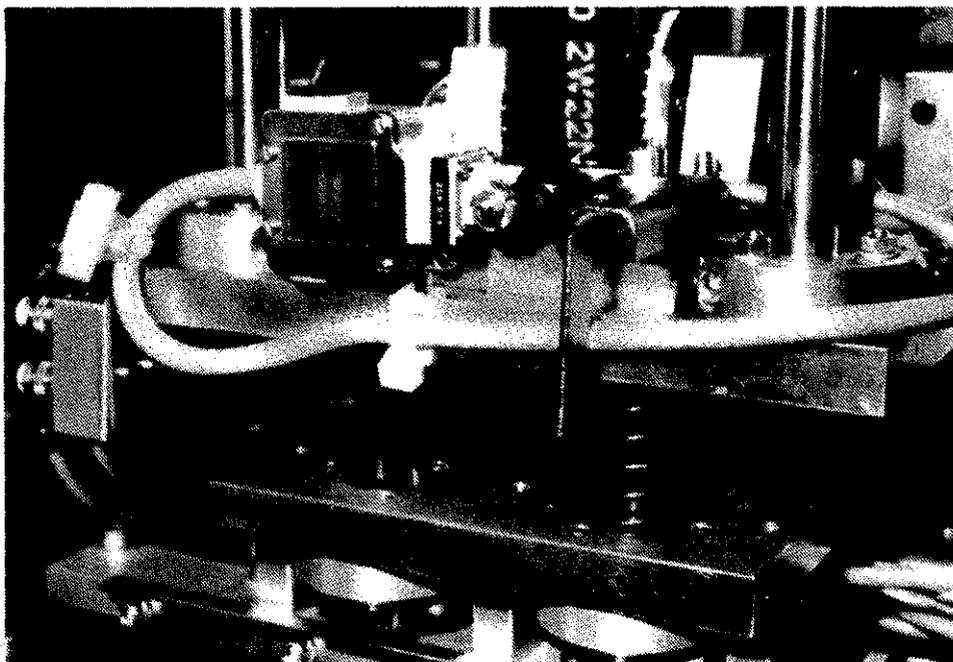
### *Auswahl der Motoren und Übersetzungen:*

Als Antriebsmotoren für den Prototypen wurden

bürstenlose Drehstrom-Servomotoren mit einer relativ hohen Nenndrehzahl von  $4000 \text{ min}^{-1}$  gewählt. Mit einem einstufigen Planetengetriebe ( $i=6$ ) und entsprechender Wahl der Antriebsritzel konnte das Verhältnis von Motoreigendrehmasse und auf die Motorwelle reduzierter Fremdmasse nahe an das theoretische Optimum von 1:1 gebracht werden. Das Antriebsritzel der vertikalen Achse ist dabei in der Zähnezahl so festgelegt worden, daß beide Roboterachsen mit exakt der gleichen Motor-Getriebe-Kombination (Gleichteileverwendung) betrieben werden. Der Vorschub je Motorumdrehung liegt bei etwa 30 mm; es können Hochlaufzeiten von bis zu 100 ms realisiert werden.

### *Führung der vertikalen Achse:*

Diese Achse wird durch insgesamt acht vollumschließende Linearkugellager auf vier Präzisionsstahlwellen geführt (**Bild 4**). Die Lager sind gegen das Eindringen von Schmutz mit schleifenden Dichtscheiben ausgerüstet; die Stahlwellen zur Reduktion der bewegten Masse hohl ausgeführt. Zur Sicherstellung der Parallelität der vier Hohlwellen sind in Kopf- und Fußplatte der Achse Passungsbohrungen angebracht. Die eigentliche Verbindung zwischen Wellen und Platten stellen dann acht Flansche her. Dies zusammen mit der großen Stützweite der Lagerung gewährleistet eine extrem biegesteife und spielfreie, aber dennoch leichtgängige Führung so daß bei den hohen im Betrieb auftretenden



**Bild 5:**  
Endabschaltung als  
Kollisionsschutz

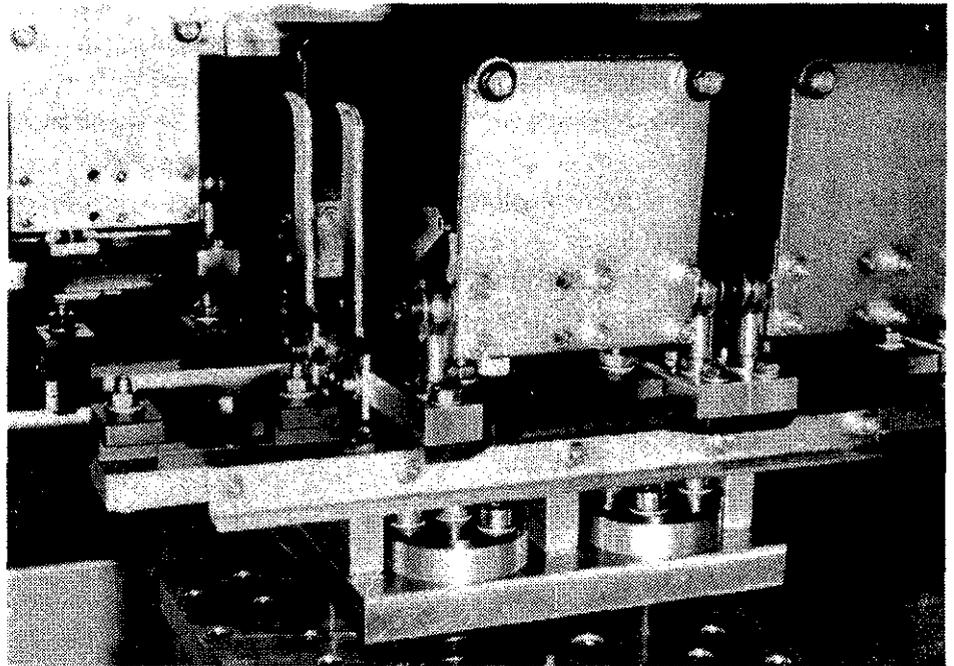
Beschleunigungen praktisch keine Schwingungen auftreten.

*Crash-Endabschaltung:*

Zur Reduzierung von Folgeschäden im Falle eines Auffahrens der vertikalen Achse auf ein Hindernis ist die gesamte Werkzeughalterung federnd aufgehängt. Beim Einfedern wird sofort ein Endschalter aktiviert (**Bild 5**), der für ein Abbremsen des Antriebsmotors sorgt. Als zusätzliche Sicherheit zur Stoßabsorption dienen auf den letzten Zentimetern Federweg zwei Parabelpuffer.

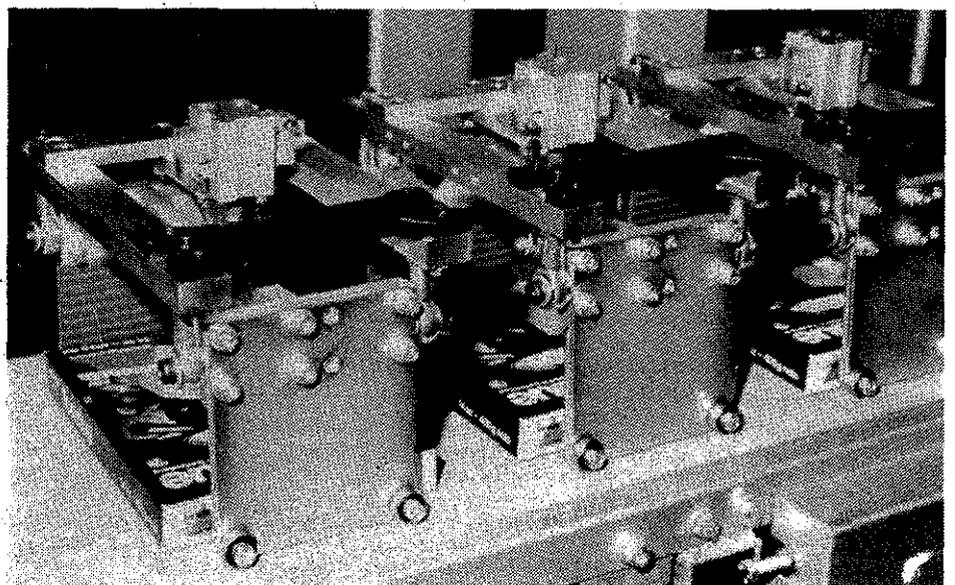
*Werkzeughalterung:*

Um ein rasches Auswechseln der unterschiedlichen Greifwerkzeuge zu gewährleisten, ist eine Werkzeughalterung konstruiert worden, in die die Werkzeuge einfach von vorne eingeschoben werden können (**Bild 6**). Dabei kann ihre Anzahl wie ihre Anordnung (mittig, links- oder rechtsbündig) beliebig variiert werden. Das Befestigen der Greifwerkzeuge (**Bild 7**) erfolgt durch Herunterschieben einer Klemmleiste. Es können je nach gewünschter Anwendung die unterschiedlichsten Werkzeuge eingesetzt werden. \*



**Bild 6:**

Wechselmöglichkeit der Greifwerkzeuge in der Halterung



**Bild 7:**

Die beim Prototypen eingesetzten Greifwerkzeuge. Sie dienen zum Aufgreifen von Pappschachteln unterschiedlicher Größe, die ein Käsefertigprodukt enthalten.

# Das STEP Toleranzmodell

(STEP = Standard for the Exchange of Product Data)

Martin Holland

## 1 Einleitung

Zukünftige CIM-Konzepte werden maßgeblich durch Produktmodelle gekennzeichnet sein. Unter einem Produktmodell ist die vollständige Beschreibung von Produkten in einem umfassenden Informationsmodell zu verstehen. Besonders die Rechnerinterpretierbarkeit der Produktbeschreibung ist für eine vollständige Datendurchgängigkeit, von der Konstruktion über die Arbeitsvorbereitung bis zur Fertigungssteuerung, unabdingbar. Die Relationen verschiedener Produktdaten, wie z. B. zwischen geometrischen und technologischen Daten, müssen abbildbar sein. Diese Forderung muß bei der Entwicklung der zugrundeliegenden Datenmodelle Berücksichtigt werden.

Toleranzinformationen sind ein bedeutender Informationsinhalt von Produktbeschreibungen. Sie werden nicht nur für die Festlegung der Fertigungs- und Prüfverfahren herangezogen, sondern sind ein wesentlicher Bestandteil, der bei einer CAD/NC-Kopplung zu übertragenden Daten. Auf dem Weg zu vollständigen Produktmodellen ist die rechnerinterpretierbare Abbildung von Toleranzinformationen ein wichtiger Teilschritt. Im Rahmen der Mitarbeit des Instituts für Maschinenwesen im KCIM Projekt CAD/NC-Kopplung (KCIM = Kommission CIM im DIN) wurde daher maßgeblich an der Definition eines Informationsmodells zur Abbildung von Toleranzinformationen mitgearbeitet. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über das entwickelte Toleranzmodell.

## 2 Bedeutung der Toleranzangaben für die CAD/NC-Kopplung

Wie bereits erwähnt, werden die Toleranzangaben im Bereich der Arbeitsplanung für die Auswahl der Fertigungsverfahren herangezogen. Daneben sind sie wichtige Informationen bei der Definition der Bearbeitungsschritte. Sie beeinflussen die Festlegung technologischer Parameter wie Vorschub, Schnittgeschwindigkeit oder verwendeter Werkzeuge und müssen bei der Definition von Spannlagen berücksichtigt werden. Außerdem haben Toleranzangaben großen Einfluß auf die Definition der Werkzeugwege, da die in der Konstruktion definierte Teilegeometrie die Grundlage für die Werkzeugwegdefinition bildet. Diese wird normalerweise als Nenngeometrie mit den dazugehörigen Toleranzangaben definiert (Bild 1). Daher muß vor der eigentlichen NC-Programmierung die CAD-Nenngeometrie in die Fertigungssollgeometrie überführt werden.

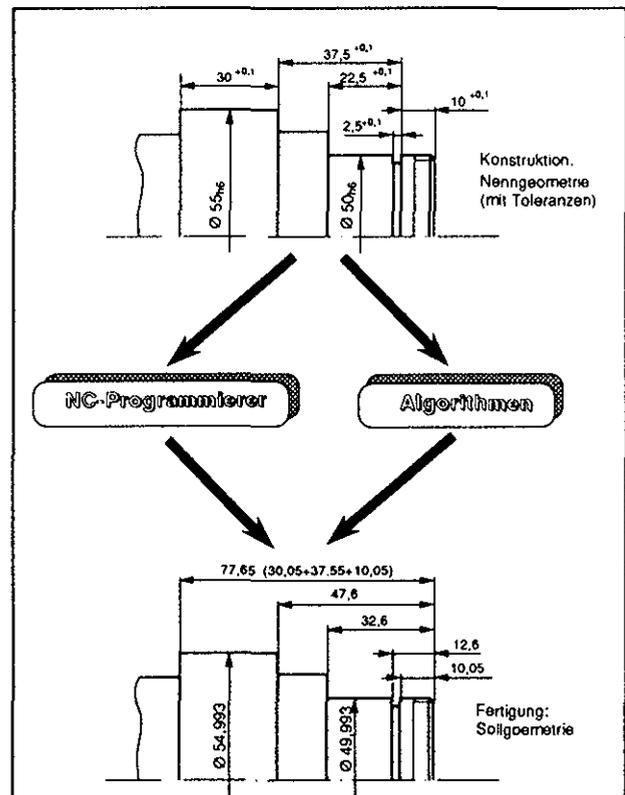


Bild 1. Zusammenhang Nenngeometrie - Sollgeometrie

Die Lage der Fertigungssollgeometrie im Toleranzfeld wird maßgeblich durch die angewandte Fertigungsstrategie beeinflusst. Hierbei sind verschiedene Möglichkeiten gegeben. Im einfachsten Fall liegt die Nenngeometrie genau in Toleranzmitte und die Toleranzbreite ist größer als die Prozeßgenauigkeit der Maschine. In diesem Fall kann die Fertigungssollgeometrie mit der Nenngeometrie identisch sein. Häufig liegt die Sollgeometrie nicht in Toleranzfeldmitte, sondern z. B. bei 2/3 des Toleranzfeldes. In diesem Fall muß eine Überführung der Nenngeometrie in die Fertigungssollgeometrie in Abhängigkeit von der Fertigungsstrategie und des Toleranzfeldes erfolgen. Diese Geometriemodifikation wird heutzutage vom NC-Programmierer durchgeführt. Bei Vorliegen eines vollständigen Produktmodells, kann die Modifikation mit Hilfe von Algorithmen durchgeführt werden (Bild 1).

Für eine weitestgehend rechnerunterstützte Arbeitsplanung und NC-Programmierung ist daher die Definition von Toleranzangaben, die einen rechnerinterpretierbaren Bezug zu den tolerierten Geometrieelementen haben, unbedingt erforderlich.

### 3 Das Schnittstellenformat STEP

Neben vollständigen Produktmodellen müssen entsprechende Schnittstellenformate zur Realisierung zukünftiger CIM-Konzerte vorhanden sein.

In bisherigen Schnittstellendefinitionen wie IGES (Initial Graphica Exchange Specification) oder SET (Standard d'Echange et de Transfert) werden Toleranzangaben als reine Zeichnungsinformationen übertragen. Es liegt keine rechnergerechte Informationsbereitstellung vor /1/. Daher muß die verwendete Schnittstelle eine ausreichende Funktionalität aufweisen.

Diese Forderung wurde bei der Definition der zukünftigen Schnittstellenspezifikation STEP (Standard for the Exchange of Product Data) berücksichtigt. Im Laufe der Entwicklung hat sich gezeigt, daß STEP auch zur Archivierung und zum Aufbau von Datenbanken genutzt werden kann. STEP befindet sich zur Zeit in der Normung und wird 1991 als internationaler Normenentwurf vorliegen.

#### 3.1 Aufbau von STEP

Für die Abbildung produktdefinierender Daten sind in STEP verschiedene Informationsmodelle (Partialmodelle) definiert. Z. B. erlaubt das STEP-Geometriemodell die Abbildung der Produktgeometrie. Zum besseren Verständnis der folgenden Ausführungen über das Toleranzmodell wird an dieser Stelle ein kurzer Überblick über das Prinzip der Informationsdarstellung in STEP gegeben. Ein vollständiger Überblick über den Aufbau und Leistungsumfang der STEP Spezifikation würde den Umfang der Ausführungen sprengen.

Daten werden als Informationseinheiten in Form von sogenannten *Entities* /2/ abgebildet. *Entities* werden durch Attribute definiert, die durch andere STEP *Entities* oder Grundelemente wie z. B. Reelle Zahlen oder Zeichenketten beschrieben werden. Aus informationstechnischen Gründen hat STEP eine hierarchische Struktur. Zum Beispiel ist das *Entity cartesian point* in der Struktur über (*supertype*) den beiden *subtypes cartesian three-coordinate* und *cartesian two-coordinate* angeordnet. Dieser Zusammenhang wird am Beispiel eines Raumpunktes (Bild 2) näher erläutert.

```
ENTITY cartesian_point
SUPERTYPE OF (ONEOF (cartesian_three-
coordinate, cartesian_two-coordinate))
END_ENTITY;

ENTITY cartesian_three-coordinate
SUBTYPE OF (cartesianPoint);
x_coordinate : REAL;
y_coordinate : REAL;
z_coordinate : REAL;
END_ENTITY;
```

Bild 2: Abbildung eines Raumpunktes in STEP

Das *Entity cartesian three-coordinate* ist definiert über Attribute für die X, Y und Z-Koordinaten, die durch Reelle Zahlen beschrieben sind.

#### 4 Entwicklung des STEP Toleranzmodells

Das STEP Toleranzmodell wurde entwickelt, um Maß-, Form- und Lagetoleranzen, wie sie in den entsprechenden ISO Standards (Bild 3) definiert sind abzubilden. Im Rahmen eines Produktmodells schließt dies die Abbildung der Beziehungen zwischen den Toleranzangaben und den tolerierten oder als Bezug definierten Geometrieelementen mit ein. Das wesentliche Grundprinzip des Toleranzmodells ist, daß nur die Toleranzfeldgröße explizit abgebildet wird. Die Nennmaße sind implizit im Geometriemodell, auf das die Toleranzen bezogen werden, enthalten.

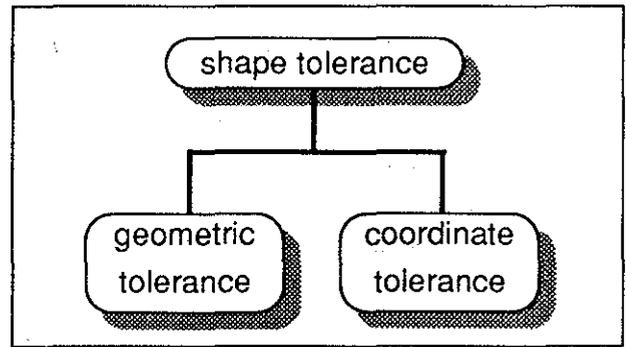


Bild 4: Aufteilung des STEP Toleranzmodells

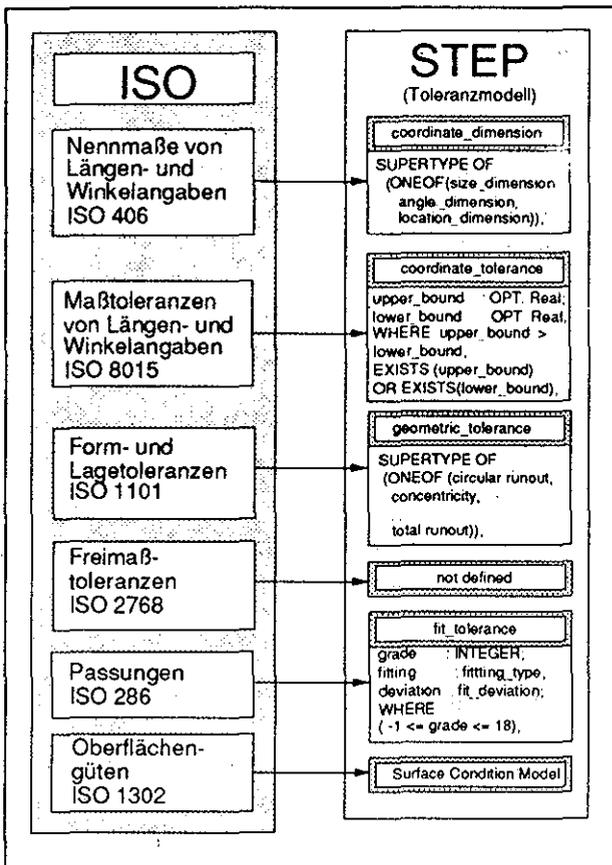


Bild 3: ISO-Normen im Toleranzmodell

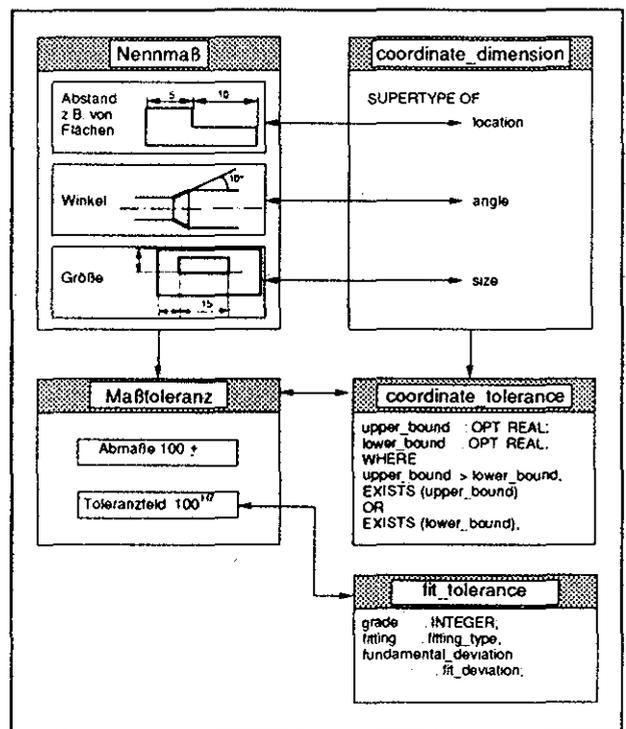


Bild 5: Abbildung von Maßtoleranzen in STEP

#### 4.1 Aufbau

Eine Geometrieabweichungen wird in STEP als *shape tolerance* bezeichnet (Bild 4), wobei diese entweder eine Maßtoleranz (*coordinate tolerance*) oder eine in der DIN-ISO 1101 definierte Form- oder Lagetoleranz (*geometric tolerance*) sein kann.

Maßtoleranzen sind Toleranzangaben die sich auf die Größe von Geometrieelementen beziehen. Eine Maßtoleranz ist vollständig beschrieben durch die Angabe der Toleranzart, des Toleranzbereiches und der tolerierten Geometrieelemente. Die Art der Maßtoleranz wird durch das *Entity coordinate dimension* abgebildet. Es wird unterschieden zwischen Toleranzangaben für Winkel (*angle*), Längen von Kanten (*location*), die durch den Abstand zweier Flächen definiert sind; sowie zwischen Größentoleranzen (*size*) von Geometrieelementen wie Zylindern. Der Toleranzbereich wird, wie in Bild 5 dargestellt, als *tolerance Range* mit oberem (*upper bound*) und unterem (*lower bound*) Abmaß definiert.

Die Abbildung des ISO Passungssystems ist, wie in Bild 5 dargestellt, ebenfalls möglich. Form und Lagetoleranzen, wie sie in der ISO Norm 1101 definiert sind, werden in STEP als *geometric tolerances* definiert. Alle in dieser Norm definierten Toleranzangaben und die entsprechenden Bezüge sind rechnerinterpretierbar abgebildet.

Die Abbildung von Toleranzangaben mit Hilfe des STEP Toleranzmodells im Rahmen einer Produktbeschreibung ist in Bild 6 dargestellt. Ausgangspunkt einer vollständigen Produktbeschreibung ist das *Part Model*, das durch fünf Attribute beschrieben wird. Die Attribute beschreiben:

- die Nenngeometrie (*nominal shape*),
- die Einheiten (*model units*) in denen das Teil definiert ist,
- die Form Elemente (*form features*) wie z. B. Passfedernuten,
- die äquivalenten Darstellungen (*equivalents*), die für andere Anwendungen wie z. B. Finite Element Berechnungen vorliegen sowie
- die Bauteiltoleranzen (*part tolerances*).

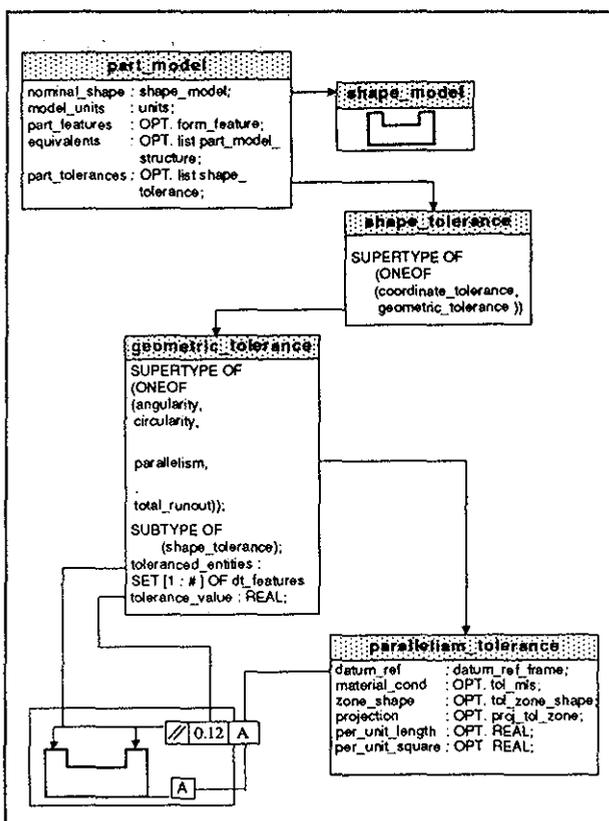


Bild 6: Abbildung einer Parallelitätstoleranz in STEP

Die Bauteiltoleranzen sind durch Verweise in einer Liste auf entsprechende *shape tolerances* definiert.

Wie bereits erwähnt, erlaubt das STEP Toleranzmodell die Referenzierung der Geometrielemente. In Bild 6 ist dieser Zusammenhang anhand einer Parallelitätstoleranz dargestellt. Im STEP *Entity geometric tolerance* werden die entsprechende Toleranzart, hier *parallelism tolerance*, die tolerierten Elemente (*toleranced entities*) sowie die Toleranzfeldbreite (*tolerance value*) abgebildet. Mit Hilfe des *Entities parallelism tolerance* werden die übrigen Attribute, die für eine vollständige Definition der Parallelitätstoleranz notwendig sind, abgebildet. Dies ist die Angabe des Bezuges (*datum reference*), die Angabe einer Material Bedingung (*material condition*), Informationen über die Form der Toleranzzone (*cylindrical zone*) und die Referenzierung der Bezugselemente (*primary datum*). Falls erforderlich, ist ebenfalls die Angabe einer projizierten Toleranzzone möglich (*projection*).

### 4.3 Test der Leistungsfähigkeit

Vor einer ersten Testimplementierung eines derart komplexen Datenmodells ist es sinnvoll, die Leistungsfähigkeit mit einfachen Mitteln zu überprüfen. Hierzu wurde ein Datenaustausch mit internationalen Partnern durchgeführt.

#### 4.3.1 Definition eines Testteils

Für den Datenaustausch wurde ein Test Teil definiert, das möglichst alle in den entsprechenden ISO Normen definierten Toleranzangaben berücksichtigt (Bild 7). Insbesondere die Toleranzangaben, bei denen Schwierigkeiten in der Eindeutigkeit der Abbildung in STEP zu erwarten sind, wurden berücksichtigt. Die für die Abbildung der Toleranzinformationen notwendigen Geometrielemente wurden mit Nummern (Flächen) und Buchstaben (Symmetrieelemente) gekennzeichnet.

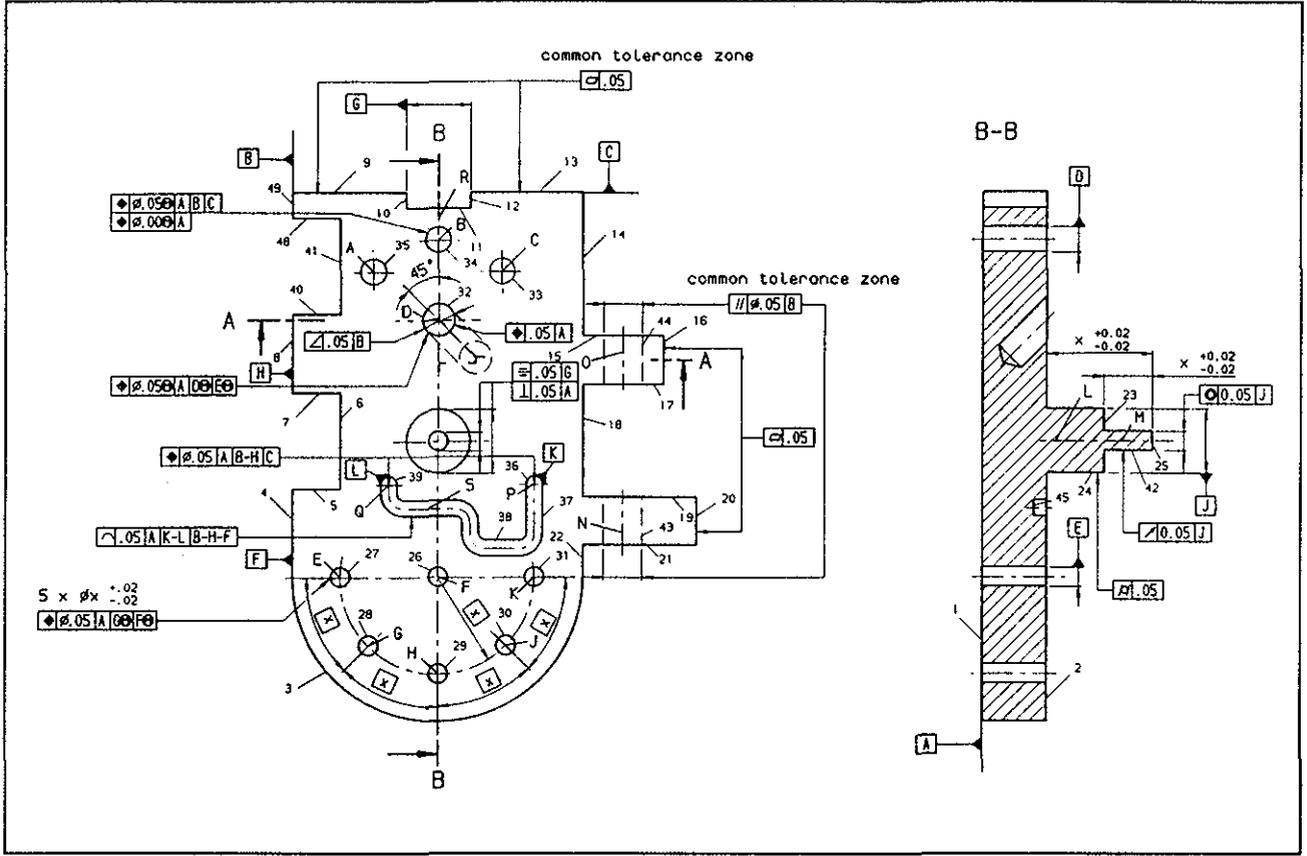


Bild 7: Test Teil

### 4.3.2 Pseudo physical File

Für den Datenaustausch wurden die Toleranzinformationen in das STEP Datenaustauschformat, das sogenannte *physical file*, überführt. Es wurde eine reduzierte Darstellung (Bild 9), in der die Geometrielemente nur als Referenz zu den einzelnen Zeichnungselementen (Bild 8) abgebildet sind, verwendet. Auf eine genaue Darstellung der Geometrie konnte verzichtet werden, da die durch diese Form der Abbildung erreichte Referenzierbarkeit der relevanten Geometrielemente ausreicht. Vollständig wurden dagegen die Toleranzangaben abgebildet. In Bild 9 ist ein Auszug des Files wiedergegeben. Dargestellt sind die Abbildungen einer Ebenheitstoleranz (*flatness tolerance*) sowie einer Maßtoleranz (*location dimension*). An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, das für diesen Beitrag vereinfachte STEP und *physical file* Darstellungen verwendet wurden. Das Defizit in der Darstellung wurde aber aufgrund der Übersichtlichkeit und des allgemeinen Characters der Ausführungen in Kauf genommen.

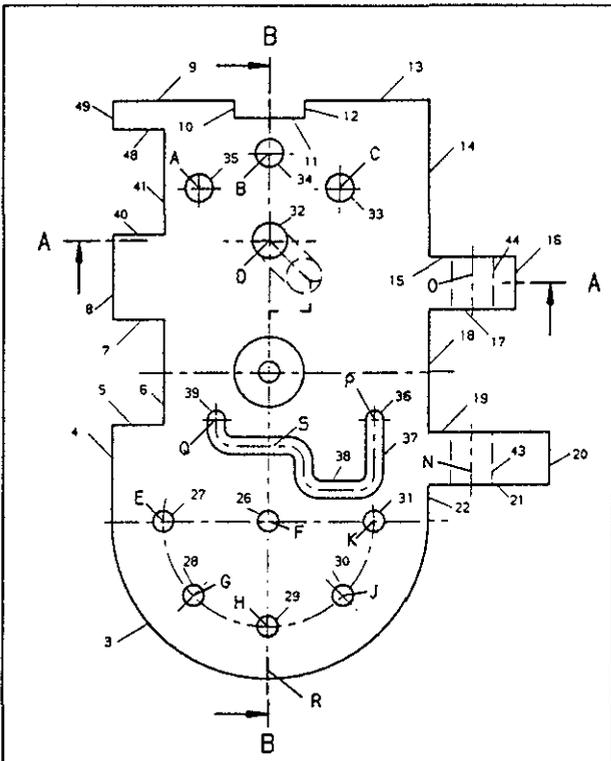


Bild 8: Geometrielemente des Test Teils

@1	surface	plane bottom	#1
@2	surface	plane top	#2
@3	surface	cylindrical	#3
.			
@9	surface	plane	#9
.			
@13	surface	plane	#13
.			
@23	surface	plane	#23
.			
@50	axis		A
@51	axis		B
.			
@80	simple_datum	A	((1))
@81	simple_datum	B	((49))
@82	simple_datum	C	((13))
.			
@140	datum_reference_frame	(80,,81,,82)	
.			
@167	flatness_tolerance	(0.05,(9,13))	
@180	tolerance_range	(0.02,-0.02)	
@181	coordinate_tolerance	(180)	
.			
@190	location_dimension	(181,23,2)	

Bild 9: Vereinfachte *physical file* Abbildung

### 4.3.3 Datenaustausch

An die, ebenfalls an der Toleranzmodellentwicklung beteiligten Partner in den USA, wurde die *physical file* Darstellung sowie eine Zeichnung der Geometrie (Bild 9) verschickt. Mit diesen Informationen konnten die Toleranzinformationen von den Partnern ergänzt werden. Ein Vergleich der erstellten Darstellungen mit der ursprünglichen Zeichnung erfolgte auf einer ISO Sitzung in Washington, DC.

### 4.3.4 Ergebnisse

Im Rahmen dieses Datenaustausches wurden unter anderem Defizite in der Definition von Bezügen im Toleranzmodell aufgezeigt. Insbesondere die Referenzierung von Flächen, die z. B. einen gemeinsamen Bezug bilden, war nicht möglich.

Für eine vollständige Rechnerinterpretierbarkeit müssen alle diesen Bezug bildenden Flächen angegeben werden. Die Änderung dieses *Entities* ist ein wichtiges Resultat des Datenaustausches, der wesentlich zur Eindeutigkeit des STEP Toleranzmodells beigetragen hat.

### 4.3.5 Schlußfolgerungen

Der durchgeführte Datenaustausch hat sich als einfaches Hilfsmittel zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Informationsmodellen erwiesen. Hiermit ist es schon vor der eigentlichen Implementierung leicht möglich, Aussagen über die Leistungsfähigkeit und Konsistenz eines Informationsmodells zu erhalten.

#### Literatur:

- /1/ W. Eversheim, B. Dahl, M. Holland, G. Marcinski  
CAD-Systeme und NC-Programmiersysteme  
koppeln  
ZWF 85 05/90 Carl Hansa Verlag, München
- /2/ G. Marcinski, U. Prengemann, M. Holland,  
B. Mittmann  
Anwendungsorientierte Analyse des zukünftigen  
Schnittstellen-Standards STEP  
ZWF 84 08/89 Carl Hansa Verlag, München

## **Forschungsaktivitäten des Instituts für Maschinenwesen**

### **Spannungsoptik**

Ermittlung und Beurteilung der Beanspruchung von Bauteilen und deren festigkeitsmäßige Optimierung

- unter statischer Beanspruchung (ebene und allgemeine räumliche Spannungszustände)
- unter dynamischer Beanspruchung (stoßartige Belastung, Ausbreitung von Spannungswellen)
- unter elastoplastischer Beanspruchung (Kerbwirkung, Festigkeitserhöhung durch plast. Formgebung)
- automatische Bildverarbeitung, Hybridverfahren Spannungsoptik- Moiré zur Untersuchung nichtlinear- elastischer Werkstoffe

### **Finite Elemente**

Ermittlung und Beurteilung der Beanspruchung von Bauteilen und deren festigkeitsmäßige Optimierung mit den Programmsystemen ASKA, ADINA, SOLVIA, MARC

- ebene und räumliche statische sowie dynamische Rechnungen
- homogenes, orthotropes sowie elastoplastisches Werkstoffverhalten
- Beanspruchungen unter Fliehkraft und Kontaktprobleme
- stationäre und instationäre Wärmerechnungen

### **Pneumatik**

- Betriebsverhalten pneumatischer Antriebe
- Widerstandsverhalten pneumatischer Elemente der Schaltungstechnik in stationärer und instationärer Strömung
- Konstruktion schneller Druckventile
- Systeme von Luftfedern und Ventilen zur Erzeugung vorgewählter Federkennlinien
- Kombination Über-/Unterdrucksysteme für die Antriebstechnik

### **Maschinenakustik**

- Systematisches Konstruieren und primäre Schallminderung
- Schallminderung an Druckluft-Drehantrieben
- Durchströmte Absorptionsschalldämpfer
- Untersuchungen zu Körperschall

### **Werkzeugmaschinen**

- Baureihen- und Baukastenentwicklung von Werkzeugen und Maschinen
- Rentabilitätsbetrachtungen
- Programmierung von Maschinen

### **Maschinenelemente**

- Beanspruchungsermittlung
- Reibung und Verschleiß an Welle-Nabe-Verbindungen und Ausgleichskupplungen
- Tragfähigkeitsberechnung und Gestaltfestigkeitsermittlung an Zahnwellen
- Stabilität und Tragverhalten von Linearlagern
- Verbindungselemente unter hohen mechanischen und thermischen Belastungen
- Plastisches Verformungsverhalten bei Zuggliedern
- Verbindungstechniken Metall-Keramik bei hohen Temperaturen

## **Verfahrenstechnische Maschinen**

- Entwicklung und Optimierung von Mühlen und Windsichtern, Zentrifugen, Heißgasgebläsen, chemischen Reaktoren, Entwicklung von Reaktionsmühlen sowie Industriebrennern in Hybridbauweise

## **CAD/CIM**

- Schnittstellen für CAD-Systeme zu FE-, Berechnungs-, Organisationsprogrammen
- Entwicklung von Kurven- und Variantenprogrammen
- Einbindung von Konstruktionsdaten in den Produktdatenaustausch
- Anwendung von Datenbanken im CIM-Umfeld
- Strategien zur Informationserfassung, Datenhaltung und -verteilung
- Konstruktionsinformationssystem
- Schnittstelle Konstruktion-Fertigungsprozeß.
- Einbindung von CAD (2D/3D) in den Konstruktionsprozeß

## **CIM-Labor**

- Erprobung von Konzepten auf der Schnittstelle Konstruktion-Fertigungsprozeß, insbesondere CAD-NC-Verfahrenskette
- Ermittlung von Daten zur Qualitätssicherung und Übergabe zur Konstruktion
- Einbindung von PPS-Systemen

## **Laufende Forschungsprojekte**

- Zahn- und Keilwellenverbindungen, Beanspruchungen und Verschleiß
- Geschwächte Schrumpferverbindungen, Beanspruchungen und Berechnung
- Seiltrommeln (ein- und mehrlagig bewickelt)
- Konstruktionssystematik an Maschinen der Verfahrenstechnik, Expertensysteme für verfahrenstechnische Maschinen
- Projekte aus dem Sonderforschungsbereich "Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen" (Windsichter, Mühlen, Heißgasventilatoren, heterogen-gaskatalytische Festbettreaktoren, Entwicklung von Reaktionsmühlen)
- Entwicklung von Hochleistungs-Ofenbrennern und Ofenkonstruktion
- Entwicklung von Maschinenelementen und Verbindungstechniken bei hohen Temperaturen (über 1000 °C)
- Systematisches Konstruieren lärmärmer Maschinen
- Modelluntersuchungen zur elasto-plastischen Beanspruchung von Maschinenelementen (Optimierung von Zuggliedern mit teilplastischer Verformung)
- Dynamische Spannungsoptik (Bauteilbeanspruchung, Untersuchungen der dynamischen Zusammenhänge beim Prallmahlen)
- Spannungsoptische Auswerteverfahren mittels elektronischer Bildverarbeitung
- Spannungsoptische Ermittlung von Textureffekten in Metallen
- Hybridverfahren Spannungsoptik - Moiré
- Schallemission, Schallanalyse im schallarmen Raum
- Schallminderung an Druckluft-Drehkolbenmotoren
- Programmierung elektronisch gesteuerter Werkzeugmaschinen
- Detailkonstruktionen an Werkzeugmaschinen
- Beanspruchungsanalyse und Optimierung stoßbelasteter Maschinenteile
- Einbindung von CAD in den interaktiven Konstruktionsprozeß
- Entwicklung von CIM-Schnittstellen (CAD-Normteiledatensatz, CAD-NC-Verfahrenskette, CAD- und Betriebsmittelmodelle)

## **Weiteres Leistungsangebot**

### **Beratung und Erstellen von Gutachten**

- Festigkeit von Bauteilen
- Berechnung, Untersuchung, Messung
- Entwicklung neuer Konstruktionen
- CAD-Einführung in Betriebe
- Erstellung von Schnittstellen

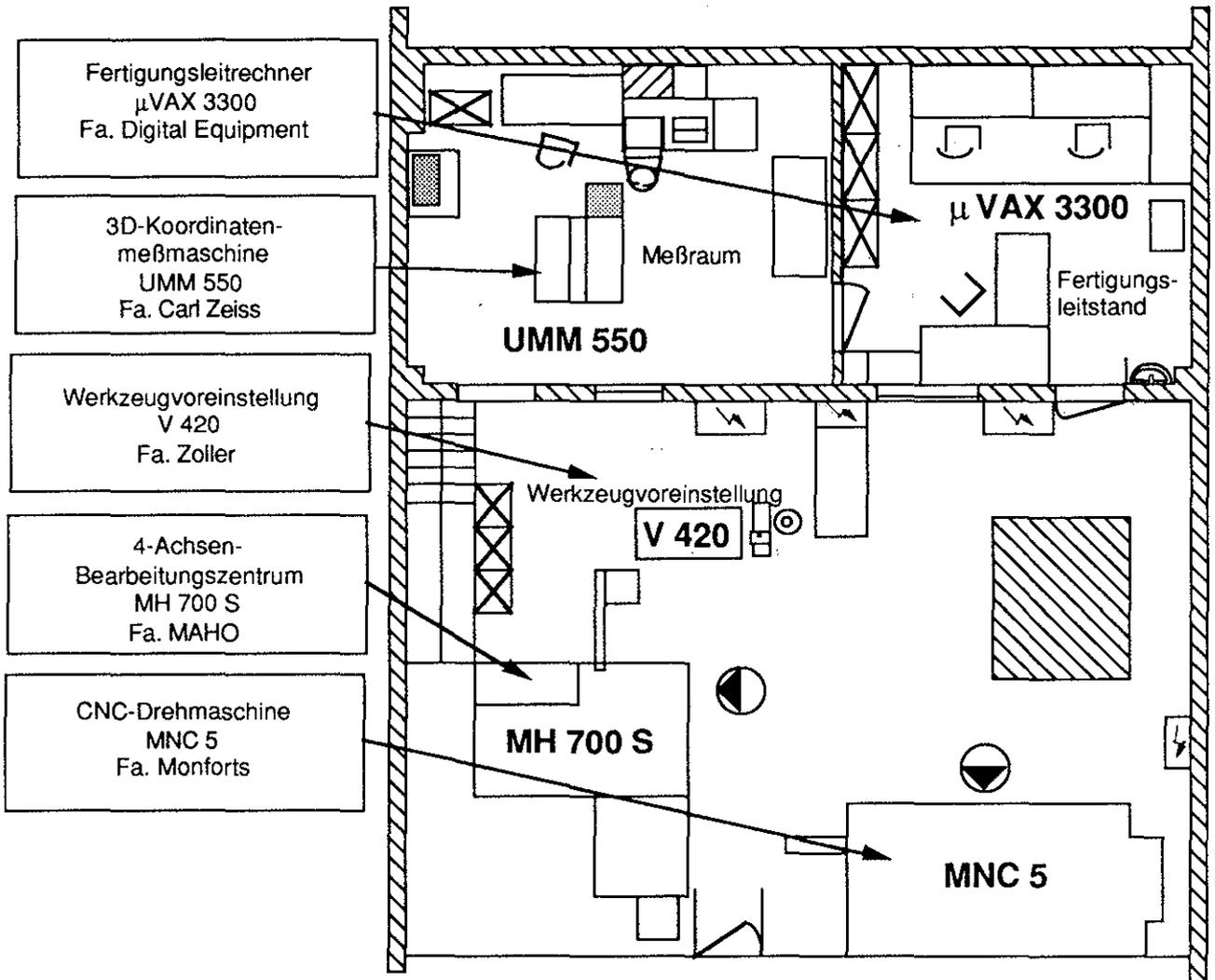
### **Fort- und Weiterbildung**

- Seminare über Spannungsoptik, CAD- Einführung, Systematisches Konstruieren, pneumatische Antriebstechnik

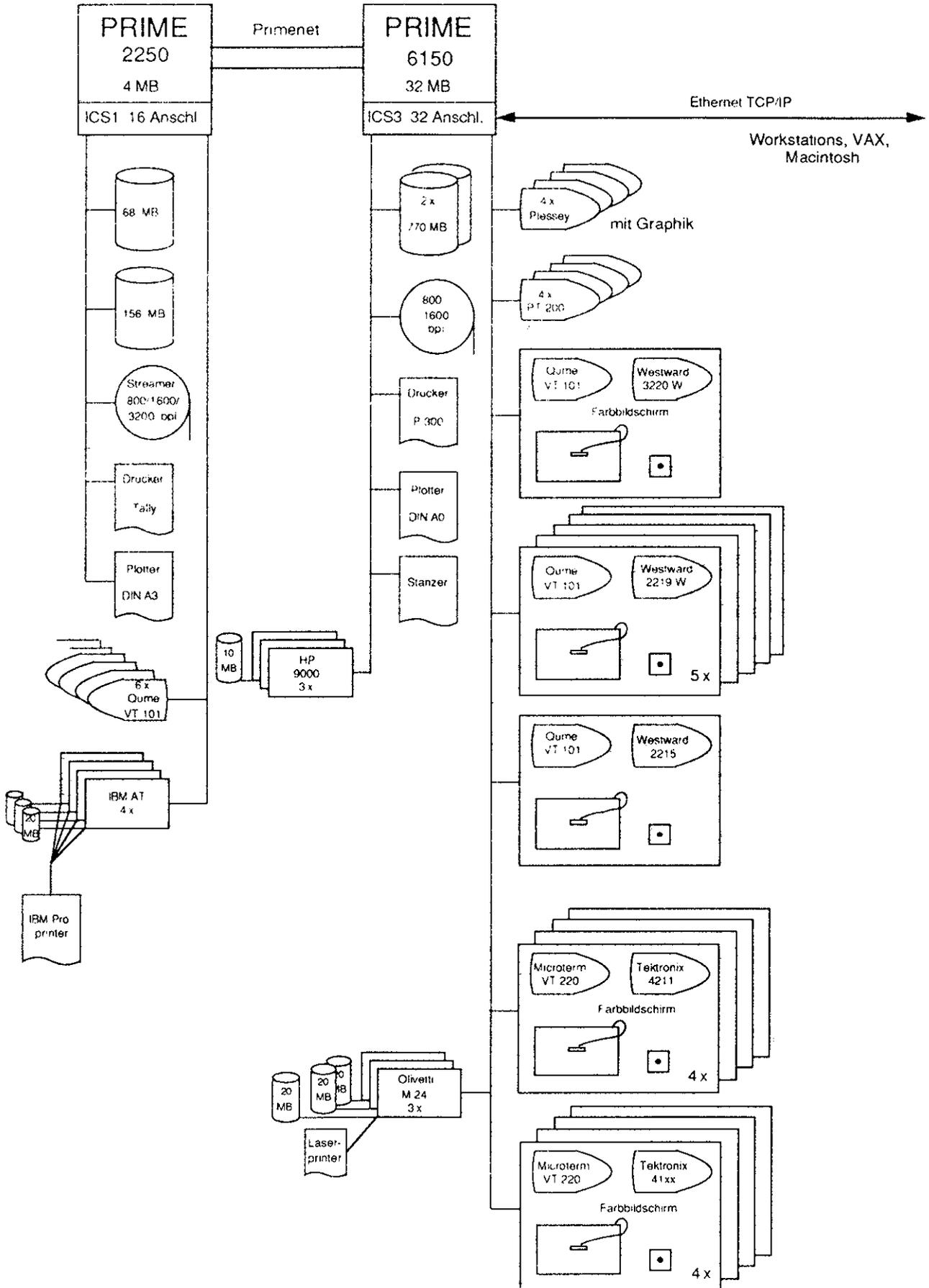
### **Kooperation mit der Industrie**

- Werkzeugmaschinenindustrie
- Verfahrenstechnische Industrie
- Schwermaschinenindustrie
- Maschinen- und Apparatebaufirmen allgemein

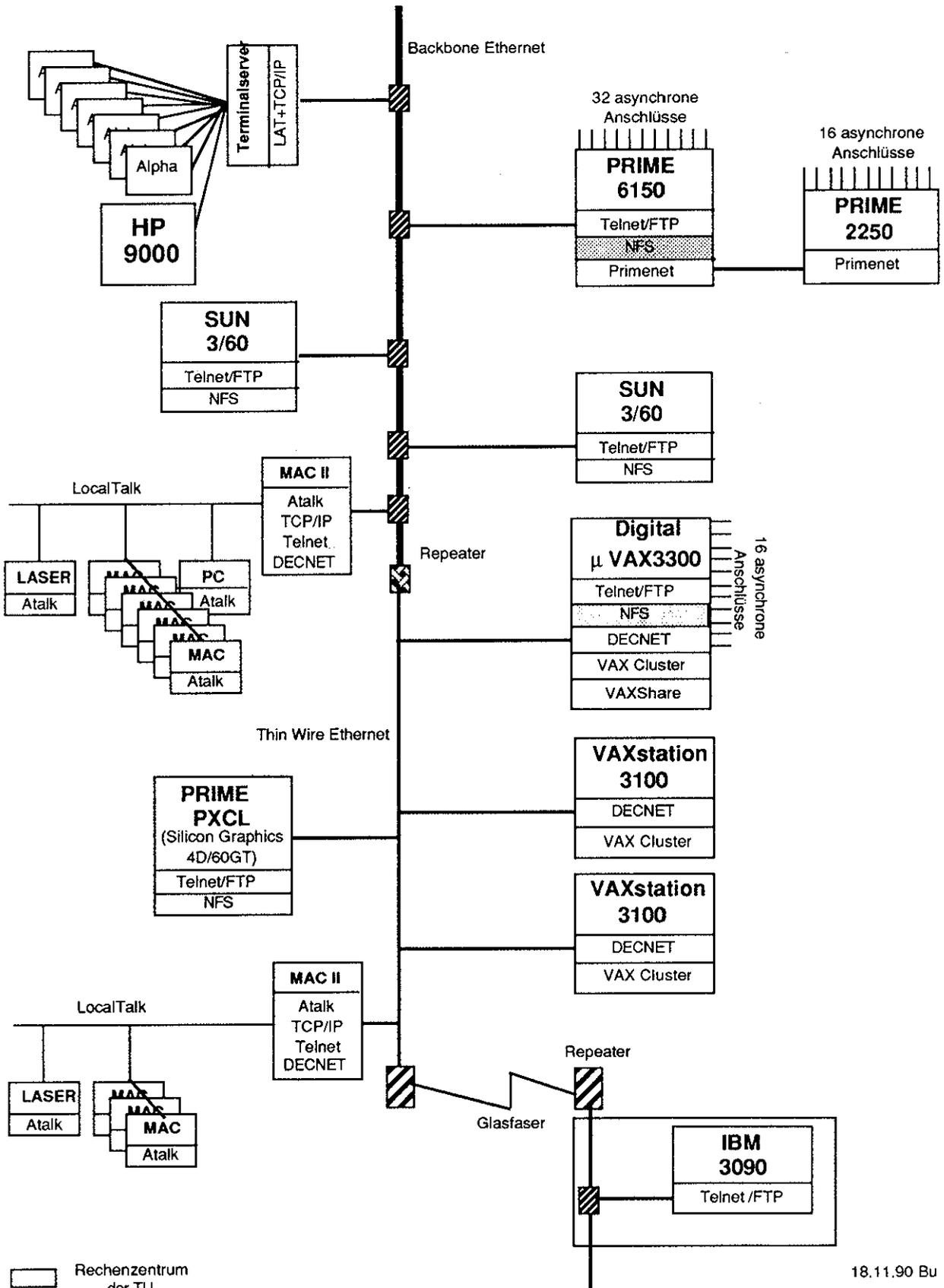
# Layout des CIM-Labors



# Konfiguration CAD/CAE-Rechner



# Netzwerkkonfiguration



# Softwareausstattung der Multitasking-Systeme im IMW

	<b>PRIME 2250/6150</b>	<b>SUN 3/60</b>	<b>VAX 3300/3100</b>	<b>PRIME PXCL 5500</b>
<b>FEM</b>	ASKA ASKAMESH ASKAVIEW NPCL MENTAT MARC	MENTAT (MARC) (I-DEAS)	(MENTAT) (MARC) (I-DEAS)	MENTAT (MARC) (I-DEAS)
<b>CAD</b>	MEDUSA	MEDUSA	MEDUSA	MEDUSA 3D
<b>NC</b>	AUTOPIT GNC	GNC	AUTOPIT GNC	GNC
<b>Werkstatt- steuerung und Ver- waltung</b>			DATAPLAN-P DATAPLAN-M DATAPLAN-J DATAPLAN-W WKZ+	
<b>Expertensystems- hell</b>	KES	KES		
<b>Benutzungsober- fläche</b>	PRIFORMA (X-Windows)	SUNTOOLS X-Windows	FMS DEC Windows	4Sight X-Windows
<b>Datenbank</b>	ORACLE	ORACLE	(ORACLE) RDB	(ORACLE)
<b>Software Entwicklungs- unterstützung</b>	DEBUG	UNIX-Tools	VAX-Set	UNIX-Tools
<b>Programmier- sprachen</b>	EMACS FORTRAN 77 C PASCAL	(EMACS) FORTRAN 77 C PASCAL	(EMACS) FORTRAN 77 C PASCAL	(EMACS) FORTRAN 77 C
<b>Netzwerke</b>	NFS FTP / TELNET TCP/IP PRIMENET	NFS FTP / TELNET TCP/IP	NFS FTP / TELNET TCP/IP DECNET PARTY-LINE	NFS FTP / TELNET TCP/IP
<b>Betriebssystem</b>	PRIMOS Rev. 22	UNIX SunOS 4.0.3	VMS5.1-1	UNIX IRIX 3.2

(Produkt) bei Bedarf installierbar bzw. Installation geplant

## Lebensläufe

*Albers, Jürgen:* Jahrgang 1959, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal. Seit 01.08.1986 wiss. Mitarbeiter am IMW.

*Bock, Uwe:* Jahrgang 1963, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.10.1988 wiss. Mitarbeiter am IMW.

*Bugow, Rainer:* Jahrgang 1958, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.10.1988 wiss. Mitarbeiter am IMW.

*Deppermann, Georg:* Jahrgang 1959, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal. Seit 01.08.1986 wiss. Angestellter am IMW.

*Dietz, Peter:* Jahrgang 1939, studierte Maschinenbau an der TH Darmstadt, wiss. Assistent am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebe der TH Darmstadt, Promotion 1971 über die Berechnung von Seiltrommeln seit 1974 Leiter der Stabstelle Konstruktionssysteme der Pittler Maschinenfabrik AG, Langen, seit 1977 dort Leiter der Entwicklungsabteilung, seit 01.10.1980 Professor und Institutsdirektor des IMW.

*Gang, Wan:* Jahrgang 1952, studierte exp. Mechanik an der Tongzi-Universität Shanghai mit dem Abschluß Master Eng.. Seit 01.01.1982 Dozent am Institut für exp. Mechanik der Tongzi-Universität Shanghai. Seit 28.03.1988 Stipendiat und seit 01.08.1987 wiss. Angestellter am IMW.

*Holland, Martin:* Jahrgang 1961, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.10.1988 wiss. Mitarbeiter am IMW.

*Jakel, Roland:* Jahrgang 1965, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.09.1990 wiss. Mitarbeiter am IMW.

*Kalliwoda, Werner:* Jahrgang 1959, studierte allg. Maschinenbau an der TH Darmstadt, seit 01.12.86 wiss. Angestellter am IMW.

*Kruse, Peter J.:* studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.11.1989 wiss. Mitarbeiter am IMW.

*Neumann, Uwe:* Jahrgang 1963, studierte Verfahrenstechnik; Schwerpunkt Anlagenbau/Energieverfahrenstechnik an der TU Clausthal, seit 01.10.90 wiss. Mitarbeiter am IMW.

*Prengemann, Ulf:* Jahrgang 1962, studierte Fertigungstechnik / Maschinenbau an der TU Dresden. Vom 01.03. 1987 bis zum 30.6.1988 Konstruktionssingenieur beim VEB Entwicklungs- und Musterbau Baumechanisierung Berlin. Seit 01.10.1988 wiss. Mitarbeiter am IMW.

*Rothe, Frank:* Jahrgang 1961, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal. Seit 01.03.1989 wiss. Mitarbeiter am IMW.

*Schäfer, Günter:* Jahrgang 1963, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.11.89 wiss. Mitarbeiter am IMW.

*Tan, Zhenlun:* Jahrgang 1958, studierte Maschinenbau an der TU Fuxin (China) mit dem Abschluß Master Eng.. Seit 01.09.1985 Assistent am Institut für Maschinenwesen der TU Fuxin; seit 01.07.1988 wiss. Angestellter am IMW.

*Wächter, Martina:* Jahrgang 1959, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.04.85 wiss. Mitarbeiterin am IMW.

*Wesolowski, Klemens:* Jahrgang 1963, Student der Fachrichtung allg. Maschinenbaus an der TU Clausthal, ab 01.01.91 wiss. Mitarbeiter am IMW.