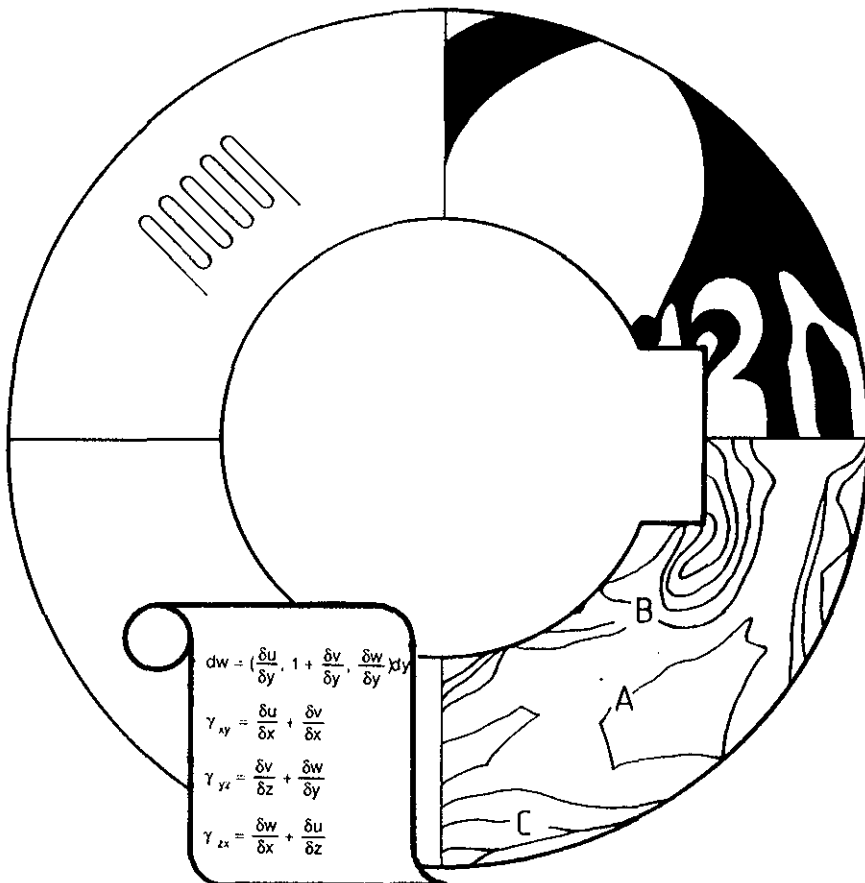




Institut für Maschinenwesen

Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz

Mitteilung Nr. 13 (1988)



**Mitteilungen aus dem
Institut für Maschinenwesen
der
Technischen Universität Clausthal
Nr. 13
(November 1988)**

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz

Redaktion und Layout: Sebastian Morgenroth und Mathias Appeldorn

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

Titelbild: Am Institut für Maschinenwesen werden Maschinenelemente mit Hilfe hybrider Beanspruchungsermittlung untersucht. Dazu zählen

- links oben: - Dehnungsmessungen am realen Bauteil
- rechts oben: - ebene und räumliche spannungsoptische Untersuchungen
- rechts unten: - Finite- Elemente- Rechnungen
- links unten: - analytische Berechnungen

Inhaltsverzeichnis		Seite
	Vorwort	2
P. Dietz	Methodisches Konstruieren - Universitäre Lehrdisziplin und praxisorientierte Arbeitsmethode	4
G. Deppermann	Das Computer-Investitionsprogramm und seine Anwendung im Institut für Maschinenwesen	20
N. Müller	Entwicklung von CIM-Schnittstellen	24
H.-J. Barth	Widerstandsverhalten pneumatischer Elemente und deren Kennzeichnung	30
N. Müller	Wirtschaftlicher Einsatz von CAD für die Konstruktion von Trommelzentrifugen mit Hilfe eines Variantenprogrammes	36
S. Morgenroth	Entwicklung eines Umwälzaggregates für Gastemperaturen jenseits von 1000°C	42
J. Ebert, L. Tan	Näherungsweise Berechnung der durch aufgezwungene Verschiebungen belasteten Kreisringplatte mit großen Deformationen	48
A. Siemieniec	Ausgewählte Probleme der Dynamik der Kräne	50
M. Wächter	Finite-Elemente-Untersuchung an einer Förderseiltrommel	56
W. Kalliwoda	Spannungsoptische Modelluntersuchung an einer Schreitausbau- Einheit	62
A. Kratzsch	Festigkeitsberechnung einer Schildkappe für einen Untertage- Schreitausbau mit der Methode der Finiten Elemente (FEM)	66
G. Wan	Ein hybrides Meßverfahren mit Spannungsoptik und Moire	70
G. Wan, J. Albers	Dynamische spannungsoptische Untersuchungen über das Körperschallverhalten von Aggregatträgern	76
M. Quaß	Digitale Signalanalyse - Möglichkeiten und Grenzen	82
	Lebensläufe	89
	Forschungsaktivitäten des Instituts für Maschinenwesen	90
	Laufende Forschungsprojekte	91
	Rechnerkonfiguration des Instituts für Maschinenwesen	92
	Rechner-Standardsoftware des Instituts für Maschinenwesen	93

Vorwort

In den beiden Jahren seit dem Erscheinen der letzten Mitteilungen hat das Institut für Maschinenwesen einen erheblichen Schritt in der Entwicklung seiner Lehr- und insbesondere seiner Forschungsaufgaben getan. Die Einbindung des Faches Konstruktionslehre in den Wahlpflichtfachkatalog für Maschinenbau-Studenten ist vollzogen und hat uns damit unter anderem die Auflage der CAD-Ausbildung gebracht. Das Angebot für Studierende höherer Semester wurde um eine CIM-Vorlesung erweitert und Herr Prof. Dr.-Ing. Reihlen, Direktor des DIN, liest eine Einführung in die Normungskunde, die gerne besucht wird. Die von Herrn Dr. Hirchenhain vorgetragene Vorlesung zur experimentellen Spannungsanalyse erfreut sich nach wie vor großer Beliebtheit. Im nächsten Jahre werden wir erstmals innerhalb unserer Zusammenarbeit mit der DDR eine Vorlesungsveranstaltung von Prof. Dr. sc. Höffl aus Freiberg über Konstruktion und Berechnung verfahrenstechnischer Maschinen einführen.

Im Bereich der Forschung ist zunächst zu berichten, daß der Sonderforschungsbereich 180: "Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen bei besonderen mechanischen, thermischen und chemischen Belastungen" seit Beginn 1988 endgültig an der TU Clausthal und mit der Geschäftsstelle am Institut für Maschinenwesen eingerichtet ist. Dies bedeutet für uns eine kontinuierliche Forschung in enger Zusammenarbeit mit verfahrenstechnischen Kollegen, die uns viel Freude macht und die auch seitens der Industrie mit einem lebhaften Interesse wahrgenommen und unterstützt wird. Mit Projekten aus diesem Bereich sind fünf wissenschaftliche Mitarbeiter des Institutes betraut, zwei Artikel dieser Mitteilungen berichten über Teilprojekte. Aus den Aufgabenstellungen des SFB entstanden ferner Projekte wie die Untersuchung des Prallmahlvorganges mit Hilfe dynamischer spannungsoptischer Methoden oder die Entwicklung von Konstruktionsregeln für Verbindungssysteme aus Keramik im Anwendungsbereich sehr hoher Temperaturen.

Der zweite, neu angeworbene Forschungsbereich beschäftigt sich mit der Entwicklung von Schnittstellen für die rechnergestützte Konstruktion und

Fertigung (CIM). Hier arbeiten wir gemeinsam mit mehreren Hochschulen und vor allem mit den Gremien des DIN, in einem Aufsatz dieser Mitteilungen sind die Themenstellungen und die entsprechenden Zusammenarbeiten auf nationaler und internationaler Basis näher beschrieben. Hier arbeiten vier wissenschaftliche Mitarbeiter, die Diskussionsrunde zu diesem für die Entwicklung des Maschinenbaus und der Konstruktionstechnik hochbrisanten Thema zieht sich durch das ganze Haus.

Erfreulicherweise wurden die genannten Aktivitäten durch einige Investitionen der letzten beiden Jahre unterstützt. Als erstes ist zu nennen, daß nach langen Beantragungsvorgängen und Ärgernissen die Umbaumaßnahmen in diesem Jahre endlich begonnen haben. Damit ist nicht nur eine Renovierung unseres schönen Gebäudes verbunden, auch die Einrichtung neuer Labors und eine Verbesserung der Werkstattausrüstung kann endlich verwirklicht werden. Im Rahmen des CAD-Programms des Niedersächsischen Ministers für Wissenschaft und Kunst wird bis Ende des Jahres die CAD-Ausrüstung erheblich erweitert, so daß wir in Kürze etwa 10 großflächige CAD-Arbeitsplätze zur Verfügung haben werden. Die Rechnerkonfiguration und die vorhandene Software können Sie einer Kurzinformation am Ende des Heftes entnehmen. Und - last no least - sind wir guter Hoffnung, daß wir für die durchgängige Ausbildung der Studenten in rechnergestützter Ingenieurarbeit mit Mitteln der Stiftung Volkswagenwerk ein CIM-Labor einrichten können, mit dessen Hilfe wir dem Studenten die Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Fertigung besonders intensiv nahebringen wollen.

Mit dieser personellen und ausstattungsmaßbigen Konstellation ist für die Lehre wie für die Forschung ein Zentrum geschaffen worden, das die Gestaltung von Bauteilen nach Beanspruchungs- und Fertigungsgesichtspunkten mit Hilfe modernster Konstruktionsmethoden ermöglicht und das in dieser Konzentration nur an sehr wenigen Institutionen zu finden ist.

Auch bei unseren Auslandskontakten ist eine erhebliche Erweiterung zu verzeichnen. Die Zusammenarbeit mit der Universität Zaragoza wurde in das ERASMUS-Programm aufgenommen, damit ist ein jährlicher Austausch von mindestens vier deutschen und vier spanischen Studenten verbunden, Vorlesungen und Seminare sollen das Lehrangebot beider Hochschulen mit Aktivitäten aus der Partnerhochschule ergänzen. Dies wird von den Studierenden mit großer Begeisterung aufgenommen und führte 1987 zu einer einwöchigen Exkursion nach Zaragoza mit ca. 45 Teilnehmern. Auch der Kontakt mit Krakau erfährt zur Zeit mit einer gemeinsamen Forschungsaufgabe auf dem Gebiet der Beanspruchung von Maschinenelementen unter teilplastischer Verformung eine Verstärkung, hier tragen die gegenseitigen Besuche und Informatio-

nen meines Erachtens besonders viel zur Völkerverständigung bei. Daneben gibt es Kontakte zu mehreren Universitäten in Mexiko, die sich auf das Gebiet des methodischen Konstruierens beziehen.

Die folgenden Beiträge sollen in loser Folge ein Bild der Interessensgebiete dieses Institutes vermitteln und damit den technisch-wissenschaftlichen Kontakt besonders zwischen Industrie und Hochschule fördern helfen. Die meisten Beiträge behandeln Problemstellungen, die aus der Praxis an uns herangetragen wurden oder die die Möglichkeiten des Institutes zur beanspruchungsgerechten Gestaltung von Maschinenteilen aufzeigen. Ich würde mich freuen, wenn der eine oder andere Artikel Ihr Interesse fände und eventuell zu Diskussionen oder Anregungen aus industrieller Sicht führt.

Clausthal-Zellerfeld, im Dezember 1988



METHODISCHES KONSTRUIEREN - UNIVERSITÄRE LEHRDISZIPLINEN UND PRAXISORIENTIERTE ARBEITSMETHODE

Prof. P. Dietz

Vortrag gehalten in Monterrey, Mexiko im Sept. 1987 und in Saragosa, Spanien im Okt. 1987 im Rahmen von Kooperationsprogrammen.

Einleitung

Der Gedanke der methodischen und damit branchenunabhängigen Lösungsfindung technischer Probleme hat nacheinander längeren Zeit der wissenschaftlichen Durchdringung und des Sammels industrieller Erfahrungen zu einer neuen Lehrdisziplin "Konstruktionslehre" an deutschen Universitäten geführt, die mittlerweile fester Bestandteil der Ingenieurausbildung des Maschinenbaus und der Verfahrenstechnik ist. Trotz der zweifellos guten Erfolge bei der Anwendung dieser Methode zur Lösung industrieller Aufgaben kann aber von einer breiten Anwendung, von einer "Umstellung der Arbeitsweise im Konstruktionsbüro" noch nicht gesprochen werden. Durch Pahl u.a. [1 bis 3] wurde der Stand der industriellen Anwendung dieser Methoden und die Schlußfolgerungen für eine modifizierte Maschinenbau-Ausbildung hinterfragt mit dem Ergebnis, daß

- die Teile des methodischen Vorgehens, die der Information, der Abrenzung, der Verantwortung oder der Dokumentation dienen, sich besonders schnell in die vorhandenen Abläufe und Strukturen integrieren lassen, da durch diese Hilfsmittel eigentlich keine Veränderungen hervorgerufen werden.*
- die der Lösungsfindung dienenden intuitiven Methoden zur Förderung der Kreativität (z.B. Brainstorming) in Einzelfällen wohl angewendet werden, daß aber gerade die Arbeit in interdisziplinären ad hoc-Teams auf Durchsetzungsschwierigkeiten in den meist von starren hierarchischen Abteilungsstrukturen geprägten Maschinenbauunternehmen stößt. Hier liegt vielleicht ein Generationenproblem vor, nach wie vor vertraut man heute meist auf die Kreativität des Konstrukteurs als Individuum.*

- alle das Abstraktionsvermögen des Konstrukteurs fordernden Methoden sich nur schwer durchsetzen. Hierzu gehört die Funktionsanalyse ebenso wie die diskursive Lösungssuche mittels Ordnungsschemata oder Konstruktionskatalogen.

Neben diesen mehr methodisch orientierten Teilen bietet die Konstruktionslehre mit der Behandlung von Baukasten-Baureihen-Strukturen, Konstruktionsregeln oder Ansätzen zum wirtschaftlichen Konstruieren [4] auch eine Erweiterung des Fakten- oder Erfahrungswissens, die in der Praxis gerne angenommen wird [5].

Im folgenden soll nach einem kurzen Abriß über die Anwendung konstruktionsmethodischer Vorgehensweisen in der Praxis - meist aus der Erfahrung des Verfassers - die Einordnung in die Ausbildung des Ingenieurs beschrieben und einige Vorschläge für eine gleichzeitige Einführung in industriellen Unternehmen gemacht werden.

1 Grundlagen des Methodischen Konstruierens

Die wissenschaftliche Grundlage der Konstruktions-systematik und der Konstruktionslehre beruht auf drei Analysen (Bild 1):

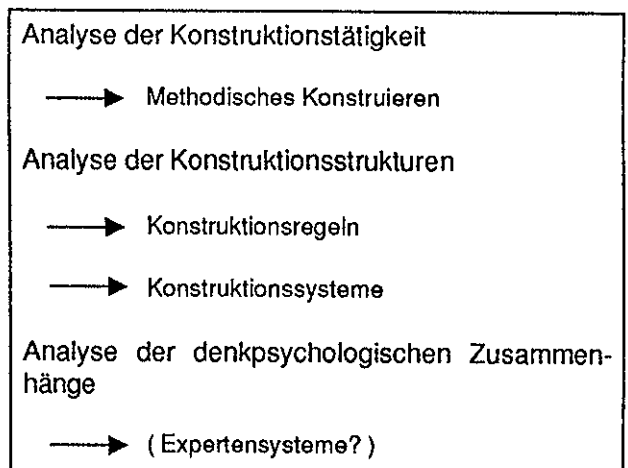


Bild 1: Die drei Grundanalysen zur Konstruktionssystematik

- Die Analyse der Konstruktionstätigkeit führt zu methodischem Vorgehen. Hier wird durch ein Einordnen und Zusammenfassen der beim Konstruieren "sichtbaren" Vorgänge ein Arbeitsschema erarbeitet.
- Die Analyse der Konstruktionsstrukturen führt zu Konstruktionsregeln und Konstruktionsprinzipien. Diese Untersuchung hat ihre Wurzel in dem Gedanken, daß die bisher branchenbezogenen typischen Konstruktionen nach bereichsübergreifenden Prinzipien aufgebaut sein müßten. Zum Beispiel gibt es das Problem der Wärmedehnung beim Bau von Kraftfahrzeugmotoren ebenso wie bei chemischen Apparaten oder im Werkzeugmaschinenbau. Der Gedanke der Konstruktions-systematik liegt darin, daß man die in einer Branche erarbeiteten Mittel und Prinzipien übertragen kann auch auf andere Anwendungsgebiete, wenn die konstruktive Problematik allgemein und damit anwendungsunabhängig definiert werden kann.
- Die Analyse der denkpsychologischen Zusammenhänge führt auch zur Analyse der von Datenverarbeitungsanlagen übernehmbaren Aufgaben und damit zur rechnerunterstützten Konstruktion, wobei vom Rechner nicht nur Tabellen, Graik und Analytik erstellt, sondern auch logische Entscheidungen aufgrund von Erfahrungen mindestens vorbereitet oder sogar durchgeführt werden können. Hieraus leiten sich erste Vorstellungen für den Aufbau von Beratungs-(Experten-) Systemen ab, die nicht nur lineare Abfrage und Identifikation ermöglichen.

In allen Punkten gibt es verschiedene Lehmeinungen, die Entwicklung ist voll im Fluß [6]. Bezüglich der Denkpsychologie ist man erst ganz am Anfang und bemüht sich zunächst Brücken zu schlagen zwischen den Ingenieuren und den Geisteswissenschaftlern.

Zur Beschreibung des Problems beim Konstruieren kann man nach [7] die allgemeine Definition des Problems aus der Denkpsychologie heranziehen:

Ein Problem liegt vor, wenn ein Individuum sich in einem Zustand befindet, den es nicht für wünschenswert hält, aber nicht die Mittel hat, ihn in einen erwünschten Zustand zu wandeln.

Im Gegensatz hierzu liegt eine Aufgabe dann vor, wenn Anforderungen mit bekannten Mitteln bewältigbar sind. Auf die Konstruktion bezogen stellt sich diese Situation in Bild 2 dar.

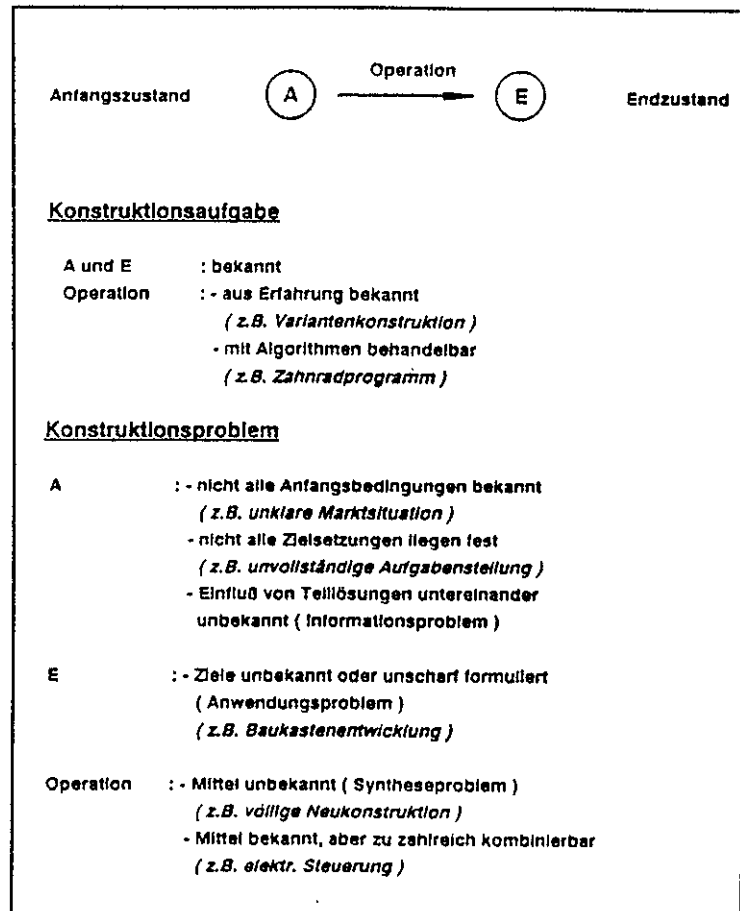


Bild 2: Konstruktionsaufgabe und Konstruktionsproblem

Die Operation, um von dem Anfangszustand in den Endzustand zu kommen, ist für die Konstruktionsaufgabe bekannt, auch die beiden Zustände sind bekannt. Dabei kann diese Operation entweder aufgrund bereits gewonnener Erfahrungen durchgeführt werden, oder es gibt einen Algorithmus, der angewendet wird. Beim Konstruktionsproblem dagegen haben wir schon bereits Schwierigkeiten bei der Definition der Anfangs- und Endzustände. Sehr oft ist nach [7] die Aufgabenstellung nicht klar, die vorhandenen Randbedingungen wie Marktsituation, Ausgangsposition einer bestehenden Lösung oder eine Voraussage über die Beeinflussung von Teillösun-

gen untereinander oder auf die Gesamtlösung sind nur schwer vorhersehbar. Das gleiche gilt für den Endzustand: In vielen Fällen wie z.B. bei der Konstruktion von Baukastensystemen ist man sich über den Anwender noch unklar. Bei der Operation, um vom Anfangs- auf den Endzustand zu kommen, sind entweder die Mittel unbekannt (dies ist der Fall bei völligen Neukonstruktionen) oder aber die Mittel sind bekannt, aber sie sind so zahlreich und so zahlreich kombinierbar, daß der Konstrukteur durch die Variantenvielfalt und ihre Beurteilung überfordert wird. Und so ist es eigentlich auch verständlich, daß jeder Konstrukteur ein Konstruktionsproblem gerne in eine Konstruktionsaufgabe verwandeln möchte, da er sich damit dann wieder auf bekanntem und risikoarmem Gelände befindet.

Besonders im Bereich der Planung neuer Produkte ist diese Grunderkenntnis besonders wichtig. Nach [8] zeigt eine Analyse in der Maschinenbauindustrie, daß die zeitliche und personelle Konstruktionskapazität im allgemeinen nur zu 10 % für die Konzeptphase eingesetzt wird. Das bedeutet, daß statt der notwendigen Anstrengung zur Findung neuer Produkte, Märkte und Fertigungstechniken ("Problem") der Schwerpunkt in der Verbesserung bestehender Produkte und Vorgehensweisen durch die Kreation neuer Zeichnungen durch mehr oder weniger starke Variation vorhandener Unterlagen ("Aufgabe") liegt. Eine Änderung der betrieblichen Zielsetzungen zu mehr Innovation ist nach [8] eine wichtige Herausforderung.

Die Analysen zur Konstruktionstätigkeit haben ergeben, daß der Grundbaustein des Konstruierens immer aus der in Bild 3 dargestellten Tätigkeit besteht: Ein Problem muß zunächst analysiert werden. Hat der Konstrukteur für sich das Problem so formuliert, daß er es durchdacht hat, kann er zur Lösungsfindung schreiten. Der kreative Konstrukteur entwickelt in diesem Stadium eine Reihe von möglichen Lösungen, die er dann später einer Bewertung unterzieht. In dieser Bewertung entscheidet er sich unter technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten für die beste der in der vorangegangenen Synthese gefundenen Lösungen.

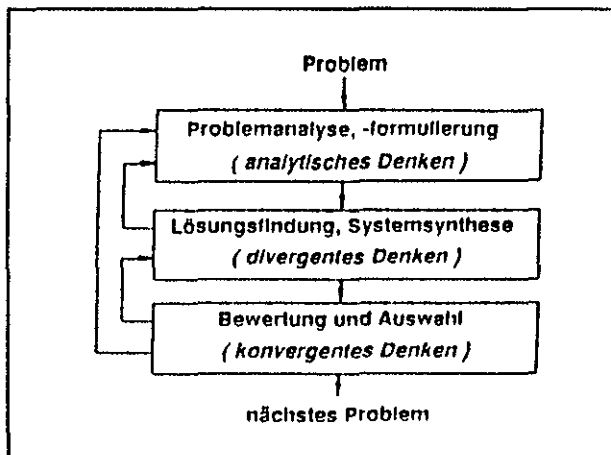


Bild 3: Der grundsätzliche Lösungsprozeß beim Konstruieren

Man sieht schon sehr deutlich, daß vom Konstrukteur im ersten Schritt die Fähigkeit des analytischen Denkens abverlangt wird. Daraufhin folgt eine Phase divergenten Denkens, also des Erzeugens vieler Lösungen in möglichst kurzer Zeit. Und in einem abschließenden konvergenten Gedankenschritt muß er seine eigenen Lösungen kritisch beurteilen und sich für die beste entscheiden. Danach kann er zum nächsten Problem oder auch zur nächsten Konstruktionsphase übergehen.

Die weitere Erkenntnis ist, daß sich dieser Vorgang schleifenartig in mehreren Stadien des Konstruktionsprozesses wiederholt und daß man dann diesen Konstruktionsprozeß in Phasen zunehmender Konkretisierung unterteilen kann. Dies führt zu der grundsätzlichen Betrachtung des Konstruktionsvorgangs mit Hilfe der Systemtechnik. Aus dieser Betrachtungsweise ist eine Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte entstanden [9], deren Kerndarstellung des Konstruktionsvorganges im Bild 4 dargestellt ist. Man unterscheidet dabei sieben Schritte, wobei ganz rechts im Bild wieder die einzelnen Phasen Aufgabenklärung, Kurationsphase, Entwurfsphase und Ausarbeitungsphase erkennbar sind. Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte zeigen die fortschreitende Konkretisierung von der Anforderungsliste über prinzipielle Lösungen, modulare Strukturen bis zum Gesamtentwurf und dann in der endgültigen Ausführung bis zur Produktdokumentation.

Auch der traditionelle Weg der Konstruktion führt immer über die Wahl des Wirkprinzips, eine Grobge-

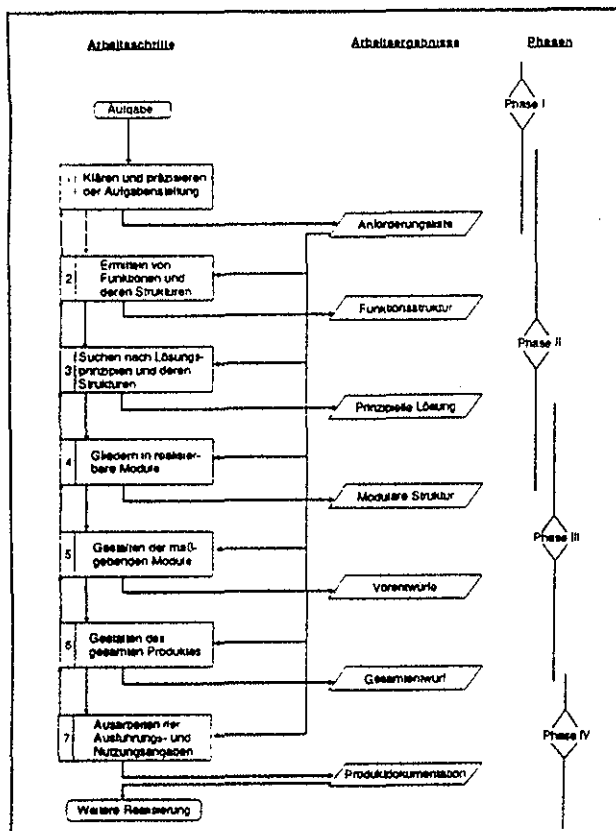


Bild 4: Systemanalytische Vorgehensweise des Konstruierens nach IRI

staltung mit Dimensionierung und eine Feingestaltung der Elemente bis zum endgültigen Entwurf in einer Gesamtzeichnung. Ein häufiger Mangel konstruktiven Vorgehens ist es aber, von der Lösungssuche bereits in die Gestaltungsphase zu springen, ohne von vornherein alle zu lösenden Teilaufgaben und Wirkprinzipien zu untersuchen.

Durch die Methodisierung des Konstruktionsprozesses ist klar geworden, daß zur Bearbeitung komplexer Aufgaben dieses beschriebene Vorgehen erforderlich ist, wenn arbeitssparend und effektiv gehandelt werden soll. Ausgehend von dem dargestellten Bild 3 der systemanalytischen Vorgehensweise wurde speziell für die Konstruktionsmethodik des Maschinenbaus nach [5] eine Vorgehensweise entwickelt, die gekennzeichnet ist durch

- Klären der Aufgabenstellung (Information)
- Erkennen der wesentlichen Probleme (Abstraktion),
- Festlegen der zu erfüllenden Funktionen (Definition),
- Suche nach Lösungen für diese Funktionen (Kreation),

- Auswahl von Lösungen und Bewertung hinsichtlich der Zielsetzung (Kontrolle).

Dieser Vorgang wiederholt sich auf den verschiedenen Konkretisierungsebenen des Konzipierens, des Entwerfens und des Ausarbeitens.

Innerhalb der einzelnen Verfahrensschritte werden eine Reihe von Methoden verwendet, wie sie auch aus anderen Disziplinen bekannt sind. Wertanalyse und Konstruktionsmethodik enthalten eine Reihe gleicher oder sehr ähnlicher Vorgehensschritte und ergänzen sich in der industriellen Praxis sehr erfolgreich. Zum Finden der Lösungen werden Methoden wie das Brainstorming oder eine morphologische Vorgehensweise verwendet, die den Zweck haben, im Sinne einer ausweitenden Betrachtung des zu lösenden Problems möglichst viele Ideen in möglichst kurzer Zeit zusammenzutragen, um dann in einem technisch-wirtschaftlichen Bewertungsverfahren ungeeignete Lösungen auszuschneiden bzw. eine Optimierung der aus den Ideen entstehenden Lösungen vorzunehmen. Eines der wichtigsten Elemente bei dieser Arbeit ist die Gruppendynamik (Teamwork).

2 Beispiele zur Anwendung konstruktionsmethodischer Vorgehensweisen in der industriellen Praxis

An zwei unterschiedlichen Beispielen aus der Berufspraxis des Verfassers sollen auszugsweise einige Anwendungen gezeigt werden, die ohne methodisches Vorgehen vermutlich nicht zu dem gezeigten Erfolg geführt hätten.

Das erste Beispiel ist die Entwicklung einer Gewindestrehleinrichtung mit Hilfe diskursiver Methoden. Strehleinrichtungen dienen bei Drehmaschinen dazu, zur Herstellung von Gewinden die Bewegungen der Spindel entsprechend Gangzahl, Gangrichtung und Steigung mit der Bewegung des Drehstahles zu koordinieren. Die Funktionsanalyse eines solchen Gerätes ergibt ein Ablaufdiagramm, das eine Analyse der Wirkbewegungen und des Strehlvorganges selbst möglich macht (Bild 5).

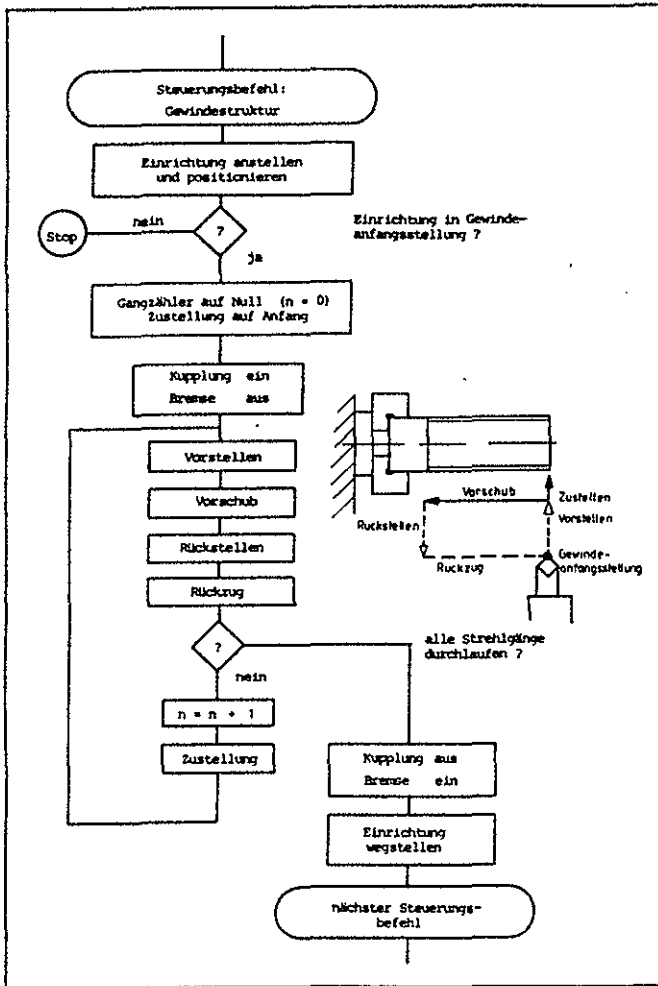


Bild 5: Ablaufanalyse (Funktionsanalyse) des Strehvorganges bei der Herstellung von Gewinden

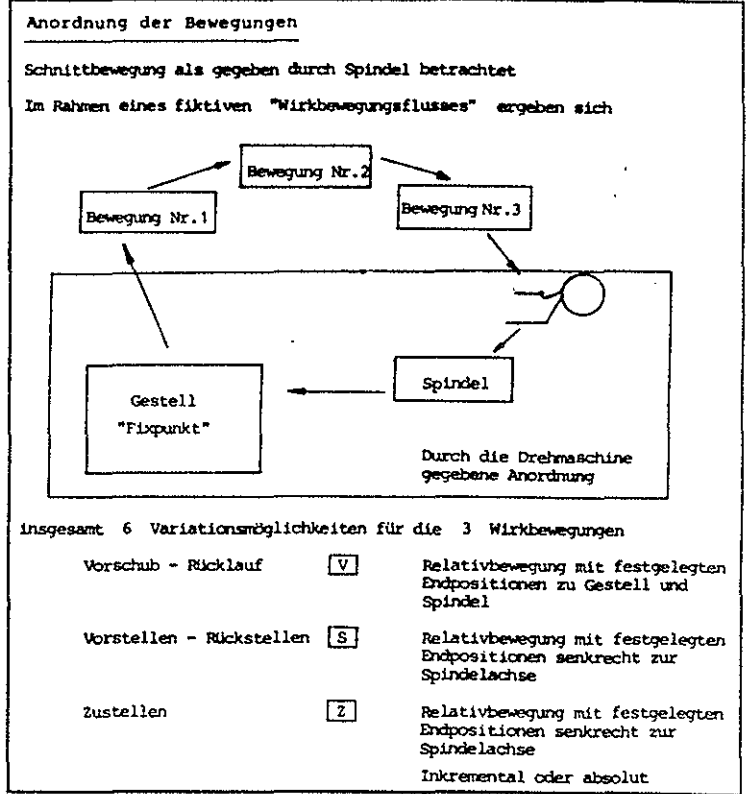


Bild 6: Analyse der Wirkbewegungen und Funktionsträger

Methode der Konstruktionslehre, bei der in einer systematischen Aufzählung unterschiedlicher Möglichkeiten ein vollständiges Lösungsfeld erstellt wird. Bild 7 zeigt die hierzu erstellte Handskizze. In der

Die unterschiedlichen Bewegungen wie Vorschub, Rückstellen und Zustellen des Stahles müssen dabei auf unabhängige Funktionsträger, nämlich die Schlitten verteilt werden (Bild 6). Wichtig ist sowohl die Anordnung der Bewegungen in mehreren Achsen als auch die Abstützung der Kräfte, denn hiervon hängt bei Werkzeugmaschinen die Genauigkeit der Einrichtung ab. Die Aufgabe konzentriert sich also auf die Anordnung der verschiedenen Bewegungen und die Anordnung der hierfür notwendigen Kraftleitungen.

Zur Lösung des Problems wurde der sogenannte morphologische Kasten gewählt, eine diskursive

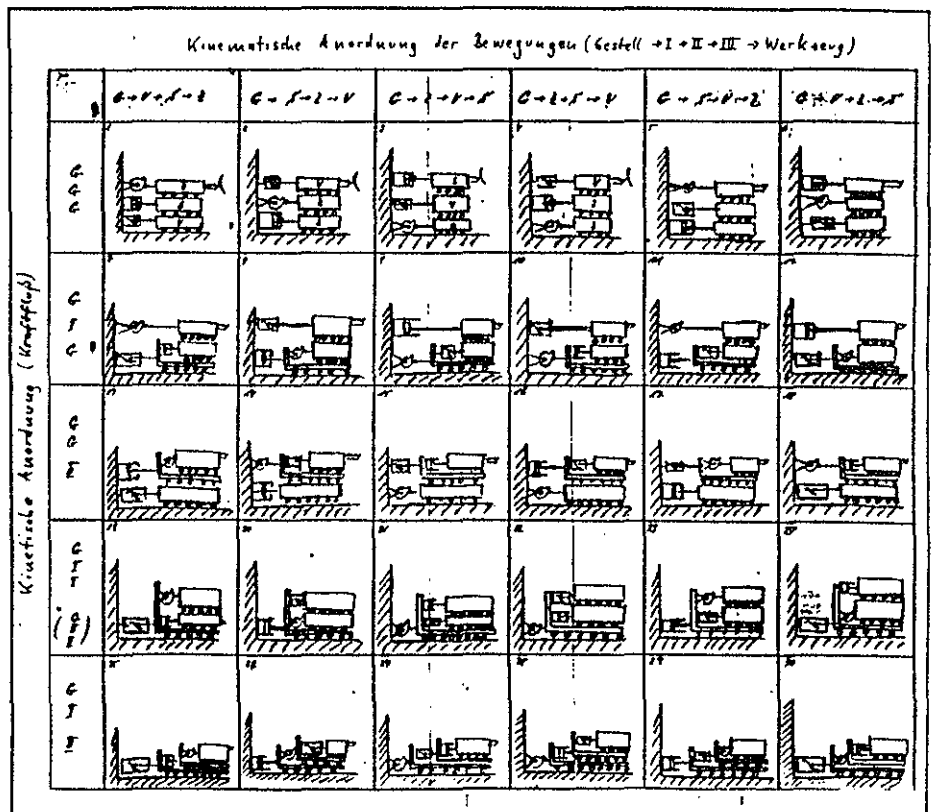


Bild 7: Morphologisches Lösungsfeld für Bewegungsanordnung und Kraftleitung in einer Strehleinrichtung

waagerechten Achse werden die kinematischen Anordnungen der Bewegungen, d.h. das "Aufeinanderpacken" der verschiedenen Schlittenteile aufgezeigt, die senkrechte Achse ist geordnet nach dem Kraftfluß. Diese Darstellung macht im Gegensatz zu der früheren Methode des Konstruierens einer neuen Strehleinrichtung aus einer alten besonders deutlich, daß man anhand einer solchen Systematik zeigen kann, welche besonderen Eigenschaften bezüglich der Stabilität und der Genauigkeit durch Anordnung der Bewegungen vorherrschen. Die genaueste Lösung ist nämlich die, bei der die Erzeugung der Gewindesteigung und der Gewindetiefe sich gegen das Gestell abstützt, während die Bewegung des Meißelrückzuges eine untergeordnete Bedeutung hat und damit sich vergleichsweise instabil über mehrere Schlittenführungen abstützen kann.

Darstellungen dieser Art eignen sich in ihrer Übersichtlichkeit auch für Anwendungen, die mit der Suche nach konstruktiven Lösungen nur mittelbar zu tun haben. Man kann in einer solchen Übersicht Felder markieren, die beispielsweise bereits durch Patente belegt sind, die alte Produkte sind oder vom Wettbewerb angeboten werden. Sie kann damit auch für vergleichende Darstellungen in den verkaufsunterstützenden Abteilungen dienen, die Grundlage für Sicherung von Wettbewerbsvorteilen durch patentrechtliche Maßnahmen bilden oder die Entwicklung von Konstruktionsprinzipien als strategische oder normative Unternehmensaufgabe unterstützen. Bild 8 zeigt die aus der oben beschriebenen Lösungssuche entwickelte Strehleinrichtung im Einbaustand.

Das zweite Beispiel soll insbesondere die Arbeit mit intuitiven Methoden herausstellen und die Zusammenarbeit in einem Team. Bei der Einführung der Teamarbeit in einem stark in Verantwortungsbereiche und hierarchische Ordnungen unterteilten Unternehmen ergeben sich einige menschliche Probleme. Ein Problem liegt in der durch die Organisationsstruktur bedingten Verteilung der Verantwortung und der daraus abzuleitenden Abschottung gegenseitiger Information. Ein anderes Problem ist, daß man Konstrukteure dazu bewegen muß, die eigenen Ideen und Ausführungen selbstkritisch im Kreise von Kollegen zu diskutieren. Gelingt aber die Bildung ei-

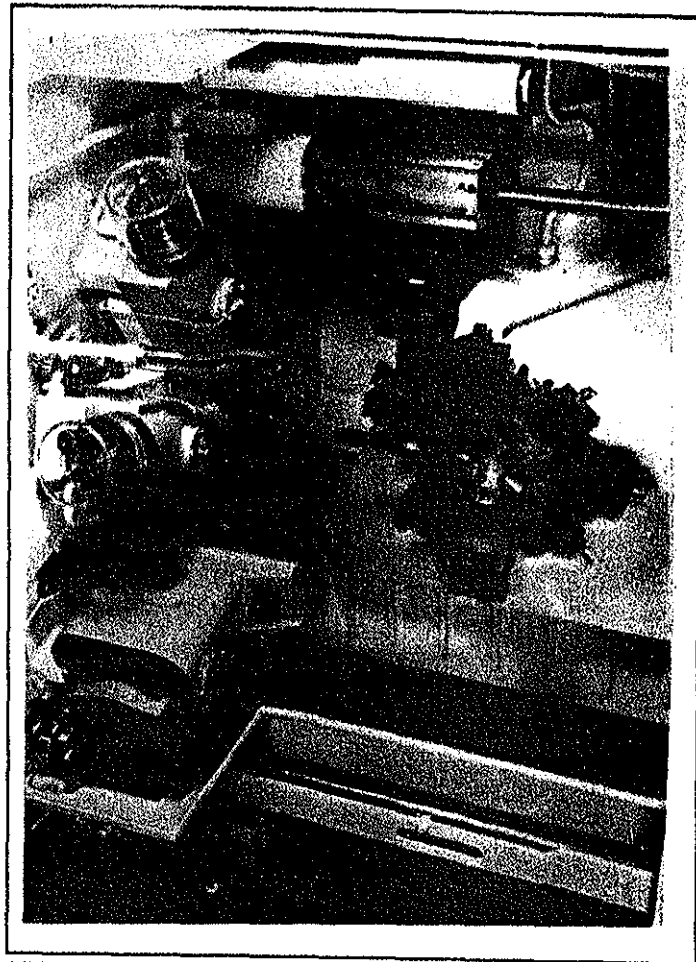


Bild 8: Strehleinrichtung in einer hydraulischen Drehmaschine

nes interdisziplinären Teams aus Konstrukteuren, Kundendienstmonteuren, Arbeitsvorbereitern, Einkäufern usw., so ist damit eine Motivation verbunden, die nicht nur die Zusammenarbeit an diesem Produkt besonders fördert, sondern auch dazu hilft, das Produkt in der eigenen Fertigung, in der Kundenmontage und schließlich auch den eigenen Verkäufern "zu verkaufen".

Das Hauptinstrument dieser Konstruktionsweise ist das Brainstorming, dies kann in allen Stadien der Konstruktion durchgeführt werden. Es hat sich erwiesen, daß diese Arbeitsmethode dann besonders erfolgreich ist, wenn die physikalischen Funktionen bereits vorliegen und die Hauptarbeit sich auf der gestalterischen Ebene vollzieht. Um die Funktionen klar zu sehen und den Abstrahierungseffekt zu erreichen, beginnt man zweckmäßig alle Brainstorming-Sitzungen mit einer Funktions-Kurzanalyse über maximal 5 Minuten im Team. Thema des folgenden Beispiels ist die Konstruktion von Führungsleistenbefestigungen

an einer Drehmaschine, Bild 9 zeigt in einer Originalmitschrift, daß zunächst durch Verwendung von Hauptwort und Tätigkeitswort das Problem möglichst abstrakt zu formulieren versucht wird und damit "der Kopfreigemacht wird" für die dann beginnende Brainstorming-Sitzung über die festgelegte Zeit von 30 Minuten. Einen Auszug aus der Brainstorming-Liste zeigt das Bild 10 am Ende, die

Vorschläge sind durch Skizzen ergänzt. Aus den 29 Lösungen dieses Brainstormings wurde durch Auswahl ein System völlig neuer Führungsleistenbefestigungen entwickelt, das sich bis heute bewährt hat. Zur Ermittlung von geeigneten Lösungen aus dem

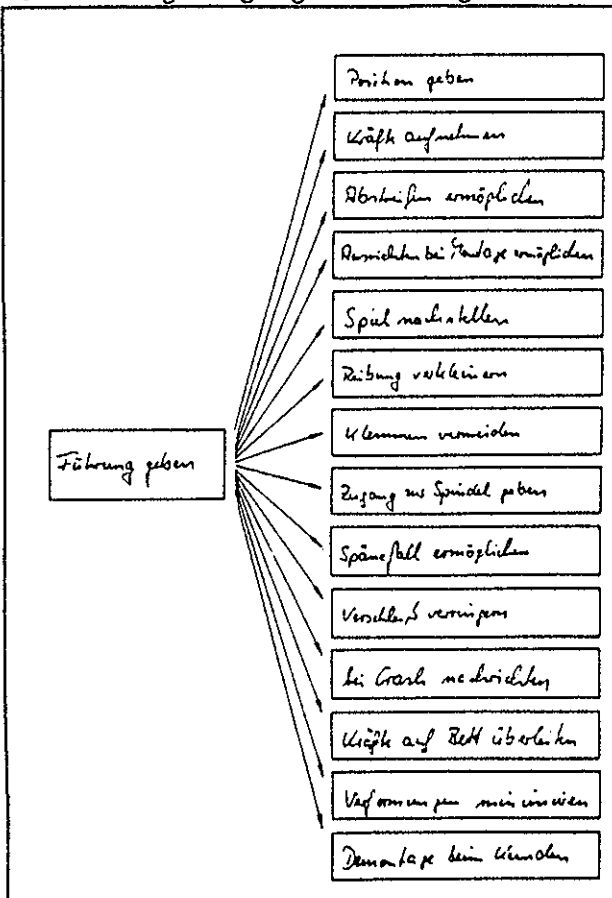


Bild 9: Funktionsanalyse durch abstrakte Formulierung der Hauptfunktion von Führungsleisten in Drehmaschinen

Nr.	Ideen	Kl. Nr.	Aufg. Nr.	Bemerkungen
11	Leisten aufklebt, die Enden senkrecht verstiftet	0		
12	Alle Schrauben von oben oder unten, die Leisten an den Enden senkrecht verstiftet	2		keine ausreichende Aufnahme der Kräfte bei Kollision
13	Alle Schrauben von oben oder unten, Stifte in die Trennfuge	2		wie 12
14	Alle Schrauben von oben oder unten, die Leisten an den Enden mit Paßfedern fixiert	2		Ideen ab 24 besser
15	Alle Schrauben von oben, Senkungen mit Gleitbelag abgeformt	2		

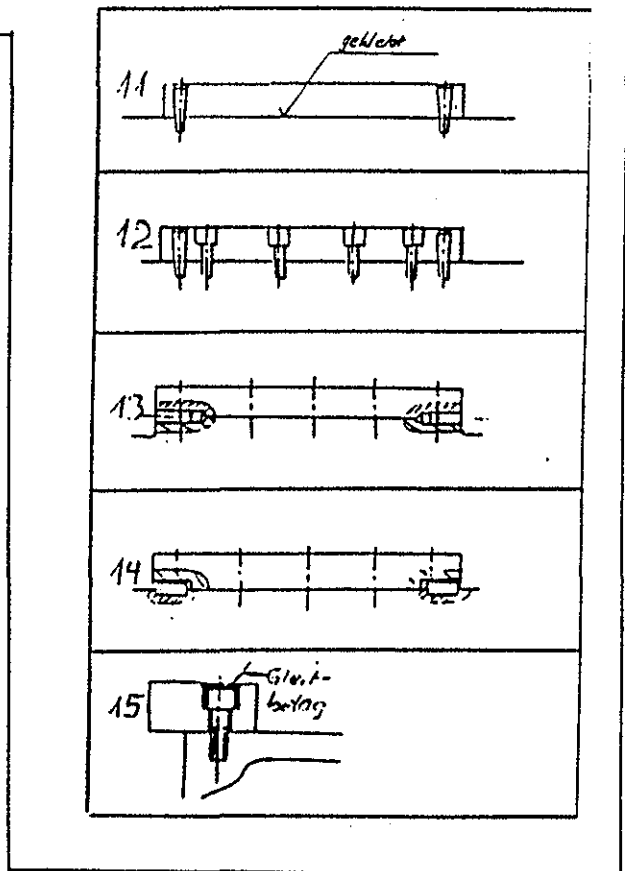


Bild 10: Auszug aus einer Brainstormingliste zur Lösungsfindung von Führungsleisten

Lösungsfeld des Brainstormings oder des Ordnungsschemas arbeitet man innerhalb der Teamarbeit mit Bewertungskriterien, die die ehemalige sehr subjektiven Bewertungen durch den Konstrukteur als den geistigen Vater des Entwurfes ablösen sollen durch ein objektives Verfahren. Als zweckmäßig hat sich

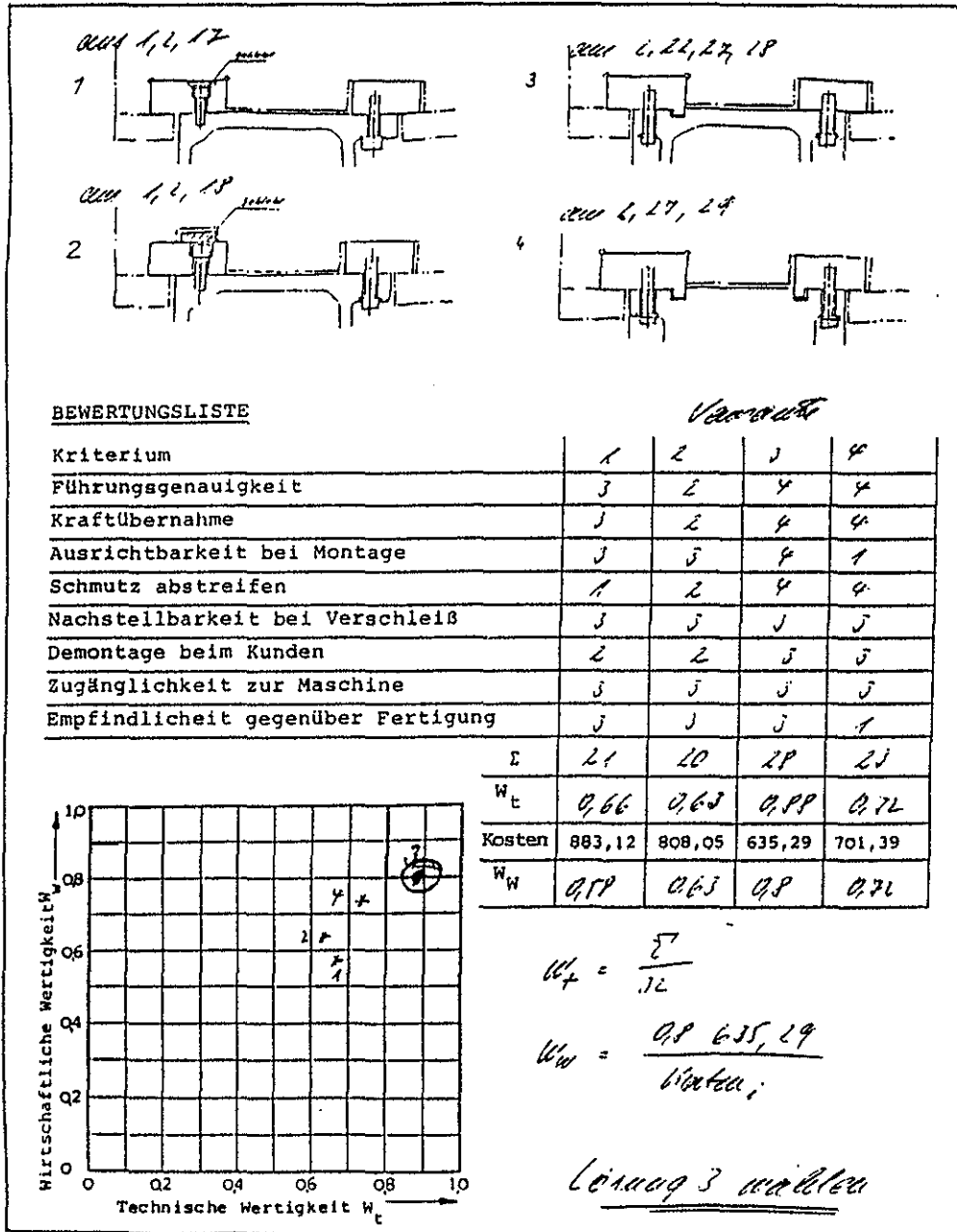


Bild 11: Technisch-wirtschaftliche Auswertung und Wertigkeitsdiagramm nach VDI 2225, dargestellt am Vergleich von vier Lösungen zu Führungsleistenbefestigungen

keitsdiagramm Bild 11 weist dabei deutlich auf Möglichkeiten hin, wie man durch sinnvolle Wahl aufeinanderfolgender Entwicklungsschritte zu einer ausgeglichenen technisch-wirtschaftlichen Lösung kommt (im Diagramm durch die Hauptdiagonale gekennzeichnet). Der Zwang zur objektiven Berücksichtigung aller - auch der kostenrelevanten - Gesichtspunkte gibt erhebliche Hilfen zur Erlangung ausgewogener und optimierter Lösungen.

Diese beiden Beispiele mögen genügen, um schlaglichtartig den Bereich des Methodischen Konstruierens darzustellen. Der Kerngedanke dieser Arbeitsweise ist die ganz bewußte Aufgliederung des Konstruktionsablaufes in nachvollziehbare und überprüfbare Schritte. Dabei kann jede einzelne Phase für sich optimiert werden und damit in einem überschaubaren Prozeß zu Lösungen führen, die unter Einbeziehung und Bewertung vieler Varianten das Finden eines Optimums eher ermöglichen als dies in dem rein subjektiven Prozeß des "genialen Erfindens" möglich war. Es bleibt allerdings anzumerken, daß eine Konstruktionsmethodik nicht den kreativen und erfahrenen Konstrukteur ersetzt, sie gibt ihm lediglich methodische Hilfen, forciert seine Kreativität und leitet ihn bei einer selbstkritischen Beurteilung der von ihm meist zahlreich gefundenen Lösungen an.

das Bewertungsschema nach Kesselring bewährt, das in der VDI-Richtlinie 2225 [10] niedergelegt ist. Von Bedeutung ist dabei besonders, daß dieses Bewertungsschema außer der eigentlichen Auswahl ein Profil der Stärken und Schwächen der einzelnen Lösungen ergibt und damit als "Verbesserungsspeicher" für die Weiterentwicklung der gewählten Lösungen gelten kann.

Die systematische Lösungsauswahl nach VDI 2225 ermöglicht neben der Bewertung technischer Eigenschaften auch eine Berücksichtigung von Kostengesichtspunkten. Die grafische Darstellung im Wertig-

keitsdiagramm nach VDI 2225, dargestellt am Vergleich von vier Lösungen zu Führungsleistenbefestigungen

3 Konstruktionsprinzipien, Konstruktionsregeln, Konstruktions-Systeme

Ausgehend von der anfangs gezeigten Analyse befaßt sich ein weiterer Bereich der Konstruktions-systematik mit der Untersuchung von Konstruktions-strukturen. Es handelt sich dabei um eine Zusammenfassung von Erfahrungen aus verschiedenen Konstruktionsgebieten unter methodischen Gesichtspunkten. Die Analyse einer Konstruktion und die Weiterentwicklung nach methodischen Prinzipien hilft hier meist, Leistungsdichte oder Durchsatz mittels neuer Konstruktionsstrukturen zu vergrößern oder zu verbessern oder auch die Anwendungsbreite durch die Gestaltung von Maschinensystemen zu vergrößern. Eine kleine Auswahl aus der Fülle von Beispielen soll dies näher erläutern:

Das Konstruktionsprinzip der *Aufgabenteilung* wird meist dann angewendet, wenn Eigenschaften eines bestimmten Funktionsträgers eine Weiterentwicklung zu höheren Leistungsdichten verhindern, weil eine durch die Gestaltung gegebene Nebenfunktion eine Grenze setzt. Bei diesem Prinzip werden den einzelnen Funktionen Funktionsträger so zugeordnet, daß diese möglichst keine Nebenwirkungen haben und jeweils auf ihre Hauptfunktion optimierbar sind. Ein Beispiel aus dem Apparatebau nach [5] soll dies erläutern: Zur Erzeugung der Dichtkraft bei der in **Bild 12** gezeigten Behälterkonstruktion ist eine Vorspannkraft notwendig, die die Schrauben umso mehr beansprucht, je höher die Deckelkraft ist. Dies führt zu den bekannten, mit dem "Verspannungsschaubild" darstellbaren Verbindungsgrenzen durch Schraubenbruch oder Dichtigkeitsverlust.

Nach dem Prinzip der Aufgabenteilung (**Bild 13**) kann die Aufnahme der Deckelkraft durch einen Formschluß erfolgen, während die Dichtwirkung durch die im oberen Teil des Bildes angeordnete Schweißnaht erzeugt wird. Obwohl dabei ein höherer konstruktiver Aufwand notwendig ist als z.B. bei der reinen Flanschverbindung, kann diese Verbindung doch auf wesentlich höhere Leistungsdaten ausgelegt werden.

Ein anderes Konstruktionsprinzip führt zu der Anordnung von Systemelementen so, daß eine gegensei-

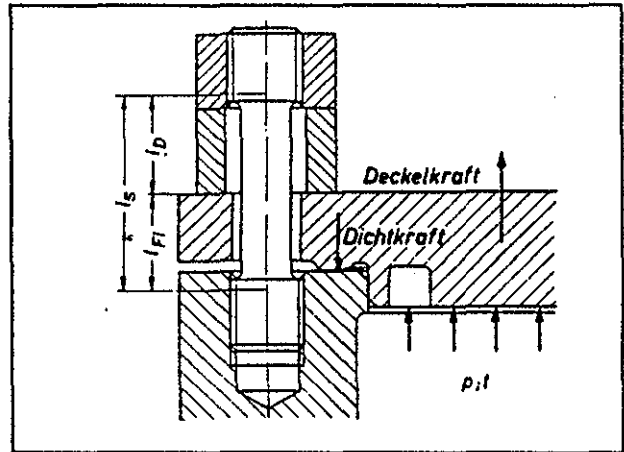


Bild 12: Deckelverschluß mit Flanschschrauben [5]

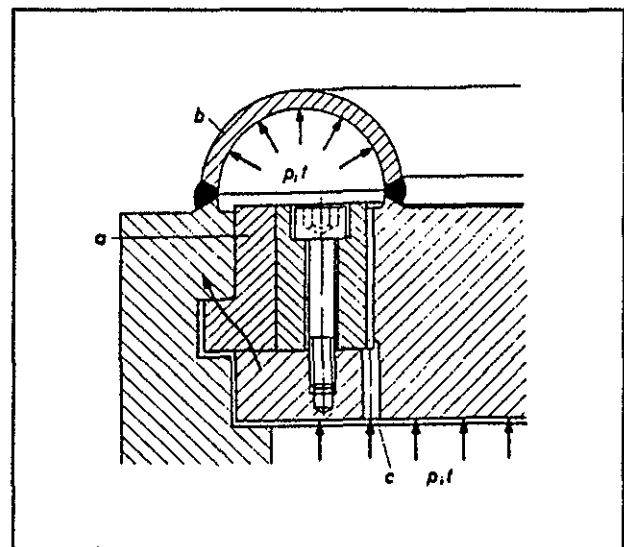
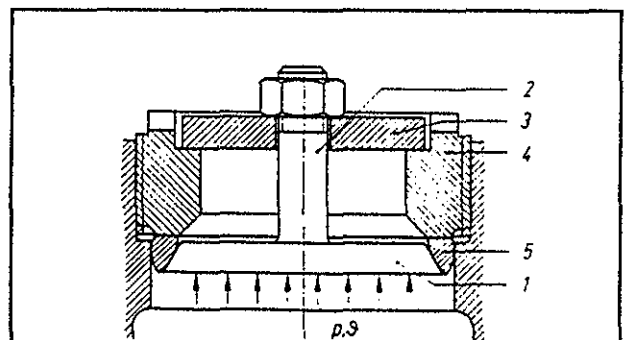


Bild 13: Deckelverschluß nach dem Prinzip der Aufgabenteilung [5]



- 1 Deckel
- 2 zentrale Schraube
- 3 Traverse
- 4 Gewindestück mit Sägezahn-gewinde
- 5 Metall-Dichtung
- p Innendruck
- ∅ Temperatur

Bild 14: Deckelverschluß mit Selbsthilf-wirkung (Bredtschneider-Uhde-Verschluß) [5]

tige Beeinflussung der Funktionen erreicht wird, die eine positive Wirkungsweise erzeugen. Entweder wird dabei die Hauptfunktion unterstützt (*selbstverstärkende Lösung*), oder es wird eine Reduzierung der Belastungen in unterschiedlichen Betriebsbereichen erreicht (*selbstrettende Lösung*). Auch hier gibt es aus dem Bereich des Apparatebaus viele Beispiele [5], gezeigt sei der Bredtschneider-Uhde-Verschluß, bei dem die Deckelkraft eine Verstärkung der Dichtkraft bewirkt (Bild 14).

Bei der *Entwicklung von Baureihen* befaßt sich der Konstrukteur mit der konstruktiven Änderung von Produkten, deren Funktion und ihre Lösung durch die konstruktive Gestaltung grundsätzlich geklärt ist. Er hat beispielsweise eine Reihe von Kupplungen oder Getriebe für einen großen Bereich unterschiedlicher Leistungen, Drehmomente, Abmessungen usw. zu entwerfen, wie es Bild 15 [5] am Beispiel einer Zahnkupplungsentwicklung zeigt. Das verwendete methodische Hilfsmittel sind die Ähnlichkeitsgesetze der Mechanik und die Verwendung von Reihengesetzen, z.B. die in den Normzahlen vorgegebene dezimalgeometrische Reihe. Mit Hilfe dieser Techniken gelingt es, ausgehend von dem sogenannten Grundentwurf ein gesamtes Feld der Anwendung einer solchen Konstruktion zu überdecken, wobei alle Maße, Kenngrößen bis hin zu den Kalkulationspreisen in einem Auslegungdiagramm dargestellt werden können.

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Baureihensystemen besteht bei *Baukastensystemen* die Aufgabe, mit möglichst vielen gleichartigen Einheiten eine große Reihe von Funktionen dadurch zu erfüllen, daß diese Einheiten miteinander kombiniert werden. Baukastensysteme haben im Bereich der Serienfertigung einen großen Anwendungsbereich, da durch sie einerseits die Lieferbereitschaft und die Produktflexibilität erhöht wird, andererseits durch Vergrößerung der Serien von Einzelteilen und Baugruppen (Bausteine) ökonomische Vorteile zu erwarten sind.

Das wichtigste methodische Hilfsmittel für die Erstellung von Baukastensystemen ist die Rückführung des Gesamtproblems unterschiedlicher Anlagen auf voneinander abhängige oder unabhängige Funktionsgruppen, für die eine im Gesamtkomplex kom-

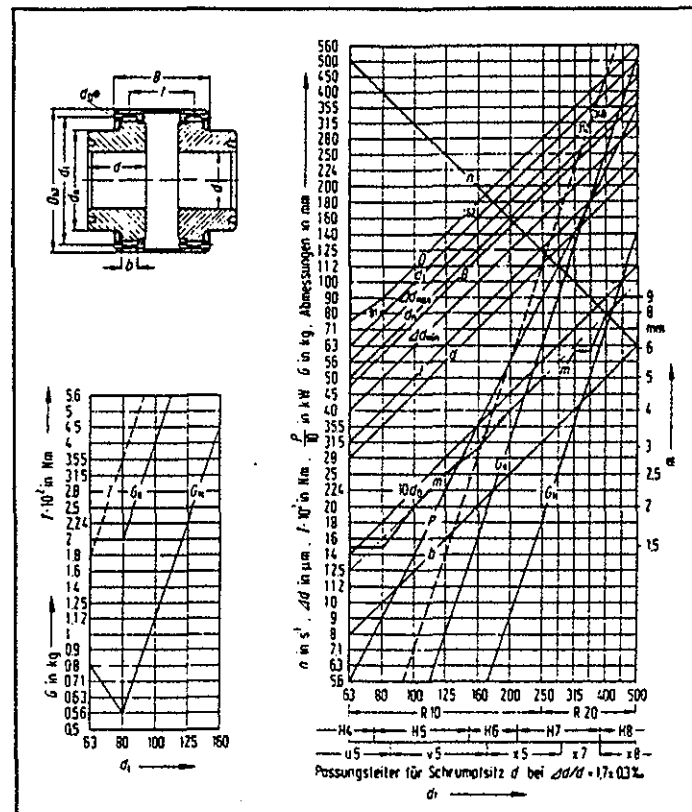


Bild 15: Baureihe Zahnkupplungen

patible, in den Teilfunktionen optimierte Lösung gefunden werden muß. Im folgenden Beispiel für den Aufbau eines flexiblen Drehmaschinensystems soll diese Vorgehensweise erläutert werden.

Im Werkzeugmaschinenbau wird das Prinzip der Baukastenkonstruktion bei Sondermaschinen angewandt, wobei dem Problem der Schnittstellen zwischen den einzelnen Baugruppen weitgehend durch genormte Abmessungen Rechnung getragen wird. Bei der Konzeption eines neuen Maschinensystems galt es zunächst, mit den Mitteln einer Konstruktions-systematik eine Funktionsstruktur aufzubauen, wie sie Bild 16 zeigt. Der Erkennung und Untergliederung der wichtigsten Funktionen, wie sie im oberen Teil des Bildes zu erkennen sind, folgt die Zuordnung von Bausteinen, wobei die Untergliederung innerhalb der einzelnen Baugruppen streng nach Funktionsgesichtspunkten erfolgen muß. Nur eine sorgfältige Definition der Bausteine aus der Funktionsanalyse und die Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung lassen einen weitgehenden Aufbau aus standardisierten Baugruppen zu. Daneben müssen systemübergreifende Dinge wie Sonderschütze und Sicherheitsvorrichtungen für die Gesamtanlage auf-

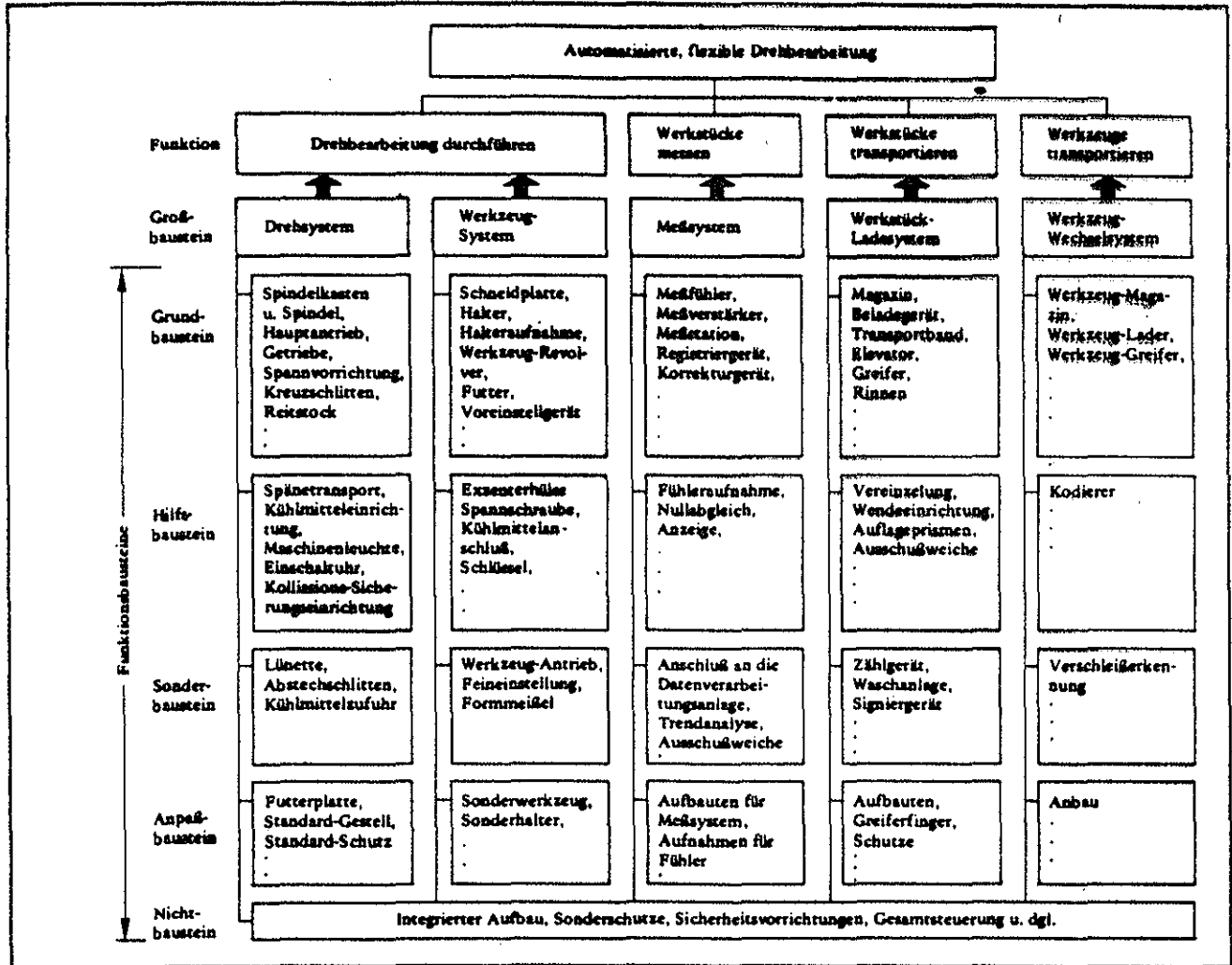


Bild 16: Funktionsstruktur zum Aufbau eines Baukastensystems von Dreheinheiten [11]

tragsgebunden konstruiert werden. Im vorliegenden Fall führte die strikte Verfolgung des Kraftflusses zur Definition und zum Aufbau der Grundbausteine. Eine Dreheinheit besteht aus einem Spindelkasten und einem Schlitten, die untereinander in bestimmter geometrischer Anordnung gekoppelt sind (Bild 17). Die Variation dieser Anordnung führt zu einem Plan über mögliche Kombinationen von Fertigungsanlagen mit diesen Grundbausteinen, wie sie in Bild 18 zu sehen sind.

Besonders wirkungsvoll ist die Kombination von Baureihen- und Baukastensystemen. Wenn man davon ausgeht, daß man jeden einzelnen Baustein in eine Baureihe entwickeln kann, so erhält man ein System, wie es für das vorliegende Beispiel der Drehmaschinen Bild 19 zeigt. In diesem Bild ist die Verknüpfung unterschiedlicher Baugrößen mit unterschiedlichen Kombinationen aus dem gleichen Baukasten dargestellt, so daß mit dem vorliegenden Werkzeugmaschinensystem eine sehr große Anzahl unterschiedlicher Fertigungsaufgaben bei unterschiedlicher Teilegröße gelöst werden können.

4 Einbindung in die Lehre des Maschinenbaus

Die wissenschaftliche Aufbereitung der geschilderten methodischen Vorgehensweise hat zu Vorschlä-

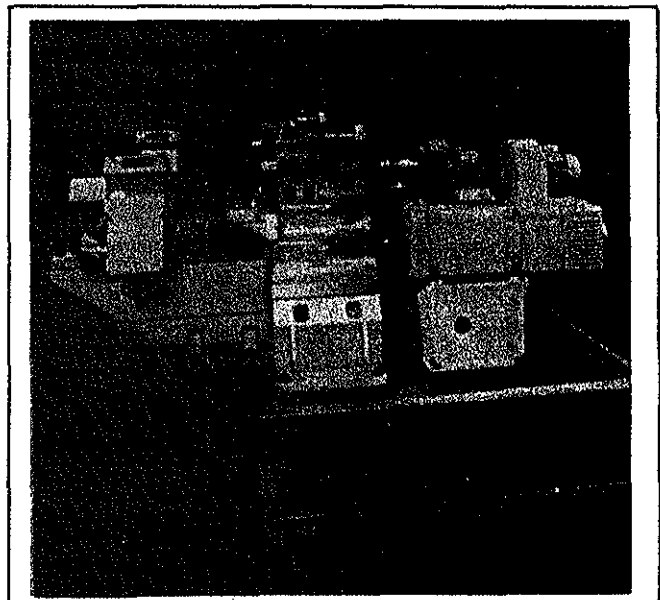


Bild 17: Konstruktive Ausführung einer Dreheinheit zum Aufbau eines Baukastensystems [11]

		Anzahl der Spindeln —				
		1	2	3	4	n
Anzahl der Schichten ↓	1	1/1	2/1 Simultanbearbeitung	3/1 Simultanbearbeitung	4/1 mit Sonderschlitten ähnlich 3/1	n/1 nicht sinnvoll
	2	1/2	2/2 oder ähnlich 3/3	3/2 Simultanbearbeitung	4/2	n/2 z.B. Version 6/2
	3	1/3 nicht sinnvoll	2/3	3/3 Sondergestell drei Einspannungen	4/3 Sondergestell Simultan- oder Pendelbearbeitung	n/3 Erweiterungen bei Simultan- oder Pendelbearbeitungen möglich
	4	1/4 nicht sinnvoll	2/4 Zusammensetzung aus 2x2/1	3/4 Kombination aus 1/2 und 2/2	4/4 ähnlich 2/2 oder 3/3, räumliche Anordnung der Einheiten durch Ladeneinrichtung bestimmt (z.B. für Parallelader nach 1/2 Schwenkschlitten nach 2/2)	n/4 Erweiterungen bei Simultan- oder Pendelbearbeitungen möglich
	n	1/n nicht sinnvoll	2/n nicht sinnvoll	3/n vergleiche 3/4	4/n vergleiche 3/4	n/n vergleiche 4/4 (flexible Transferstraße)

Bild 18: Baumusterplan für Drehmaschinen nach einem Baukastensystem

Grundstudiums werden die Kenntnisse in den Basisfächern wie Mathematik, Mechanik, Physik usw. vermittelt. In diesem Bereich hat in den letzten Jahren eine Umstrukturierung des Faches Maschinenelemente derart stattgefunden, daß unter Bei-

behaltung der bisherigen Gegenstände, des Umfangs und der Tiefe die Grundlagen des Methodischen Konstruierens eingeführt wurden. Dies bedeutet im wesentlichen keine Änderung des gesamten Vorlesungsstoffes, sondern nur eine Hinwendung zu der für das Methodische Konstruieren wichtigsten funktionalen Betrachtungsweise statt der bisherigen Beschreibung nach Form und Gestaltung vorhandener Ausführungen.

Am Beispiel des Maschinenelementes Feder soll dieser Gedanke erläutert werden [3]:

Im Sinne einer methodischen Betrachtung können Federn folgende

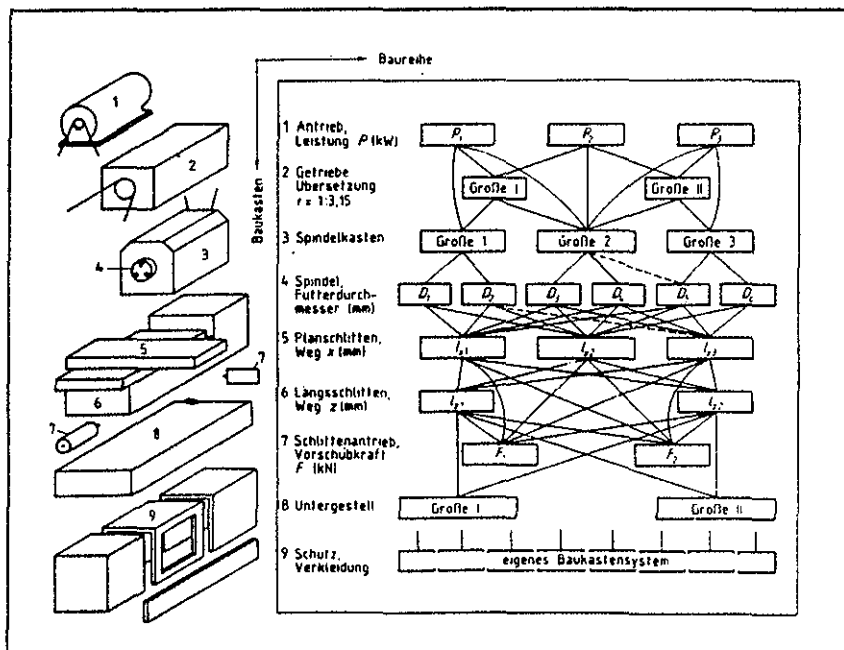


Bild 19: Baukasten-Baureihen-System für Drehmaschinen

gen einer Aufnahme dieses Stoffes in die Ausbildung von Maschinenbauingenieuren geführt, wie sie beispielsweise ausführlich von Pahl [3] dargestellt werden. Die wichtigsten Gedanken hieraus sind in die folgende kurze Darstellung einbezogen.

Bild 20 zeigt einer Grobübersicht eine Struktur des Studiums des Maschinenbaus in Deutschland, wie sie den Empfehlungen des Bundes und der Länder entspricht. Das Studium teilt sich in zwei Teile, die durch ein Vorexamen getrennt sind. Innerhalb des

Funktionen zugeordnet werden

- Kräfte elastisch leiten
- potentielle Energie speichern
- kinetische Energie wandeln

Damit werden zunächst alle Begriffe und Erscheinungen, die aus diesen Funktionen abgeleitet werden, auf abstrakter Ebene erklärt: Federsteifigkeit, Arbeitsvermögen, Energiewandlungsvermögen.

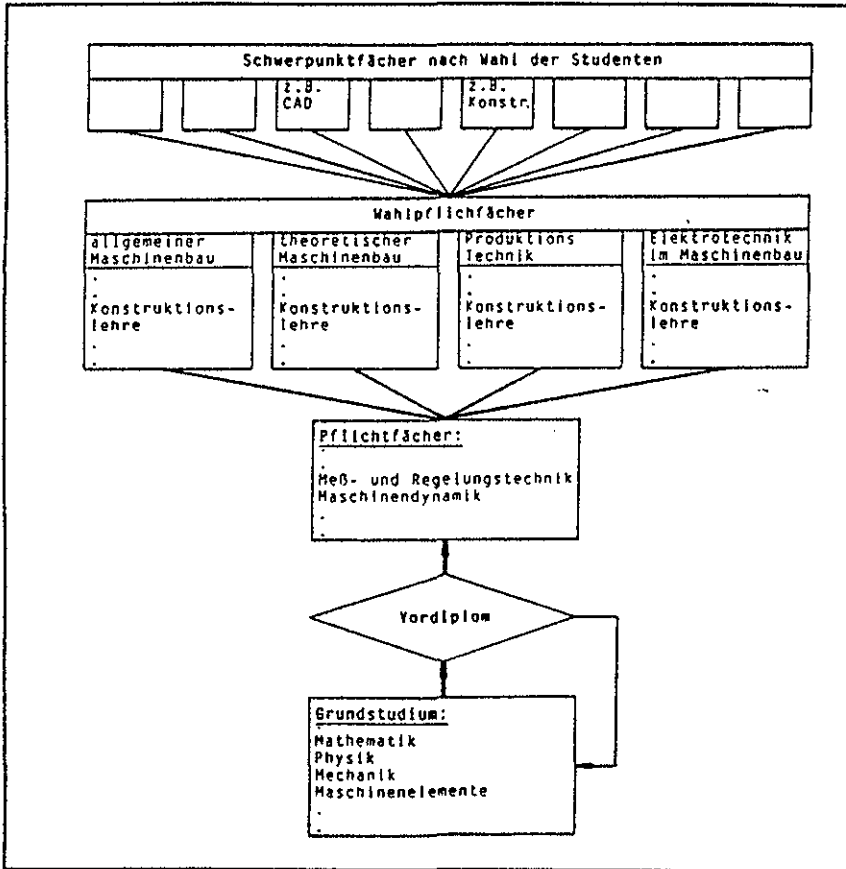


Bild 20: Grobstruktur des Studiums Maschinenbau in Deutschland am Beispiel der Studiengänge der Technischen Universität Clausthal

Stoff der Maschinenelemente.

Die Integration der wichtigsten Begriffe und Vorgehensweise des methodischen Konstruierens bereits in das Grundstudium ist in Absprache mit den einzelnen Hochschullehrern mittlerweile an allen deutschen Universitäten durchgeführt worden und hat sich bewährt. Der Student wird bereits zu Beginn seines Studiums bei der Bearbeitung konstruktiver Übungen auf die einzelnen Schritte der Klärung der Aufgabenstellung, des Erkennens der Funktionen, der systematischen Entwicklung von Varianten sowie eines vereinfachten Auswahl- und Bewertungsverfahrens hingewiesen. Damit können auch die Übungsaufgaben nicht mehr nur von Produkten oder von fertigen Lösungen ausgehen, sondern von Aufgaben mit realen Bedingungen, zu denen Funktionen und Lösungsprinzipien erst gefunden werden müssen. Die bisherigen Erfahrungen

Nach dieser Aufgabenklärung und funktionalen Betrachtungsweise kann nun auf physikalischer Ebene nach Wirkprinzipien für die einzelnen Funktionen gesucht werden. Beispielsweise gibt es für die elastische Kraftleitung und die Speicherung potentieller Energie

- eine mechanische Lösung mit dem Hooke'schen Gesetz
- hydraulische oder pneumatische Lösungen unter Ausnutzung der Kompressibilität von Gasen
- magnetische oder elektromagnetische Lösungen unter Ausnutzung von Feldkräften in Abhängigkeit der Wege

Erst dann wird die zweckmäßige Gestaltung erarbeitet, wobei man sich nach den Gestaltungsmerkmalen richten kann. Aus einem Ordnungsschema kann durch die Aufbereitung einer speziellen Aufgabenstellung die hierfür am besten geeignete Feder ausgewählt und dimensioniert werden, die Dimensionierungs- und Gestaltungsfragen der einzelnen Federbauarten gehören selbstverständlich weiterhin zum

haben gezeigt, daß durch Einbeziehung von konstruktionsmethodischen Vorgehensweisen in die Lehre der Maschinenelemente das Abstraktionsvermögen und die Kombinatorik zur Steigerung der Kreativität des Studenten erheblich verbessert werden kann.

Innerhalb des Hauptstudiums befaßt sich der Student mit vertiefenden Betrachtungen über das von ihm gewählte Spezialgebiet. Dabei ist es üblich, daß alle Studierenden des Maschinenbaus, die mit der Entwicklung, Gestaltung und Verarbeitung von Teilen in Berührung kommen, das Fach "Konstruktionslehre" absolvieren. In diesem Fach wird der Student in den hier vorgetragenen weitergehenden Vorgehensweisen, Konstruktionssystemen und Konstruktionsregeln unterrichtet, gleichzeitig erfolgt in vielen Fällen mit diesem Fach eine intensive Einführung in das rechnergestützte Konstruieren (CAD). Die ersten Erfahrungen mit Abgängern unserer Hochschulen in die Industrie haben gezeigt, daß sich die Methodische Konstruktionslehre unabhängig von der jeweils später zu vertretenden Branche als ein

sehr nützliches Instrument nicht nur in der Konstruktionsarbeit erwiesen hat, die Teilaspekte und insbesondere die Nutzung der Teamarbeit hat sich auch in vielen anderen Bereichen, z.B. bei der Anwendung der Wertanalyse, außerordentlich gut bewährt.

5 Einführung methodischen Konstruierens durch beratende Tätigkeiten in Unternehmen des Maschinenbaus

Die beschriebene Ausbildung an den Hochschulen führt sicherlich mit der Zeit zu einer breiten Einführung konstruktionsmethodischer Vorgehensweisen in die Konstruktionsbüros, der mit diesem "Wechsel der Führungsgeneration" verbundene Zeitraum erscheint aber mit mindestens 10 Jahren angesichts der damit verbundenen technischen und wirtschaftlichen Vorteile als zu lang. Für eine Einführung methodischer Vorgehensweisen in die Konstruktionsbereiche industrieller Unternehmen sind im Gegensatz zu der langfristigeren Ausbildungsaufgabe folgende Randbedingungen zu beachten:

- In der Industrie ist ein kurzfristiger Erfolg mit einer Auswirkung auf das laufende "Tagesgeschäft" Voraussetzung für die Einführung neuer Arbeitstechniken. Das beste Beispiel bietet die Wertanalyse, die ihren Einführungserfolg im wesentlichen der sofortigen Anwendbarkeit in laufenden Projekten und ihrer als "value control" in das Verfahren integrierten Überprüfung verdankt.
- Für die Einführung neuer Arbeitstechniken genügt das Argument der Produktverbesserung allein meist nicht. Mit ihr sollte ein Rationalisierungseffekt verbunden sein. Man erwartet von neuen Methoden, daß das Konstruktionsergebnis über die Verbesserung hinaus schneller und mit geringerem Aufwand erzielt werden kann.
- Neue Arbeitsmethoden sollten sich harmonisch in die organisatorische und menschliche Struktur eines Unternehmens integrieren lassen. Diese Randbedingung betrifft besonders die beim met-

hodischen Konstruieren bevorzugte Bildung projektbezogener Teams aus unterschiedlichen Unternehmensbereichen. Die bisher angewendeten Kommunikationswege und -formen zwischen Bereichen und Ebenen des Unternehmens sollten weiter Anwendung finden. An der Verantwortlichkeit des Konstrukteurs für "sein" Produkt darf sich nichts ändern.

Unter diesen Bedingungen ergeben sich für eine Einführung des methodischen Konstruierens auf breiter Ebene eine Reihe von Problemen. Eine längerfristige und gründliche Ausbildung aller Beschäftigten kommt nicht in Frage, erwartet wird die Ableitung der Methodik an firmeneigenen Problemstellungen und Projekten. Überdies interessieren je nach Aufgabenbereich des Unternehmens meist nur Teilbereiche des vorgestellten Gesamtgebietes, z.B. die Lösungsfindung, Baukasten-Baureihen-Systeme, Konstruktionsregeln u.a.

Eine der größten Schwierigkeiten besteht in der Einführung der Teamarbeit. Hemmnisse lassen sich hierfür in der gewachsenen hierarchischen Struktur der meisten Maschinenbauunternehmen, in vielen Fällen aber auch in der persönlichen Einstellung der Konstrukteure zu dieser Arbeitsweise finden. Dies klingt umso erstaunlicher, als die Vorteile der Teamarbeit durch die gruppenspezifischen Wirkungen offensichtlich ist. Nicht immer aber kann die Mitarbeit, das im Team geforderte Engagement für die Sache erwartet werden, es gibt sicher eine große Anzahl von Konstrukteuren, die lieber alleine arbeiten und in der Gruppe weniger leisten. Ferner kann die Arbeit in der Gruppe dazu führen, daß versteckte Gegensätze, Feindschaften oder heimliches Konkurrenzdenken offen zu Tage treten und damit die Zusammenarbeit erschweren. Schließlich können die Gruppen-, Abteilungs- oder Konstruktionsleiter sich diesen Methoden verschließen, weil sie damit Veränderungen in der Verantwortungsstruktur befürchten.

Die vorgestellten Methoden haben ihren Schwerpunkt in der Entwicklung neuer Lösungen. Mindestens 70 % der Konstrukteure befassen sich aber mit Varianten- und Anpassungskonstruktion, d.h. das Erstellen einer neuen Zeichnung aus einer alten bei

vorgegebenen Konstruktionsprinzipien und -gestaltung. Besonders in diesem Bereich ist die Akzeptanz einer Methodik, die sich mit Aufgaben- und Funktionsanalysen befaßt und die in der Lösungsfindung bewußt divergent ist, nicht zu erwarten, häufig wird die Konstruktionsarbeit an der Zahl der gezeichneten Linien gemessen.

Aus den bisherigen Erfahrungen mit der Einführung methodischer Arbeitsweisen in der Industrie läßt sich ein Vorgehen empfehlen, das aus einer Kombination von Mitarbeiterschulung und beratender Begleitung bei der Durchführung eines aktuellen Entwicklungsprojektes beruht. Die Schulung wird - nach unterschiedlichen Schwerpunkten untergliedert - von einer Reihe von Fortbildungsunternehmen angeboten, ferner kann man bei den jüngeren Ingenieuren zumindest Grundkenntnisse in dieser Disziplin erwarten. Für den Einstieg in die Arbeitsweise mit Projektteams ist die Unterstützung durch einen erfahrenen Industriebereiter zu empfehlen, der im Rahmen eines laufenden Projektes z.B. in wöchentlichen Abständen "vor Ort" die Teamleitung übernimmt und für den methodischen Ablauf sorgt. Diese Beratung konzentriert sich im wesentlichen auf administrative Vorgänge, die Bildung der Teams und die Einhaltung einer objektiven und zeitgerechten Vorgehensweise, die Verantwortung für das Produkt ist schon aufgrund der Sachkenntnis Angelegenheit der jeweiligen Fachabteilungen. Nach Durchlauf eines oder mehrerer Projekte kann diese Aufgabe der methodischen Begleitung von Mitgliedern der Konstruktionsabteilungen übernommen werden, die gleichzeitig die Verantwortung für die nächstfolgenden Projekte tragen. Von größter Bedeutung ist dabei, daß während dieser Einführungsphase die Vorgehensweise von der Geschäftsleitung voll unterstützt wird, da das Arbeiten im Team eine vertrauensvolle, vom üblichen "Abteilungskrieg" unbelastete bereichsübergreifende Zusammenarbeit erfordert. Zur Erläuterung der Arbeitsweise und als Motivation empfiehlt sich eine eintägige Einführung im Unternehmen, zu der auch Abteilungsleiter aus den Bereichen der Arbeitsvorbereitung, der Produktion, des Ein- und Verkaufs usw. eingeladen werden.

6 Zusammenfassung

Aus den vorangegangenen Betrachtungen können für eine Anwendung der Konstruktionslehre in der betrieblichen Praxis und ihrer Vorbereitung durch die Lehre oder durch einführende Veranstaltungen folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

1. Konstruieren kann im Sinne der Systemtechnik als ein in Stufen gliederbarer Prozeß betrachtet werden. Die immer wiederkehrenden Arbeitsschritte in diesem Prozeß sind beschreibbar und für sich optimierbar.
2. Zur Optimierung der Einzelschritte des methodischen Konstruierens gibt es angepaßte Methoden. Die gezeigten Beispiele haben bewiesen, daß neben einer nach physikalischen Grundlagen orientierten Methode die Ordnungsschemata und besonders die gruppendynamischen Effekte in der Teamarbeit zu einer Vielfalt möglicher Lösungen und zur gezielten Auswahl dieser Lösungen nach technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten führen.
3. Die aus der branchenunabhängigen Untersuchung von Konstruktionsstrukturen entstandenen Konstruktionsprinzipien und Gestaltungsregeln dienen der Verbesserung von Konstruktionen nach übergreifenden Grundüberlegungen. Am Beispiel der Aufgabenteilung und der Selbsthilfe ließ sich zeigen, daß durch Anwendung solcher Prinzipien die Weiterentwicklung von Maschinen im Sinne einer Leistungssteigerung möglich ist.
4. Die Einführung in die Denkweise des methodischen Konstruierens mit den Grundprinzipien einer funktionalen Betrachtungsweise und des methodischen Vorgehens sollten in die Grundausbildung der Studenten einfließen. Das hierfür geeignete Fach ist das Fach Maschinenelemente im Grundstudium, in das diese Disziplinen in Deutschland bereits erfolgreich eingeführt wurden. Die weitergehenden Wissensgebiete der Konstruktionslehre, z.B. Baukasten-Baureihensysteme, Wirtschaftliches Konstruieren

ren, Konstruktionsregeln, Konstruktionsysteme usw. sollten jedem Studenten, der sich mit der Entwicklung, Gestaltung und Verarbeitung von Teilen befaßt, im Rahmen eines Vertiefungsfaches des Hauptstudiums angeboten werden.

5. Für die Einführung methodischer Vorgehensweisen durch innerbetriebliche Weiterbildung empfiehlt sich nach den bisherigen Erfahrungen eine Mischung aus Fortbildungsveranstaltungen für einzelne Konstrukteure und die Begleitung eines Entwicklungsprojektes durch einen externen Berater. Schulung wie Beratung muß firmenspezifisch erfolgen, die konstruktionsmethodische Arbeitsweise muß sich in die vorhandene Organisationsstruktur des Unternehmens eingliedern lassen.

Unter den Randbedingungen der sich immer rascher entwickelnden Produkte und des verschärften Konkurrenzkampfes ist die Förderung des analytischen Denkens und der Kreativität innerhalb der Konstruktivität eine der wichtigsten Voraussetzungen für die erfolgreiche Weiterentwicklung. Dies gelingt umso leichter, als es sich hier um eine reine Methodenlehre handelt, die zu ihrer Einführung keinerlei Investitionen sachlicher Art wie Computer, Laborausrüstungen o.ä. benötigt.

*

Literatur:

- [1] Pahl, G. und Beelich, K.H.:
Erfahrungen mit dem methodischen Konstruieren.
Werkstatt und Betrieb 114 (1981)
Nr. 11, S. 773 bis 840
- [7] Pahl, G.: Denkpsychologische Erkenntnisse und Folgerungen für die Konstruktionslehre.
Proc. ICED85, Hamburg, 26. bis 28. August 1985
- [8] Beitz, W.: Innovative Produktpolitik - Strategien zur Planung und Entwicklung marktfähiger Produkte.
Konstruktion 40 (1988), S. 227-232
- [9] VDI-Richtlinie 2221:
Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.
- [10] VDI-Richtlinie 2225:
Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Anleitung und Beispiele
- [11] Dietz, P.: Baukastensystematik und methodisches Konstruieren im Werkzeugmaschinenbau.
Werkstatt und Betrieb 116 (1983)
Nr. 4, S. 185-189
- [12] Dietz, P.: Gesichtspunkte beim Aufbau eines Fertigungssystems mit Hilfe von Baukastenstrukturen.
Werkstatt und Betrieb 116 (1983) 8,
S. 485-488

Das Computer-Investitionsprogramm und seine Anwendung im Institut für Maschinenwesen

G. Deppermann

Inhalt: *Mit Hilfe von Bundesmitteln wurden am Institut für Maschinenwesen Microrechner angeschafft, deren Verwendung im wesentlichen Studenten vorbehalten bleibt.*

Anwendung: *Als Ergänzung zu den Vorlesungen und Übungen im Fach Maschinenelemente können mit eigens hierzu entwickelten Programmen zeitraubende Rechnungen in Zukunft auf dem Rechner erfolgen.*

1 Zielsetzung

Das Computer-Investitionsprogramm (kurz "CIP") der Bundesregierung aus dem Jahre 1986 zielte im wesentlichen auf drei Gesichtspunkte ab:

- a) den gezielten Einsatz von vernetzten Arbeitsplatzrechnern in Lehre und Studium, um im Vergleich zu anderen Ländern (z.B. USA, wo ähnliche Projekte seit geraumer Zeit laufen) den Anschluß an den dortigen Ausbildungsstand der Hochschulabsolventen nicht zu verpassen,
- b) die Heranführung der Studenten an die Informationstechnik bereits in einem frühen Stadium des Studiums und
- c) die Neueinrichtung bzw. Umstellung der Lehre auf die Verwendung dieser Rechner

Bei einem Investitionsvolumen von ca. 250 Mill. DM sollte bundesweit im Durchschnitt ein Gerät pro 100 Studenten unter folgenden drei Voraussetzungen angeschafft werden:

- Installation von Geräte-"pools" mit mindestens 8 Arbeitsplätzen (in der Regel Einplatzsysteme; bei Mehrplatzsystemen max. 4 Anschlüsse und mindestens 4 weitere Einplatzsysteme)
- Begrenzung auf höchstens 3 Systemfamilien an einer Hochschule
- Nutzung von Vernetzungsmöglichkeiten

Bislang existieren an der TU Clausthal 3 'Pools' (Rechenzentrum, Physikalisches Institut und Institut für Maschinenwesen), ein weiterer ist beantragt (Umweltverfahrenstechnik).

2 Der CIP-Raum("CIP-Pool") Im Institut für Maschinenwesen

Die Rechnerkonstellation im Institut für Maschinenwesen gestaltet sich wie folgt:

- 4 IBM AT 02 Personal Computer mit einem Drucker (540 K Kernspeicher; 20 MB Festplatte; 1,2 MB Diskettenlaufwerk)
- 1 PRIME 2250 Supermini mit 4 Konsolen und einem Drucker sowie einem Kassetten Bandgerät (2 MB Kernspeicher; 68 MB Festplatte)

Zwei der IBM-PC's sind zusätzlich an die PRIME angeschlossen und können so entweder als zusätzliche Konsolen oder zum Datentransfer zwischen PC und Supermini dienen.

3 Anwendung der Rechner Im Fach Maschinenelemente

Studenten der Fächer Maschinenbau, Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen müssen im Grundstudium 3 Semester lang das Fach Maschinenelemente hören; begleitend hierzu finden Übungen statt, deren einer Teil selbständig zuhause anzufertigen ist.

Thematisch werden in diesen Übungen die Methoden des systematischen Konstruierens, daß Ur-/Umformen und Fügetechniken sowie Entwürfe von Vorrichtungen, Maschinenteilen und Maschinen (u.a. Kupplung und Getriebe) behandelt. Zumal letztere bedürfen neben Auslegung und Zeichnung in der Regel rechnerischer Haltbarkeits- bzw. Sicherheitsnachweise, die anhand der Vorlesungsunterlagen und einschlägiger Fachliteratur anzufertigen sind.

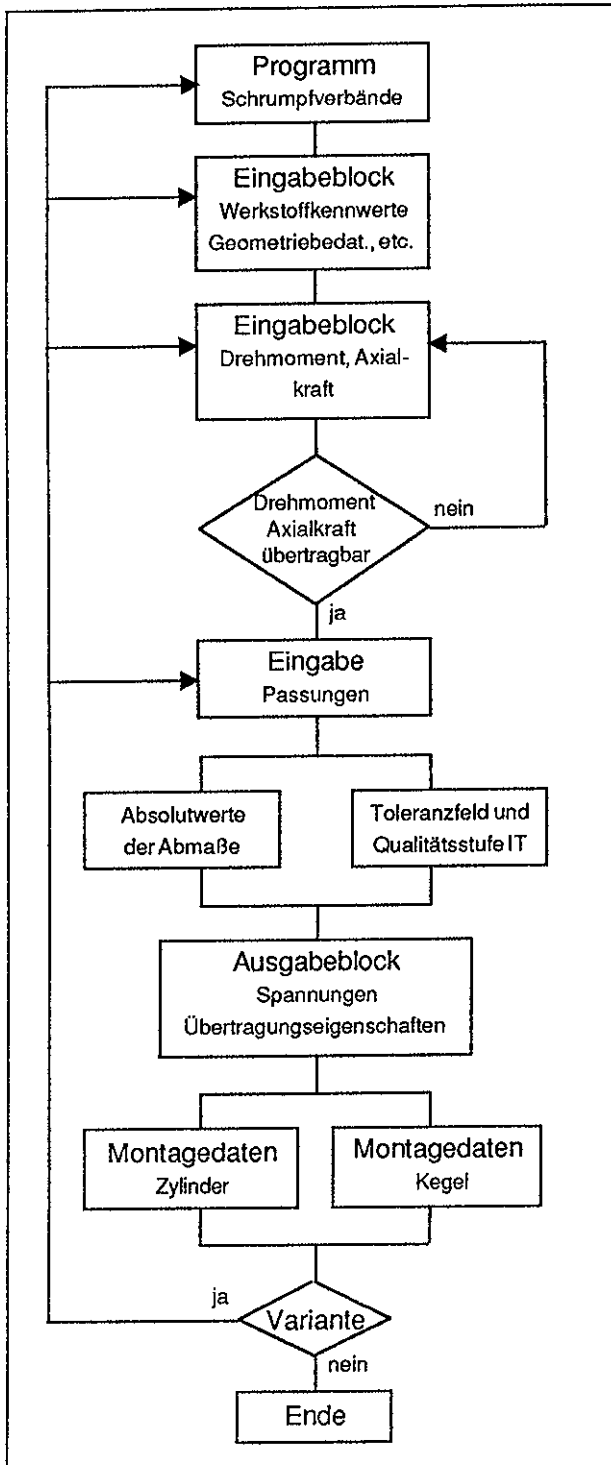


Bild 1: Flußdiagramm für das Programm "Schrumpf-/Kegelpreßverband"

Im Einzelfall kann dies wegen der gegenseitigen Einflußnahme von Maschinenteilen aufeinander einen erheblichen Rechenaufwand bedeuten, besonders wenn im fortgeschrittenen Stadium einer Konstruktion Änderungen vorzunehmen sind.

Dem (werdenden) Ingenieur bereitet dies sowohl einen kräftigen Mehraufwand an Zeit als auch geringe Freude, wie jeder, der dies bereits hinter sich hat, wohl bestätigen wird...

Hier sollen in Zukunft die CIP-Rechner mit Hilfe geeigneter Programme Abhilfe schaffen; der Benutzer gibt für ein von ihm vorgesehenes Maschinenteil lediglich genau vorgegebene - und im hiesigen Anwendungsfall durch die Vorlesung bekannte - Parameter ein und der Rechner ermittelt ihm nach kürzester Zeit entsprechende Ausgabewerte. Alle Programme werden grundsätzlich so eingerichtet, daß Variantenrechnungen möglich sind. Dem Konstruierenden bleibt somit Freiraum für die schöpferischen Tätigkeiten, während ihm die ständig wiederkehrenden Rechenabläufe vom Rechner abgenommen werden.

Es sei betont, daß der Student hierfür keinerlei Rechnerkenntnisse, sondern vielmehr Detailkenntnisse von den einzelnen Maschinenelementen und deren Besonderheiten besitzen muß.

Die Programme führen den Benutzer automatisch und geben an geeigneter Stelle stets die notwendigen Informationen bzw. Auswahlmöglichkeiten. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt wahlweise über den Bildschirm oder über einen Drucker.

Darüberhinaus erhalten die Studenten für jedes berechenbare Maschinenelement einige Handzettel mit zusätzlichen Angaben und Benutzerhinweisen, unter anderem z. B. das hier abgebildete vereinfachte Flußdiagramm in Bild 1 für das Programm "Schrumpf-/Kegelpreßverbände".

Die in der Programmiersprache FORTRAN 77 geschriebenen Berechnungsmodule orientieren sich inhaltlich an dem aktuellen Stand der Vorlesung "Maschinenelemente I-III" des hiesigen Institutes.

Aus diesem Grund sowie aus finanziellen Gründen wurde darauf verzichtet, die auf dem Markt (reichlich) angebotene Software zu kaufen. Außerdem sind die am Institut angefertigten Module ausführlich erläutert und können im Bedarfsfall veränderten Gegebenheiten (z.B. Änderung einer DIN-Norm oder neue Erkenntnisse bei empirischen Kennwerten) ohne

weiteres angepaßt werden. Hinzu kommt, daß auch Ergänzungen und Erweiterungen problemlos möglich sind, was im Hinblick auf geplante Verbesserungen und Kopplungen (siehe Punkt 5) ungemein wichtig ist.

Während ein kleiner Teil der Programme noch von Dr.-Ing. P. Dietz stammt, wurde und wird der überwiegende Teil im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten bzw. von wissenschaftlichen Hilfskräften angefertigt.

Da zum einen die PRIME 2250 eine erheblich größere Rechengeschwindigkeit besitzt als die IBM AT PC's und letztere zudem in großem Stile für die Textverarbeitung genutzt werden, erfolgt die Programmierung zunächst auf der PRIME. Nach Fertigstellung des gesamten Programmpakets soll auch eine PC-Version entstehen.

4 Verfügbare bzw. geplante Programme

Bis Ende 1988 werden voraussichtlich die folgenden Programmmodule verfügbar sein:

- Schrumpferverband / Kegelpreßverband
- Zugfeder
- Druckfeder
- Tellerfeder
- Wälzlager (Fa. SKF)
- Radialgleitlager
- Getriebevorauslegung/-berechnung

Die Quellprogramme liegen bereits vor, müssen jedoch zum überwiegenden Teil noch ausführlich getestet und mit den Informationsblättern ausgestattet werden. Geplant sind darüberhinaus für die Zukunft die Module:

- Wellenberechnung
- Riementriebe
- Paßfedern
- Schrauben
- Keilwellen
- Polygonwellen
- Reibradgetriebe

Nach Möglichkeit sollen je nach Maschinenelement sowohl statische als auch dynamische Festigkeitsrechnungen erfolgen können; hier ist u. a. an Werkstoffdatenbanken gedacht.

5 Zukunftsaussichten

Ein erstes Ziel für die Zukunft ist die Bereicherung der Programmmodule um einen Graphikblock, der es gestatten würde, die berechneten Maschinenelemente sowie Diagramme u.ä. zusätzlich darzustellen. Dies würde die Anschaulichkeit des Berechnungsvorganges erheblich erhöhen. Hierzu sind natürlich entsprechende graphische Arbeitsplätze nötig.

Das zweite Ziel ist es, im Zusammenwirken mit den CAD- und FEM-Techniken auf absehbare Zeit Kopplungen zu den Berechnungsprogrammen zu vollziehen. Dieses Vorhaben würde es ermöglichen, mit CAD gezeichnete und mit der FE-Methode auf ihr Spannungsverhalten hin untersuchte Maschinenelemente analytisch nachzurechnen bzw. auch vorauszu legen.

In Zusammenarbeit mit Datenbanken ließe sich somit der gesamte Bereich der für den Ingenieur notwendigen Tätigkeiten von einem einzigen Arbeitsplatz aus bewerkstelligen; eine Zukunftsvorstellung, die den Gedanken an "CIM" (Computer Integrated Manufacturing) sehr durchsichtig werden läßt, zumal, wenn sich eine entsprechend rechnergestützte Fertigung an die Konstruktion anschließt.

(In ähnlicher Weise wurde der CIM-Gedanke bereits auf der Hannover-Industriemesse 1987 vom Institut für Maschinenwesen anhand eines kleinen Drehteiles demonstriert.)

Vor diesem Hintergrund muß der Student - und damit der Ingenieur der Zukunft - den Rechner auch im Bereich analytischer Problemstellungen als universelles Werkzeug bereits zu einem möglichst frühen Zeitpunkt kennenlernen, um ihn später effektiv einsetzen zu können.

Die Bemühungen am hiesigen Institut gehen konsequent in diese Richtung, wobei das CIP-Programm ein entscheidender Beitrag dazu ist.

Entwicklung von CIM-Schnittstellen

N. Müller

Inhalt: Bericht über wissenschaftliche Grundlagenarbeit und Zuarbeit zur CIM-Schnittstellen-Normung im Rahmen der Kommission CIM im DIN (KCIM) und des BMFT-Projektes "CIM-Schnittstellen-Normung".

1 Einleitung

CIM bedeutet Computer Integrated Manufacturing und umfaßt den integrierten Einsatz von Rechnern in allen mit der Produktion zusammenhängenden Betriebsbereiche. Dabei ist CIM mehr als nur ein Schlagwort, es ist eine Herausforderung für die Industrie auf dem Weg zu größerer Produktivität, Flexibilität und betrieblicher Rentabilität. Es gibt keine CIM-Fabrik, es gibt nur Ansätze und Konzepte um rechnerintegrierte Produktion durch Verknüpfung von einzelnen computergestützten Fertigungsbereiche zu erreichen. Die einzelnen rechnergestützten Produktionsbereiche sind zum einen geometrisch / technologisch orientiert wie:

- CAD: Computer Aided Design, rechnergestützte Konstruktion und Entwicklung
- CAP: Computer Aided Planing, rechnergestützte Planung im Fertigungsbereich
- CAQ: Computer Aided Quality, rechnergestützte Qualitätssicherung
- CAM: Computer Aided Manufacturing, rechnergestützte Fertigung

zum anderen betrieblich orientiert wie:

- PPS: Produktionsplanungs- und -steuerungssystem mit
 - Produktionsplanung
 - Auftragssteuerung
 - Kalkulation
 - Materialwirtschaft
 - Termin- und Kapazitätsplanung
 - Werkstattsteuerung
- CAO: Computer Aided Office, rechnergestützte Büroumgebung

Durch die Integration der einzelnen C.....-Techniken soll erreicht werden das eine gemeinsame, bereichsübergreifende Nutzung von Informationen über geeignete Schnittstellen, Datenbasen und Datenetze möglich wird.

Ein Hauptproblem in der integrierten rechnergestützten Produktion sind die Schnittstellen zur Verknüpfung verschiedener Hardware- und Softwarelösungen. Aus Volks- und Betriebswirtschaftlicher Sicht ist es sinnvoll standardisierte bzw. genormte Schnittstellen und Protokolle in der Datenkommunikation beim Austausch produktdefinierender und produktionstechnischer Daten einzusetzen. Zur Zeit gibt es auf den unterschiedlichsten CIM-Schnittstellengebieten verschiedene zum Teil internationale Entwicklungen.

Angesichts der Dringlichkeit und Komplexität der Aufgabenstellung war das DIN Deutsches Institut für Normung e.V. als unabhängige technisch-wissenschaftliche Institution aufgefordert worden, die Initiative zu ergreifen und den Stand, den Handlungsbedarf sowie die Notwendigkeit der Forschungs-, Entwicklungs- und Normungsaufgaben für CIM festzustellen. Das DIN gründete die Kommission CIM (KCIM) im DIN, die den im nationalen Konsens festgelegten Handlungsbedarf für CIM-Schnittstellen im DIN-Fachbericht 15 erarbeitete. Zur weiteren Ausarbeitung und Bearbeitung von CIM-Schnittstellenprojekten wurden vier Projektgruppen gebildet.

- CAD
- NC-Verfahrenskette
- Fertigungssteuerung
- Auftragsabwicklung

Dabei Arbeiten Forschungsinstitute mit Anwender und Anbietern wie Hersteller von CIM-Systemkomponenten sowie entsprechende Normungsgremien eng zusammen. Im Rahmen des Förderungsprogramms "Fertigungstechnik 1988 bis 1992" hat das BMFT für Forschungseinrichtungen auch Mittel zur "CIM-Schnittstellen-Normung" bereitgestellt.

Die Arbeitsergebnisse sollen zu einem möglichst frühen Zeitpunkt in die europäische bzw. internationale Normung eingebracht werden, um inkompatible nationale Lösungen zu vermeiden. Das Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal ist mit drei Teilprojekten in zwei Projektgruppen beteiligt.

1. Projektgruppe CAD mit
 - CAD-Normteiledatei

2. Projektgruppe NC-Verfahrenskette mit
 - Betriebsmittelmodell, Beschreibungsmethode für Fertigungsmittel
 - CAD-NC strukturierte Bereitstellung planungs- und NC-relevanter Daten

2 CAD-Normteiledatei

Durch Übergang auf rechnergestützte Techniken im Konstruktionsbereich wird es erforderlich, Normteile auch hier zur Verfügung zu stellen. Bisher wurde die Norm auf einem Normblatt in Papierform festgehalten. Die elektronische Datenverarbeitung benötigt dieses Dokument in einer veränderten Form. Dabei reicht es nicht aus, nur den Inhalt aus Text und Grafik zu speichern, sondern auch die darin enthaltene Struktur, bestehend aus Merkmalleiste, Geometrie, ergänzenden Angaben und Verweisen auf anderen Normen zu erfassen, um sie der weiteren Verarbeitung zuzuführen. Das Normteil stellt eine Variante des in der Norm festgelegten Gegenstandes dar. Die Ausprägungen der Merkmale werden einer in der Norm enthaltenen Tabelle entnommen.

Durch die weite Verbreitung von CAD und die Möglichkeit hier Informationen vielfältig zu verarbeiten steigt die Nachfrage nach CAD-gerechten Normteildarstellungen. Die Funktionalität der einzelnen CAD-Systeme ist sehr unterschiedlich, deshalb mußten in der Vergangenheit systemspezifische Prgram-

module zur Normteilverarbeitung erstellt werden. Aus der Vielzahl der Strukturen mit unterschiedlichster Darstellung, Handhabung und Struktur ergab sich die Forderung nach Vereinheitlichung der Normteilschnittstelle.

Eine derartige Standardisierung wurde in gemeinsamer Arbeit der Industrie, unter Leitung des DIN, herbeigeführt. Dabei wurde vom NAM 96.4.5 in Zusammenarbeit und Unterstützung durch den VDA eine einheitliche Geometrieprogramm-Schnittstelle DIN V 66304 erarbeitet. Der NSM AA 4 überarbeitet die Produktnormen und erstellte diese in DIN V 4001 Teil 1.....n auf elektronische Speichermedien zur Verfügung. Den Datenfluß zwischen der Normteiledatei nach DIN V 4001 und der Geometriebeschreibung nach DIN V 66304 zeigt Bild 1.

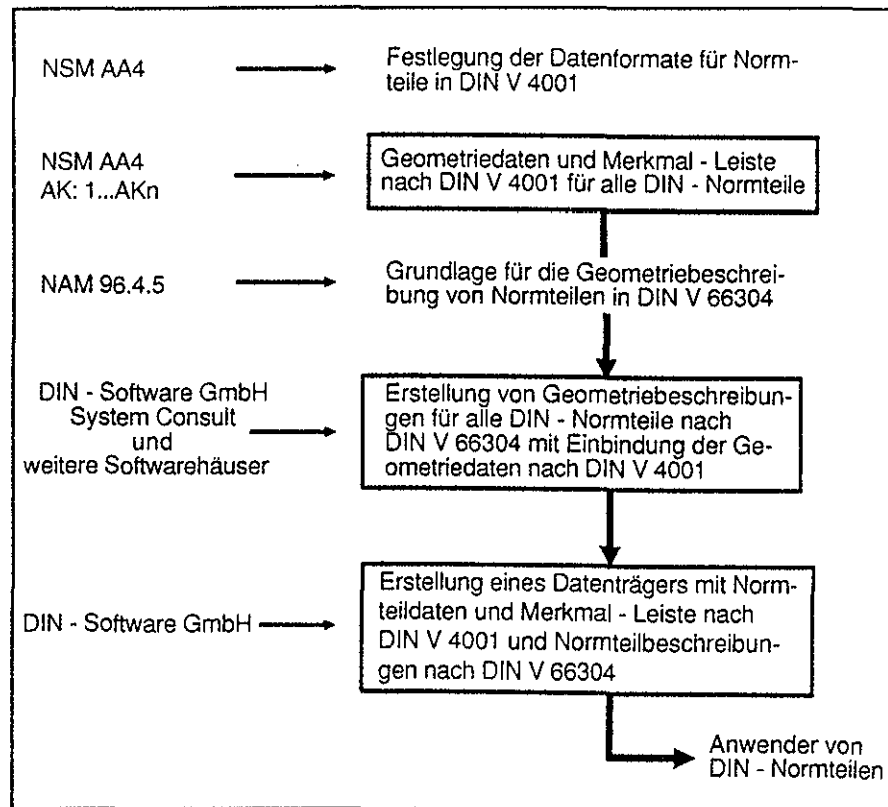


Bild1: Datenfluß zwischen Normteiledatei und Geometriebeschreibung

So ist es möglich Norm- und Wiederholteile zu erstellen, ohne die Eigenschaften des jeweiligen CAD-Systems zu berücksichtigen.

Daraus folgt:

- Normteile können zentral verbindlich definiert werden

- Betriebe, die mehr als ein CAD-System einsetzen, benötigen nur eine Definition eines Norm- oder Wiederholteils
- die Erstellung systemneutraler Kataloge wie zum Beispiel Lager, Normalien, Werkzeuge etc. wird erleichtert.
- Werkwiederholteile können im gleichen Format nach DIN V 4001 und DIN V 66304 beschrieben werden.

Die in den Ausschüssen des DIN erstellten Dateien nach DIN V 4001 und DIN V 66304 werden über die DIN-Software GmbH vertrieben.

Diese Entwicklung stellt nur ein Grundgerüst dar, das durch eine Datenbank- und Benutzerschnittstelle erweitert werden muß. Zur Zeit ist mit Hilfe von DIN V 4001/66304 nur eine Darstellung von 2D bzw. 3D-Drahtmodellen möglich, eine Erweiterung auf 3D-Flächen und Körpermodelle ist für eine durchgängige industrielle Anwendung dringend erforderlich. Weiterhin muß zur Sicherung der umfangreichen

nationalen Normarbeiten die Einbindung in die internationale Normung (ISO, EG) erfolgen.

Bild 2 zeigt ein Referenzmodell für NT-Geometrien in der industriellen Handhabung.

Für die Weiterentwicklung der CAD-Normteilgeometrie werden innerhalb des BMFT-Projektes die folgenden Arbeiten durchgeführt werden:

- Untersuchung der Integration von Normteilen in STEP (Standard for Exchange of Product Model Data) für den Datenaustausch
 - Abbildung der STEP-Struktur für Normteile
 - Einbindung konkreter Forderungen
 - Diskussion und Bewertung der Alternativen
 - Erarbeitung von Vorschlägen
 - Aufbau einer Testversion
- Untersuchung der Ansatzmöglichkeiten für 3D-Normteilentwicklungen unter Berücksichtigung von STEP
 - Konzepterarbeitung
 - Normentwurf
 - Aufbau einer Testversion
- Verbindungslogik von 3D- und 2D-Normteilen
- Weiterentwicklung bzw. Überarbeitung von DIN V 66304
- Review internationaler Papiere (ISO, CEN, ...)
 - Ausarbeitung von Stellungnahmen
- Bündelung der nationalen Normteilaktivitäten

An dem Projekt sind beteiligt:

1. Institut für Maschinenwesen TU Clausthal, Federführung
2. Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion TH Karlsruhe

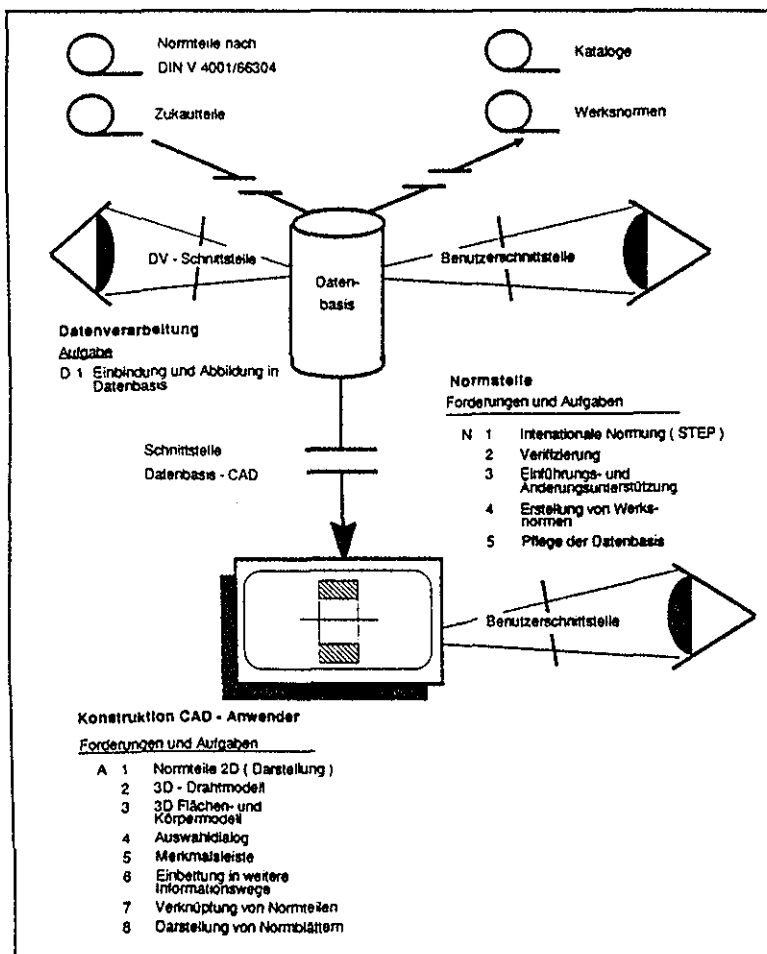


Bild 2: Referenzmodell für NT-Geometrien

3 Betriebsmittelmodell, Beschreibungsmethode für Fertigungsmittel

Betriebsmittel stellen für jedes Unternehmen ein Unternehmenspotential dar, deren Daten an den unterschiedlichsten Stellen im Unternehmen benötigt werden. In Rahmen einer rechnergestützten Produktion werden diese Daten meist in den unterschiedlichen Computeranwendungen abgelegt so u. a. im

- PPS-System Produktionsplanung und -steuerung
- CAP-System zur rechnergestützten Arbeitsplanung
- CAD-System
- NC-Programmiersystemen
- CNC-Steuerungen

Dabei sind diese Daten zwischen den Systemen nicht austauschbar und führen zu Redundanzen bei der Datenhaltung. Die Betriebsmitteldaten beschreiben die geometrischen und technologischen Merkmale der in den Firmen vorhandenen

- Werkzeuge,
- Vorrichtungen,
- Werkzeugmaschinen,
- Prüfmittel
- usw.

In einem CIM-Konzept sollten für alle Anwendungen ein einheitliches und zentrales Datenkonzept für Betriebsmittel vorliegen, die es ermöglichen standardisierte Betriebsmitteldaten einzusetzen. **Bild 3** zeigt den Einsatz eines Betriebsmittel-Datenbankkonzeptes.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von Methoden zur zentralen und standardisierten Datenhaltung von Betriebsmitteldaten. Hierzu soll eine allgemeingültige Beschreibung von Fertigungsmitteln unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen der computerintegrierten Fertigung abgeleitet werden. Die hierfür zu erarbeitenden Ergebnisse sind:

- ein einheitliches, standardisiertes Datenformat für die Datenaustausch

- Konzepte zur Standardisierung der:
 - Datenspeicherung,
 - organisatorische Eingliederung,
 - zentrale Schnittstelle zu den verschiedenen Applikationen

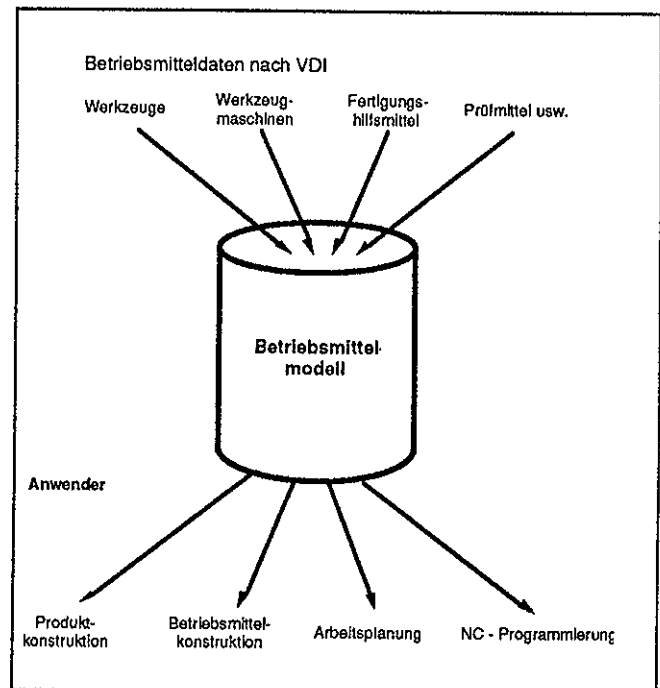


Bild 3: Betriebsmittel-Datenbankkonzept

An dem Projekt sind beteiligt:

1. WZL Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre TH Aachen, Federführung
2. IMW Institut für Maschinenwesen TU Clausthal
3. IPT Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Automatisierung Aachen
4. CAD-NC strukturierte Bereitstellung planungs- und NC-relevanter Daten

Entwicklung und Standardisierung von Schnittstellen für die strukturierte Übergabe von Geometrie und Technologiedaten aus CAD (2D und 3D) in die NC-Programmierung und Einbeziehung der Werkstattprogrammierung. **Bild 4** zeigt die aus einer CAD-Produktbeschreibung abgeleiteten Produktinformationen im Planungsbereich.

In einem CIM-Konzept ist es erforderlich, daß neben der reinen Geometrie (2D und 3D) eine strukturierte Bereitstellung aller NC-relevanter Daten (Geometrie und Technologie) aus CAD für die NC-Programmierung ermöglicht wird. Besonders für technologische Daten (z.B. Toleranzen, Oberflächenqualität) aus 2D- und 3D-Darstellungen bzw. Modellen gibt es für eine NC-Kopplung noch keine standardisierten

Schnittstellen. Diese standardisierten Schnittstellen sind notwendig sowohl für eine zentralisierte Programmierung (Fertigung, Handhabung, Qualitätswesen) als auch für eine dezentralisierte Vorgehensweise mittels Werkstattprogrammierung. In Bild 5 ist ein abstrahierter Informationsfluß für CAD-NC Kopplungen dargestellt.

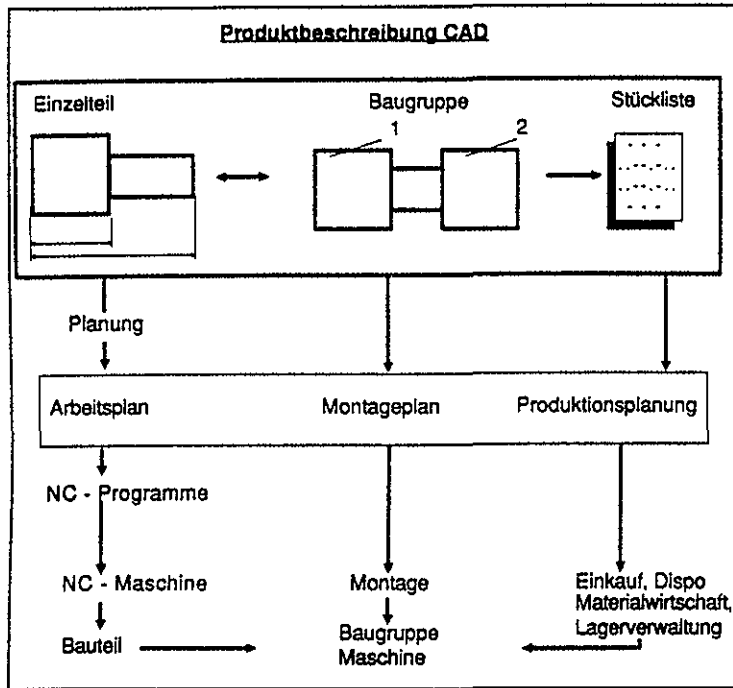


Bild 4: Schnittstellen zwischen CAD und Planung

Zur Zeit werden die meisten Kopplungen zwischen einem CAD-System X und einem NC-Programmiersystem Y durch die folgenden Schnittstellen realisiert:

- IGES
- VDAFS
- FTN
- ASCII

oder durch eine direkte Verbindung beider Systeme.

Dabei werden in der Regel nur die reinen geometrischen Daten aus den CAD-Fertigungszeichnungen 2D oder 3D an das NC-Programmiersystem übergeben. Derzeit können mit Hilfe der IGES-Schnittstelle 2D- und 3D-Kantenmodell, Informationen und mit der VDAFS-Schnittstelle Flächenmodelle, die in technischen Zeichnungen enthalten sind, übertragen werden.

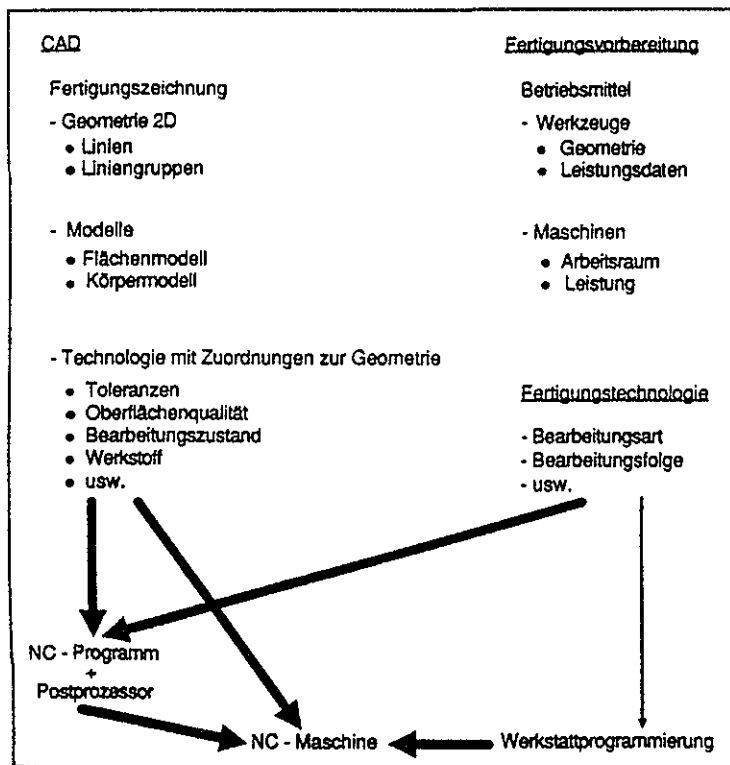


Bild 5: Datenfluß für eine CAD-NC Verbindung

Betrachtet man IGES aus der Sicht der NC-Programmierung, so ist festzustellen, daß das mit IGES übertragene konstruktionsorientierte Werkstückmodell nicht den Anforderungen an ein fertigungsorientiertes Modell genügt.

Eine Kopplung über eine FTN- oder ASCII-Schnittstelle sowie eine direkte Verbindung beider Systeme kann immer nur für eine spezifische Anwendung programmiert werden und ist keine standardisierte bzw. normierte Kopplung. Auch hier ergeben sich ähnlichen Nachteile wie für eine Kopplung mit Hilfe von IGES. Darüber hinaus besteht ein erhöhter Softwarewartungsaufwand.

Bild 6 zeigt eine Übersicht der Kopplungsmöglichkeiten von CAD-NC Systemen.

Die erwähnten Nachteile von IGES versucht man durch STEP (Standard for Exchange of Product Model Data) zu eliminieren. Als Basis von STEP gilt die in den USA entwickelte Schnittstelle PDES.

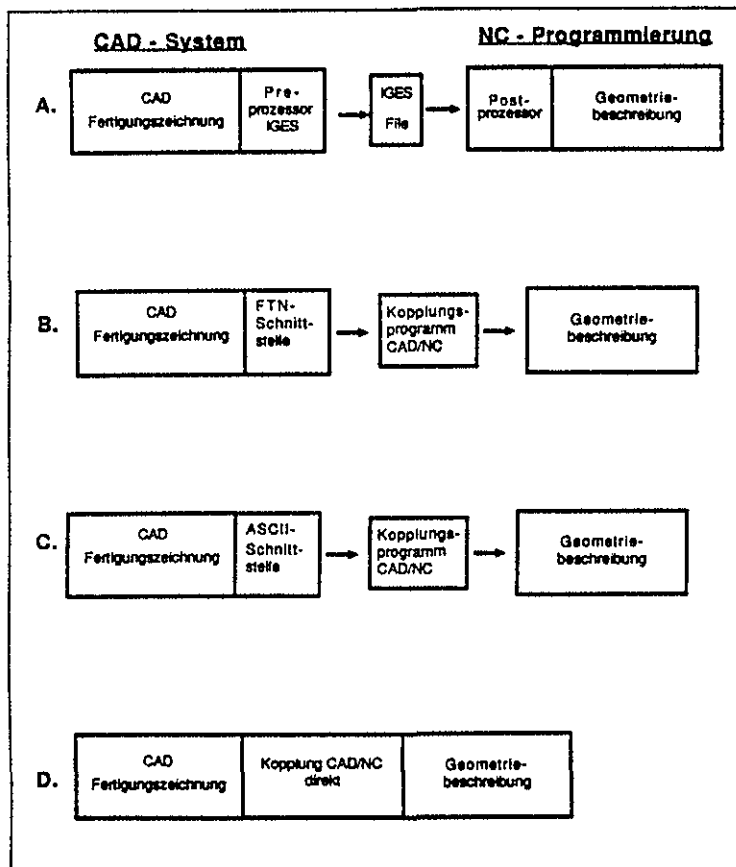


Bild 6: Übersicht über CAD-NC Kopplungen

STEP umfaßt von der Funktionalität her neben Kanten-, Flächen- und Volumenmodellen auch technologische Daten sowie anwendungsbezogene Datenmengen. Von besonderer NC-Relevanz sind die STEP-Partial-Modelle Form-Features und Tolerancing.

Ziel des Vorhabens ist die Analyse von STEP bezüglich der Anforderungen aus Sicht der NC-Programmierung. Dabei sind neben der Problemanalyse und -definition die Anforderungen an eine CAD/NC-Kopplung mittels eines Pflichtenheftes festzulegen. Zu prüfen ist, inwieweit die STEP-Normung die Anforderungen für eine CAD/NC-Kopplung abdeckt. Zur weiteren Sicherstellung der nationalen Interessen ist eine Mitarbeit an der STEP-Normung erforderlich.

Im einzelnen sind die folgenden Arbeitsschritte geplant:

- Problemanalyse und -definitionen CAD/NC
- Erarbeitung eines Pflichtenheftes

- Analyse von STEP bezüglich der Anforderungen
- Erarbeitung von Forderungen an STEP
- Mitarbeit an STEP Papieren
- Erprobung und Testinstallation

An dem Projekt sind beteiligt:

1. WZL Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre TH Aachen, Federführung
2. IMW Institut für Maschinenwesen TU Clausthal
3. IPK Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Konstruktionstechnik Berlin

5 Zusammenfassung

Zur Zeit werden am Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal CIM-Schnittstellen Untersuchungen bzw. Entwicklungen durchgeführt, die aus dem Konstruktionsumfeld kommen. Ziel der Entwicklungen ist eine standardisierte Anwendung von CIM-Schnittstellen im CAD- und NC-Bereich. Sie bilden die Grundlagen für eine vernünftige und zukunftsweisende computergestützte Konstruktionsentwicklung im Rahmen von CIM-Konzepten.

*

Widerstandsverhalten pneumatischer Elemente und deren Kennzeichnung

Prof. H.J. Barth

Inhalt: *Der Widerstand pneumatischer Bauteile wird von deren Herstellern in unbefriedigender Form angegeben. Dabei beeinflussen diese Widerstände entscheidend die Energieumsetzung in pneumatischen Antrieben und die Dynamik pneumatischer Schaltungen oder Regelkreise. Es werden deshalb Vorschläge für eine eindeutige und vollständige Kennzeichnung solcher Widerstände gemacht und an Beispielen aus der Institutsarbeit dargestellt.*

1 Einleitung

Bewegt sich ein Gas mit einer endlichen Geschwindigkeit entlang einer festen Fläche wie z.B. der Wandung einer Rohrleitung oder der Oberfläche eines Flugzeugflügels, so bewirkt die Zähigkeit des Gases Reibungsverluste. An der Wand ist die Strömungsgeschwindigkeit gleich der Geschwindigkeit der Oberfläche, bei ruhenden Oberflächen also gleich Null. Mit zunehmender Entfernung von der Wand steigt die Strömungsgeschwindigkeit aufgrund der zähigkeitsbedingten Schleppkräfte in der Strömung an, und zwar umso mehr, je höher die dynamische Zähigkeit η des Gases ist. In Rohrleitungen z.B. bilden sich deshalb ausgeprägte Geschwindigkeitsprofile aus. Deren Geschwindigkeitsverteilung könnte zur Ermittlung des Strömungswiderstands dienen. Sie wird aber außer von der Form des Strömungskanals auch vom Verhältnis der Trägheits- zu den Zähigkeitskräften bestimmt, das durch die Reynoldszahl

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$$

w - Strömungsgeschwindigkeit

d - charakteristische Länge, hier: Rohrdurchmesser

ν - kinematische Zähigkeit

gekennzeichnet wird.

Da das Geschwindigkeitsfeld in einem oder in mehreren Strömungsquerschnitten vollständig ausgemessen werden müsste, ist die Strömungsgeschwindigkeit weniger geeignet, um pneumatische Widerstände zu beschreiben. Mehr noch gilt dies für Einzelhindernisse wie Blenden, Kanalumlenkungen oder unstetige Änderungen der Kanalquerschnitte oder für durchströmte Schüttungen wie z.B. Absorptionsschalldämpfer, bei denen Geschwindigkeitsmessungen sehr schwierig oder unmöglich sind. Es sind deshalb andere Meßwerte zu suchen, die eine eindeutige und einfache Widerstandskennzeichnung ermöglichen.

Eine eindeutige Kennzeichnung des Widerstandsverhaltens pneumatischer Elemente ist deshalb wichtig, weil die Widerstände Verluste bewirken: sie erhöhen den Energiebedarf bei der Druckerzeugung, sie mindern den Arbeitsgewinn pneumatischer Antriebe durch Minderung des nutzbaren Druckgefälles und sie verursachen zusammen mit den stets vorhandenen Volumina von Schläuchen, Rohrleitungen etc. im gleichen Sinn wie elektrische R-C Glieder Verzögerungen, verschlechtern also die Dynamik pneumatischer Systeme. Andererseits kann die Kenntnis des Widerstandsverhaltens auch gezielt beim Einsatz pneumatischer Elemente genutzt werden: mit zusätzlichen, einfach zu erzeugenden Widerständen kann z.B. die Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik von Drehantrieben stufenlos verändert werden. Durch pneumatische Widerstände verursachte Druckänderungen können als Maß für den Volumenstrom genutzt werden (Prinzip der Volumenstrom-Messung mit Meßblenden und -düsen). Die Kenntnis des Widerstandsverhaltens ist Voraussetzung für den Aufbau von Regelkreisen aus pneumatischen Elementen. Gelingt es, das Widerstandsverhalten gezielt zu verändern, kann damit auch das Regelverhalten beeinflusst werden. Das Widerstandsverhalten nutzt man auch in pneumatischen Sensoren, mit denen in der Serienfertigung Maß- und bestimmte Formtoleranzen überwacht werden.

Große Bedeutung hat das Widerstandsverhalten von durchströmten Absorptionsschalldämpfern auf die Leistung der so gedämpften Maschinen: Absorptionsschalldämpfer ermöglichen meist eine bemerkenswerte Dämpfung des Abluftschalls, verursachen aber besonders bei hohen Drehzahlen erhebliche Druckverluste. Dabei ist der zu treibende Aufwand enorm hoch: eine Dämpfung z.B. von 90 auf 70 dB wird mit einem Dämpfer bei einem Druckverlust von z.B. 1 bar erreicht. Die Amplitude des Schalldrucks beträgt dabei nur etwa $6 \cdot 10^{-6}$ bar. Die Schalleistung auch des ungedämpften Abluftstrahls mit einem Schallpegel von 90 dB entspricht nur 1/1000 W. Hier erwarten wir, nach weiteren Untersuchungen des Zusammenhangs von Schalldämpfung und Druckverlust energetisch günstigere Schalldämpfer entwickeln zu können.

2 Kennzeichnung pneumatischer Widerstände

Grundsätzlich lässt sich eine Gasströmung unterschiedlich auffassen und entsprechend theoretisch beschreiben:

- eine Strömung entsteht dann, wenn ein Energiegefälle vorhanden ist. Dieses Gefälle lässt sich angeben als Druck- oder Enthalpiedifferenz, die eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit bewirkt.
- eine Strömung, die einmal entstanden ist, bleibt ohne Verluste unverändert. Es fließt ein konstanter Volumenstrom. Verluste werden erfasst als Maß der Minderung des effektiven gegenüber dem theoretischen Volumenstrom

$$\dot{V}_{\text{eff}} = \alpha \cdot \dot{V}_{\text{th}}$$

α – Durchfließzahl oder Ausfließziffer

In dieser Weise geht man vor bei der Messung mit Normdüsen, -blenden und Venturirohren.

Beide Vorstellungen lassen sich verknüpfen mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung. Zur Beschreibung der Verluste von Rohrleitungen und Einzelwiderständen werden bevorzugt die folgenden Beziehungen für die (nicht umkehrbaren) Druckverluste benutzt:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad \text{für Rohrleitungen (1)}$$

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad \text{für Einzelwiderstände (2)}$$

λ - Rohrreibungszahl

l - Rohrlänge

d - Rohrdurchmesser, Licht

ζ - Reibungsbeiwert für Einzelwiderstände

Dabei ist $\lambda \cdot l/d$ und entsprechend ζ nichts anderes als ein Proportionalitätsfaktor zwischen dem Druckverlust Δp und dem Staudruck und hat damit den gleichen Charakter wie der viel diskutierte Widerstandsbeiwert c_w , der zur Kennzeichnung des Luftwiderstands von Landfahrzeugen benutzt wird.

Praktisch verwenden viele Hersteller pneumatischer Elemente wie z.B. von Ventilen zur Kennzeichnung ihrer Produkte Widerstandsbeiwerte, die ähnlich wie der k_v -Wert definiert sind. Dieser k_v -Wert beschreibt an sich nach VDI-2173 den Volumenstrom ("Durchfluß") von Wasser bei Temperaturen von 5 bis 30 °C, der bei einem Druckabfall von 1 at durch einen Widerstand strömt. Er wird aber mit entsprechenden Umrechnungsfaktoren zur Berücksichtigung der anderen Dichte auch zur Kennzeichnung des Verlustes von Pneumatik-Elementen benutzt. Dieser Wert mag als Anhalt für die Verluste von Elementen gleicher Anschlußgröße eines Herstellers nutzbar sein. Er beschreibt aber nur den Volumenstrom durch ein bestimmtes Element wie z.B. ein Wegeventil für einen willkürlich gewählten Betriebspunkt. Da der k_v -Wert abhängt von der Größe des Elements, kann er nicht zum Vergleich der strömungstechnischen Güte unterschiedlich großer Elemente benutzt werden.

Alle branchenüblichen Angaben für pneumatische Widerstände erlauben keine Antwort auf die folgenden Fragen:

- wie ändert sich der Widerstand bei merklichen Dichteänderungen?
- wie bei Umkehr der Durchströmungsrichtung (bei Tellerventilen z.B. müssen deutliche Unterschiede auftreten)
- bei Wegeventilen: für welchen Strömungsweg wurde gemessen? Wie ist der Widerstand in den anderen Strömungskanälen?
- wie groß ist der Widerstand der Zu- und Abluftleitungen (Schläuche und Verschraubungen)
- wie ist der Einfluß instationärer Strömungsverhältnisse?
- wie verhalten sich Ketten von Einzelwiderständen?

In der Ölhydraulik beschränkt man sich überwiegend nicht auf die Angabe nur eines Zahlenwerts für einen Widerstand, obwohl dort das Widerstandsverhalten ja erheblich weniger abhängig von der Dichte des Fluids ist als in der Pneumatik. Es ist deshalb zu fordern, daß auch in der Pneumatik dem Kunden mehr Informationen zum Widerstandsverhalten pneumatischer Elemente gegeben werden.

2.1 Einfluß der Dichteänderung

Für den Druckverlust von Einzelwiderständen gilt:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho_D}{2} \cdot w_D^2 \quad (3)$$

Dabei wird in Übereinstimmung mit Messungen angenommen, daß der Druckverlust in Form einer idealen Drosselung entsteht, d.h. daß die Temperatur vor und hinter dem Widerstand gleich bleibt:

$$T_1 = T_D = T_2$$

- Index 1 - Zustand vor dem Widerstand
- D - Zustand im Widerstand
- 2 - Zustand hinter dem Widerstand

Dann folgt nach einigen Umformungen

$$\Delta p = p_1 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \zeta \cdot \frac{\dot{V}^2}{RT_1 A^2}} \right) \quad (4)$$

Für die Geschwindigkeit wird hier der Quotient aus Volumenstrom und Strömungsquerschnitt gesetzt. Der Volumenstrom ist viel leichter als die Strömungsgeschwindigkeit und an einer beliebigen Stelle vor oder hinter dem Widerstand zu messen. Der Strömungsquerschnitt A ist eine konstruktive Größe und kann einer entsprechenden Zeichnung entnommen werden. Das ist aber praktisch nicht notwendig und sinnvoll: zwei Ventile sind bezüglich ihrer Verluste dann gleich gut, wenn bei gleichem Vordruck und gleichem Volumenstrom der gleiche Druckverlust entsteht. Genau dann soll sich für beide Ventile gerade der gleiche Verlustbeiwert ergeben. Ein strömungsungünstig gestalteter Widerstand mit weiterem Querschnitt erscheint dann sinnvollerweise als gleich gut wie ein enger aber strömungsgünstig gestalteter Widerstand, wenn als Bezugsquerschnitt der Anschlußquerschnitt gewählt wird. Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, daß häufig pneumatische Elemente wie z.B. Ventile in sich Widerstandsketten mit mehrfachen Kanalumlenkungen, Querschnittsänderungen etc darstellen, so daß die Angabe einer kennzeichnenden Geschwindigkeit gar nicht möglich ist. Nachteilig ist, daß ohne Kenntnis der effektiven Geschwindigkeiten die Re-Zahlen nicht bestimmt werden können.

2.2 Beschleunigung und Verzögerung

Abschätzungen ergeben, daß bei Pneumatik-Ventilen mit kurzen Schließzeiten Trägheitskräfte entstehen können, die nicht ohne weiteres vernachlässigt werden dürfen. Hierzu sind weitere Untersuchungen geplant. Instationäre Verlust-Messungen sind mit dynamischen Druckaufnehmern möglich, erfordern aber einigen Auswertearbeit. Erste Versuche hierzu waren aber vielversprechend.

2.3 Widerstandsketten

Löst man Gl.(4) nach ζ auf, so ergibt sich

$$\zeta = \frac{(p_1^2 - p_n^2) \cdot RTA^2}{p_1^2 \cdot \dot{V}_1^2} \quad (5)$$

$$p_2 = p_1 - \Delta p$$

Man kann nun in einfacher Weise zeigen, daß unter der Voraussetzung idealer Drosselung der Gesamtdruckverlust als Summe der Einzelverluste auch berechnet werden kann mit der Summe der Einzelwiderstandswerte ζ_n

$$\zeta_{\text{ges}} = \sum \zeta_n = RTA^2 \left(\frac{p_1^2 - p_n^2}{p_1^2 \cdot \dot{V}_1^2} \right) \quad (6)$$

p_n - Druck hinter dem letzten Einzelwiderstand

Dies gilt natürlich auch für die unvermeidlichen Ketten von Anschluß-Schläuchen, Einschraubnippeln und dem eigentlichen pneumatischen Element. Dies sollte so geprüft werden, daß in einer zusätzlichen Messung nur der Widerstand der Schläuche und der Einschraubnippel ermittelt wird.

2.4 Zweckmäßige Darstellung

Die Darstellung des Widerstandsverhaltens kann zwei Ziele haben:

- möglichst vollständige Beschreibung des Widerstandsverhaltens mit weitgehender Vergleichsmöglichkeit, z.B. für technische Unterlagen. Vergleichsmöglichkeiten entstehen, wenn die Darstellung unabhängig von bestimmten Betriebszuständen und von der Baugröße ist.
- Untersuchung des Zusammenhangs Druckverlust-Staudruck

Für die erste Aufgabe erscheint nach Gl.(4) die Abhängigkeit

$$\frac{\Delta p}{p_1} = f\left(\frac{\dot{V}_1}{A}\right) \quad (7)$$

gut geeignet: theoretisch ist der relative Druckverlust unabhängig von der Druckhöhe. Der Quotient \dot{V}/A ist von der Baugröße unabhängig.

Für die zweite Aufgabe eignet sich nach Gl.(3) die Auftragung

$$\zeta = f\left(\frac{\Delta p}{\rho_D \cdot w_D^2}\right) = f(\text{Eu}) \quad (8)$$

$$\text{Eu} = \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2} \quad (\text{Euler-Zahl})$$

$$\rho_D = \sqrt{p_1 \cdot p_2}$$

$$w_D = \frac{\dot{V}_D}{A} = \frac{\dot{V}_1 \cdot p_1}{A \cdot p_D}$$

$$\rho_D = \frac{p_D}{RT}$$

$$p_2 = p_1 - \Delta p$$

Damit kann ermittelt werden, für welche Bereiche der Verlustbeiwert ζ konstant ist, also der Druckverlust dem Staudruck direkt proportional ist. Vom Geschwindigkeits-Quadrat abweichende Proportionalitäten ermittelt man zweckmäßig aus logarithmischen Auftragungen. Abweichungen treten auf im Bereich sehr kleiner Re-Zahlen (laminare Strömung) und im Übergangsbereich bis zur voll ausgebildeten Turbulenz. Abweichungen ergeben sich gleichfalls dann, wenn an irgendeiner Strecke des Strömungskanals Schallgeschwindigkeit erreicht wird. Dann muß in der Darstellung nach Gl.(8) ein steiler Anstieg entstehen (s. auch Beispiele in Abschn. 3). Aus der den Übergang markierenden Stelle kann übrigens wieder auf den engsten Strömungsquerschnitt geschlossen und damit die Re-Zahl berechnet werden.

3 Widerstandsverhalten ausgewählter Pneumatik-Elemente

Bild 1 zeigt die Gestaltung der Einlaßkanäle eines Druckluft-Lamellenmotors, Bild 2 den für diese Strömungsgeometrie gemessenen Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit vom mittleren Volumenstrom, der dem oben erwähnten Volumenstrom \dot{V}_D entspricht.

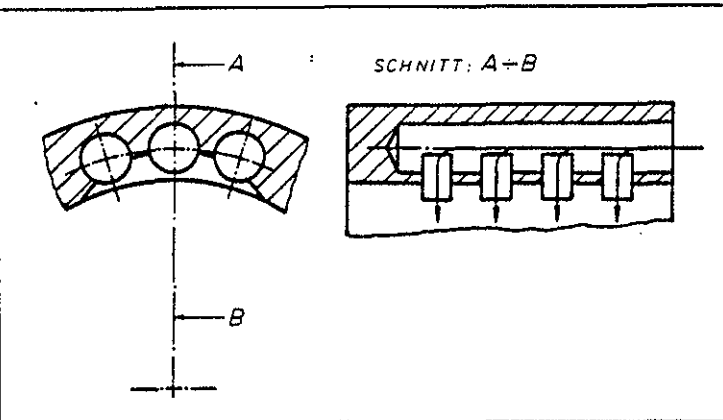


Bild 1: Druckluftereinlaß eines Lamellenmotors

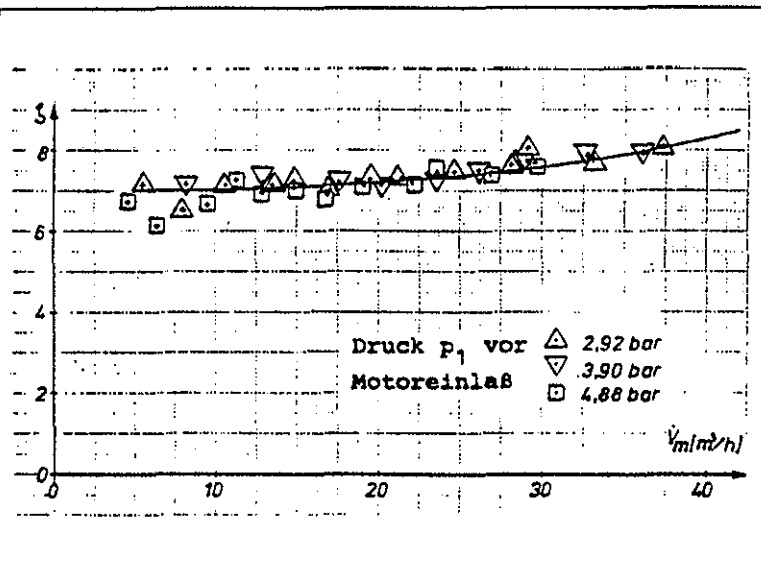


Bild 2: Verlustbeiwert der Einlaßdrosselung bei stationärer Zuströmung

Die Luft strömt durch drei parallele Bohrungen und von dort durch vier senkrecht zur Bohrungsachse eingefräste, scharfkantige Ausnehmungen. Der Verlustbeiwert steigt mit zunehmendem Volumenstrom an. Als Ursache dafür ist eine wachsende Strömungsablösung an den Kanten der Strömungsumlenkung anzusehen. Machzahleinflüsse spielen hier noch keine Rolle. Übereinstimmend mit dem oben gesagten ist eine Druckabhängigkeit nicht erkennbar.

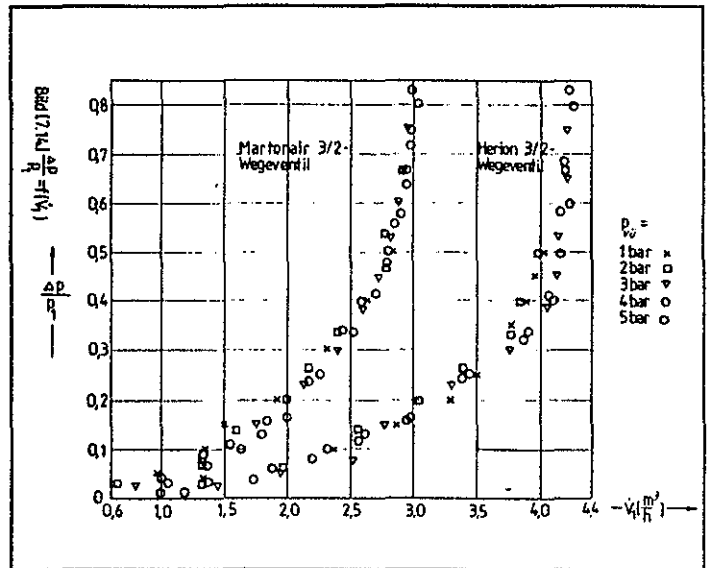


Bild 3: Bezogener Druckverlust für zwei Wegeventile mit gleichem Anschlußdurchmesser in Abhängigkeit vom Volumenstrom vor den Ventilen

Bild 3 zeigt den bezogenen Druckverlust für zwei vergleichbare Ventile jeweils mit den gleichen An- und Abluftschläuchen. Auch hier ist eine Druckabhängigkeit nicht erkennbar. Es wird aber deutlich, daß der Widerstand der beiden Ventile sich sehr stark unterscheidet. Ein solches Blatt als Datenblatt würde dem Anwender die Auswahl eines geeigneten Ventils erheblich erleichtern. Außerdem könnte er bereits in der Auswahl-Phase den Einfluß des Ventils auf die Dynamik der anzusteuenden Elemente wie z.B. eines Zylinders oder weiterer Ventile abschätzen.

Bild 4 zeigt die aus diesen Messungen errechneten Verlustbeiwerte. Die Meßgenauigkeit ist offenbar nicht berauschend. Dann fällt auf, daß auch hier offensichtlich der Verlustbeiwert mit wachsendem Volumenstrom ansteigt. Der Druckverlust wächst also offenbar etwas stärker als mit dem Quadrat der Geschwindigkeit, was auch hier durch Wirbelablösungen verursacht sein könnte. Mit Annäherung an die Schallgeschwindigkeit wächst der Verlustbeiwert in der Rechnung stark an, praktisch wird der Volumenstrom hier durch die Schallgeschwindigkeit begrenzt

Am deutlichsten erkennt man den Übergang aus dem Staudruck-proportionalen Bereich am Knick in der doppellogarithmischen Auftragung nach Bild 5.

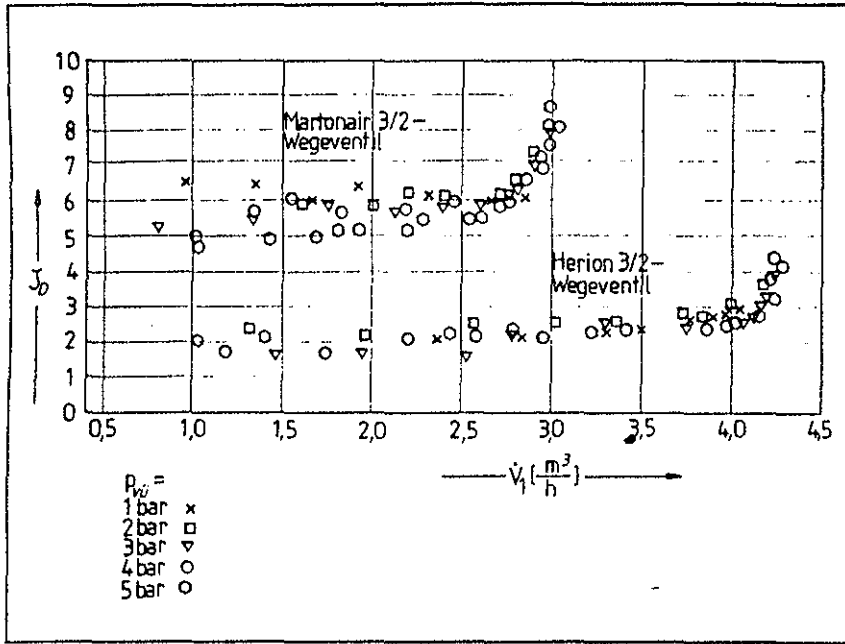


Bild 4: Verlustbeiwert in den Wegeventilen nach Bild 3

Literatur

Bilder 3,4 und 5:
 H. Schwarz: Untersuchungen zum Betriebsverhalten pneumatischer Elemente
 Studienarbeit, TU Clausthal, 1986

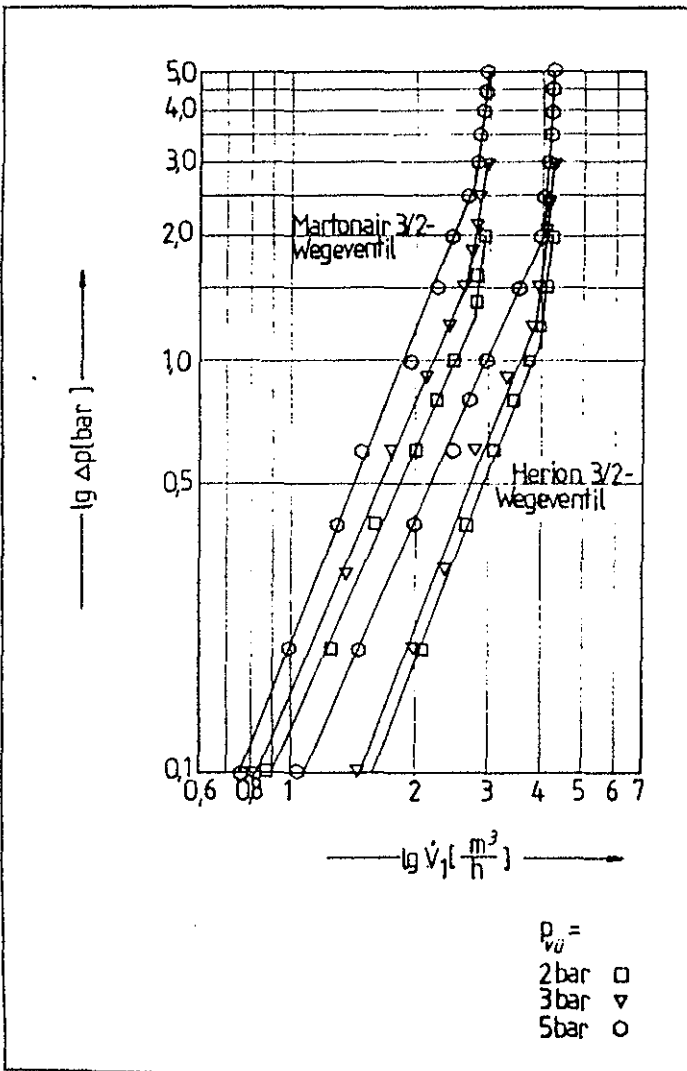


Bild 5: Druckverlust und Volumenstrom, logarithmische Auftragung

Wirtschaftlicher Einsatz von CAD für die Konstruktion von Trommelzentrifugen mit Hilfe eines Variantenprogramms

N. Müller

Inhalt: Am Beispiel eines CAD-Variantenprogramms im Baukasten wird eine Möglichkeit zur wirtschaftlicheren CAD-Anwendung im Konstruktionsbereich vorgestellt.

Anwendung: Das Variationsprogramm wurde für Rotorkonstruktionen von Trommelzentrifugen erstellt, die nach dem Prinzip der Aufgabenteilung ein Baukastensystem ermöglichen.

1 Einleitung

Für die Entwicklung und Konstruktion von Bau-reihen- und Baukastensystemen, gibt es beim Einsatz von CAD die Möglichkeit, die Wirtschaftlichkeit durch Anwendung der CAD-Variantenkonstruktion zu verbessern.

Unter Variantenkonstruktion versteht man, daß die Struktur einer Konstruktion erhalten bleibt, die Dimensionierung sich aber verändert.

Die meisten leistungsfähigen CAD-Systeme bieten die Möglichkeit eine oder mehrere Variantenprogrammtechniken anzuwenden. Die Erzeugung von Variantenprogrammen hängt von den eingesetzten CAD-Systemen ab. Prinzipiell unterscheidet man die Möglichkeit:

- Erstellung von Variantenprogrammen in einer Programmiersprache, z.B. FORTRAN
- Erstellung von Variantenprogrammen mit Hilfe einer Makrosprache
- Erstellung von grafisch-interaktiven Variantenprogrammen

Mit der Darstellung eines erstellten Konstruktionsprogrammes für Rotore von Trommelzentrifugen soll ein Beispiel für die rechnerunterstützte Vorgehensweise bei der Konstruktion verfahrens-technischer Maschinen gegeben werden.

Das Variantenprogramm ist für das CAD-System MEDUSA entwickelt und auf der CAD-Anlage im Institut für Maschinenwesen installiert.

Rotorsysteme in verfahrenstechnischen Maschinen

sind sehr oft aus scheiben- und schalenförmigen Elementen zusammengesetzt. Hieraus läßt sich der Gedanke ableiten, daß man unter Anwendung konstruktionssystematischer Vorgehensweisen und unter Ausnutzung der Mittel und Methoden des rechnerunterstützten Konstruierens ein Baukastensystem zur Berechnung und Gestaltung von Rotoren aus den genannten Elementen aufbauen kann. Dabei eignen sich diese Baukastensysteme besonders für die konstruktive Bearbeitung durch ein CAD-Variantenprogramm.

Das CAD-Variantenprogramm ist im Baukasten so entwickelt, daß die einzelnen Grundelemente von Rotorsystemen am Bildschirm interaktiv konstruiert und entsprechend zusammengestellt werden können. Dabei ist es wichtig, daß alle grafischen Informationen rechnerintern weiterverarbeitet werden. Bild 1 zeigt ein Beispiel eines Trommelzentrifugenrotoren, wie sie u.a. bei Dreisäulenzentrifugen eingesetzt werden.

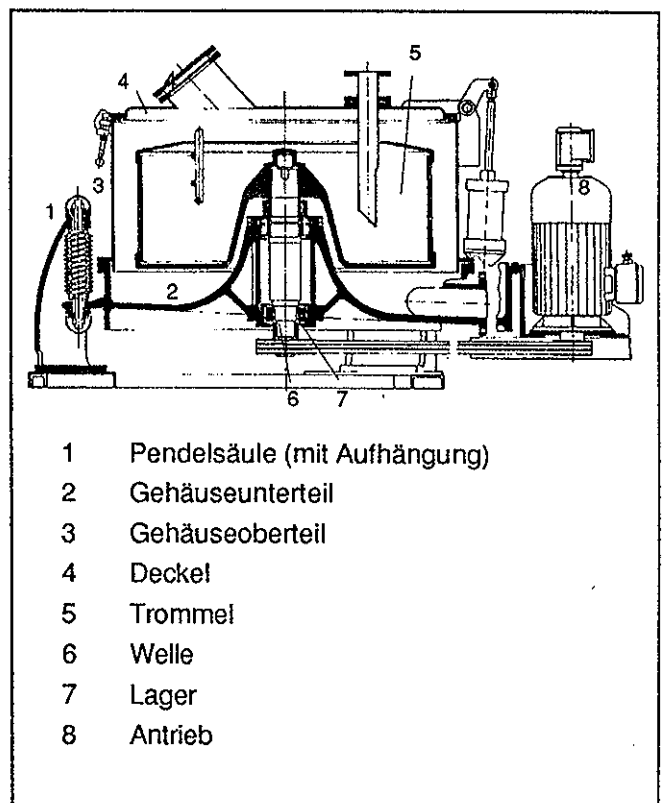


Bild 1 : Dreisäulenzentrifuge

Der Rotoraufbau dieser Trommelzentrifuge läßt sich in die vier Hauptelemente nach **Bild 2** aufteilen und eignet sich zur Erstellung eines Baukastens nach dem Prinzip der Aufgabentrennung. Dabei können den einzelnen Bauteilen definierte Funktionen zugeordnet werden:

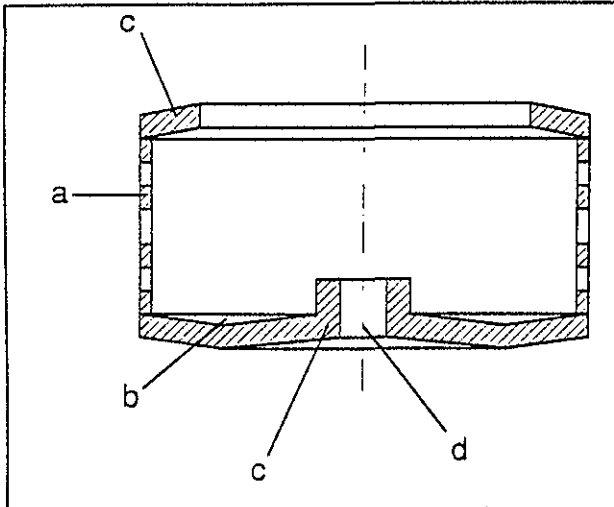


Bild 2: Baustruktur eines Trommelzentrifugenrotors

- a Verfahrenstechnische Wirkfläche: Trennung, Wirkbewegungen
- b Boden: Drehmoment, Querkraft leiten, Fliehkraft
- c Bord: Austrag, Fliehkraft
- d Nabe: Drehmomentenaufnahme

Lediglich die verfahrenstechnische Wirkfläche ist in seiner Gestaltung den Randbedingungen des verfahrenstechnischen Prozesses unterzuordnen. Alle anderen Strukturelemente des Rotors unterliegen in ihrer Gestaltungs Kriterien, die im Wesentlichen von Nebenfunktionen zur Erzeugung der verfahrenstechnischen Wirkflächen und ihrer Bewegung geprägt sind. Eine Trennung des Variantenprogramms nach den einzelnen Bauelementen des Rotors ist für eine flexible Programmgestaltung erforderlich.

Schwerpunkte des entwickelten interaktiven Variantenprogrammes sind:

- Konstruktion der verfahrenstechnischen Wirkfläche mit verschiedenen Durchbrüchen entsprechend den geforderten verfahrenstechnischen Randbedingungen
- konstruktive Gestaltung von Boden und Bord des Rotors
- Einbindung der verschiedenen Einzelkomponenten in ein Gesamtrrotorsystem

Das CAD-System Medusa eignet sich zur Zeichnungserstellung von Konstruktionsvarianten mit dem Variantenkonstruktionsmodul Parametric. Dieses Parametric-Modul erlaubt die Variation von zwei- und dreidimensionalen Zeichnungen. Dabei werden geometrische Zusammenhänge graphisch erfaßt und brauchen nicht einprogrammiert zu werden. Das Parametric-System erzeugt aus einer gegebenen Geometrie durch Verschiebung von Koordinatenpunkten beliebige Varianten. Zur Überschreibung der Maße lassen sich auch Variablen, Funktionen und arithmetische Ausdrücke verwenden, wobei die Variablen vor der Variantenerstellung zu belegen sind. Beim direkten parametrischen Laden (Parametric Load) von mehreren Variantenelementen, wie zum Beispiel Boden, Bord und Mantel einer Trommelzentrifuge zu einer Gesamtkonstruktion, lassen sich die einzelnen Ladepositionen durch Zuweisung eines benannten Punktes in das Symbol übertragen. Diese Möglichkeit, Varianten zu erzeugen, besteht auch bei der Steuerung durch ein Programm mit Hilfe der Supersyntax, einer Programmiersprache in MEDUSA, die es erlaubt die Gesamtkonstruktion interaktiv durchzuführen.

Daraus ergeben sich die in **Bild 3** dargestellten Möglichkeiten zur Erstellung und Weiterleitung der graphischen Zeichnungsdaten.

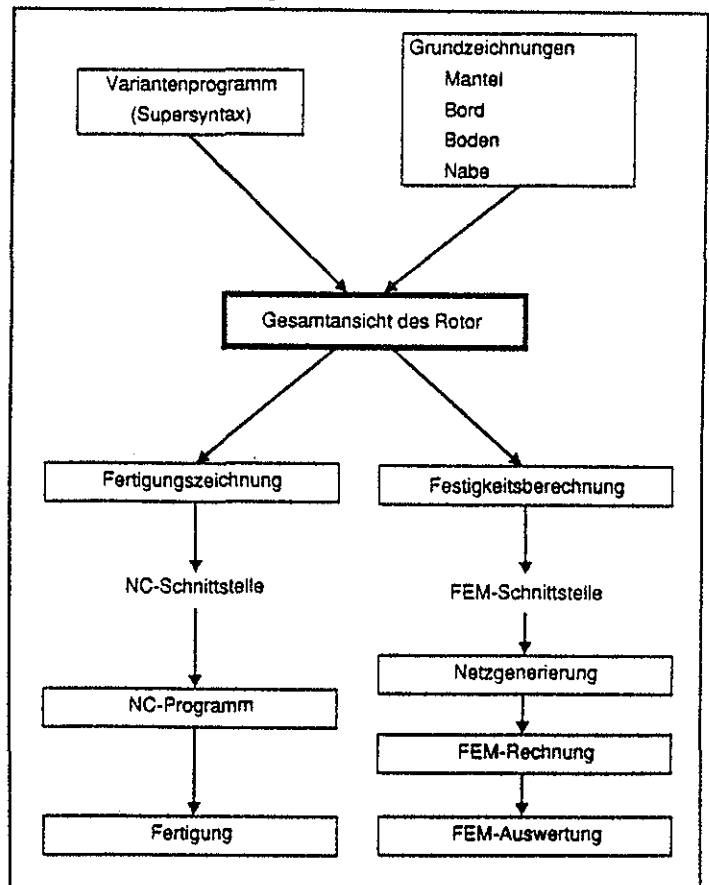


Bild 3: Erstellung einer Rotorzeichnung und Weiterleitung der Geometriedaten

2 Variantenkonstruktion eines Trommelrotors In 2D

Die Darstellung eines Rotors mit Schraffur und Maßen wird in vier Hauptprogrammen ausgeführt:

- im Programm DATEN werden die Rotorwerte eingelesen
- das Programm ZEICHNUNG bringt die Kontur auf die Zeichnung
- das Programm SCHRAFFUR schraffiert die Ansichten und
- das Programm MAßE bemaßt die wichtigsten Abmessungen des Rotors

Mit dem Programm DATEN wird der Ursprung der Darstellung ebenso abgefragt wie die Daten der Rotorteile. Die Werte für Mantel, Bord, Boden und Nabe werden durch Dialogabfrage eingegeben und im Variablenspeicher von MEDUSA festgehalten. Dabei ergibt sich auch die Möglichkeit die Rotordaten aus einem Auslegungsprogramm über eine Eingabedatei einzulesen.

Der Datenfluß ist in Bild 4 ersichtlich..

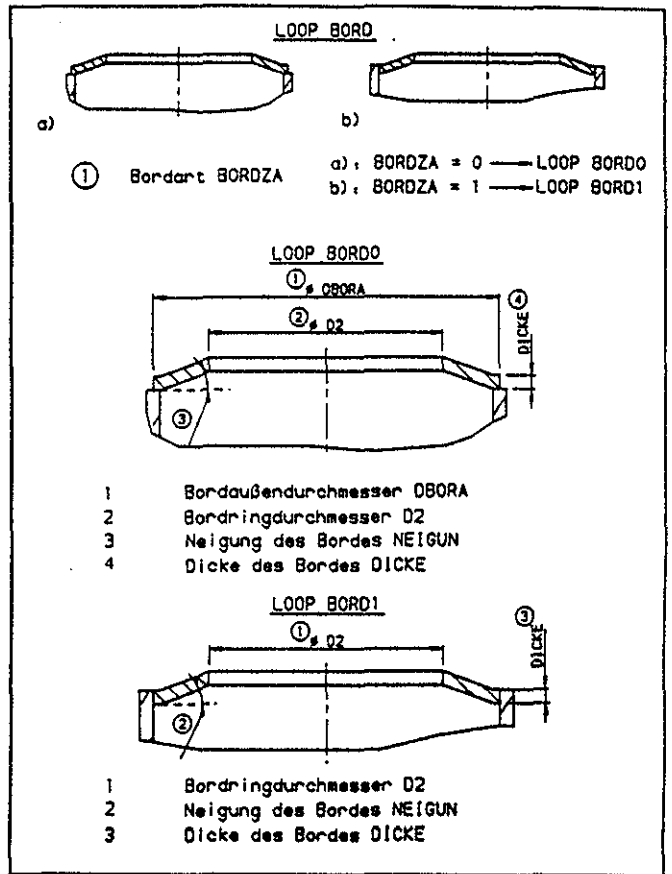


Bild 5: Datenblatt zur Eingabe, Bordwerte

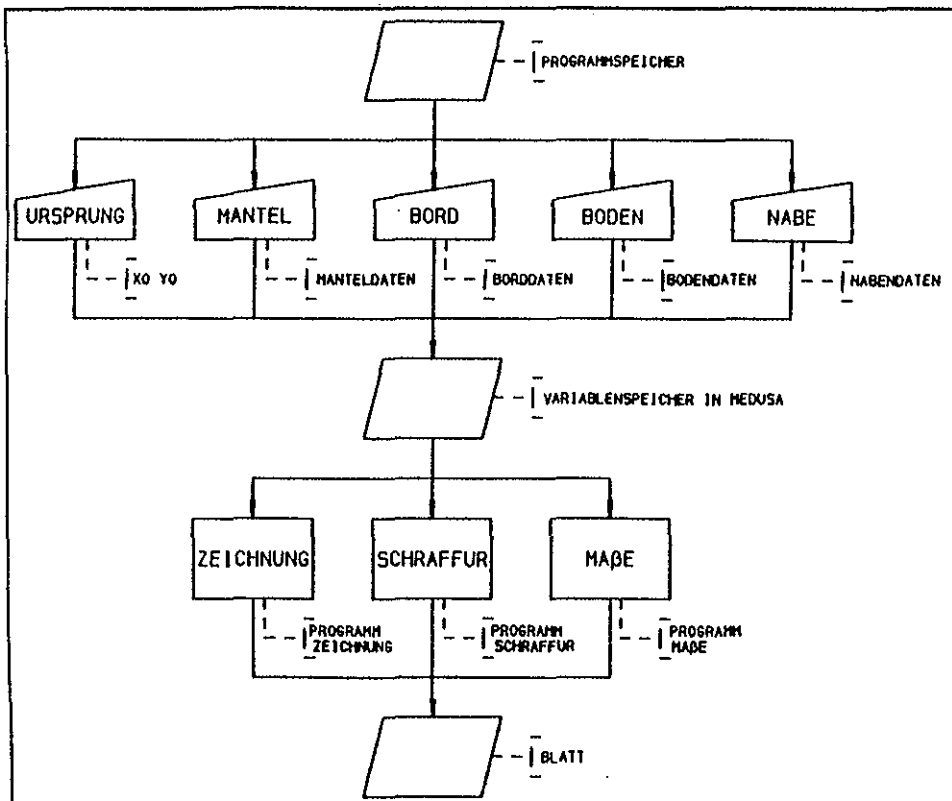


Bild 4: Datenflußplan zur Erstellung der 2D - Zeichnung

Die Bilder 5 und 6 zeigen Datenblätter für die Eingabe der eingelesenen Werte in das Programm DATEN.

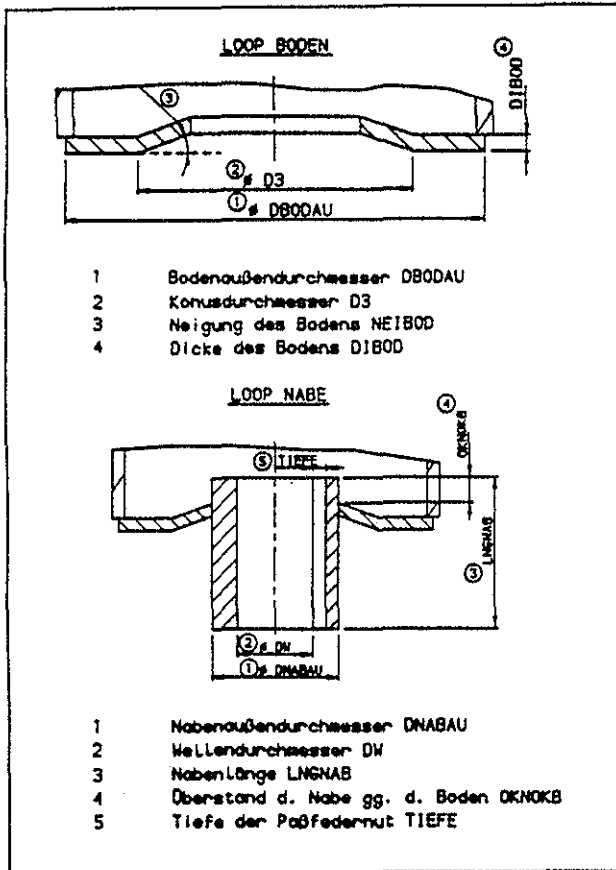


Bild 6: Datenblatt zur Eingabe; Boden- und Nabenwerte

3 Konstruktion eines Rotors in 3D

Mit MEDUSA 3D lassen sich auch dreidimensionale Objekte mit Hilfe der Variantenkonstruktion erzeugen und bearbeiten. Das MEDUSA 3D Modelling System besteht im wesentlichen aus zwei Programmen, dem Modeller und dem Viewer. Der Modeller interpretiert das Blatt mit den Ansichten und entwickelt daraus die dreidimensionale Variante, das Modell, welches nach der Erzeugung betrachtet werden kann. Der Viewer erstellt aus dem Modell die Ansichten des Objektes.

Ein drittes Programm, der Reconstructor, generiert aus den Ansichten zweidimensionale Zeichnungen und eine 3D-Abbildung und sorgt für die Abspeicherung auf der Zeichnung. Mit sogenannten Viewerkommandos kann der Anwender diverse Details der Ansichten variieren. Durch Boolesche Operationen lassen sich die Konstruktionsmöglichkeiten für komplexe Bauteile in MEDUSA 3D erweitern, z.B. zur Kombination mehrerer Einzelmodelle durch Addition oder Subtraktion.

In den Bildern 7 und 8 sind Beispiele für die Programmausführung gezeigt.

MEDUSA arbeitet die Einzelprogramme im Batchbetrieb ab, was zu relativ langen Wartezeiten am Bildschirm führt.

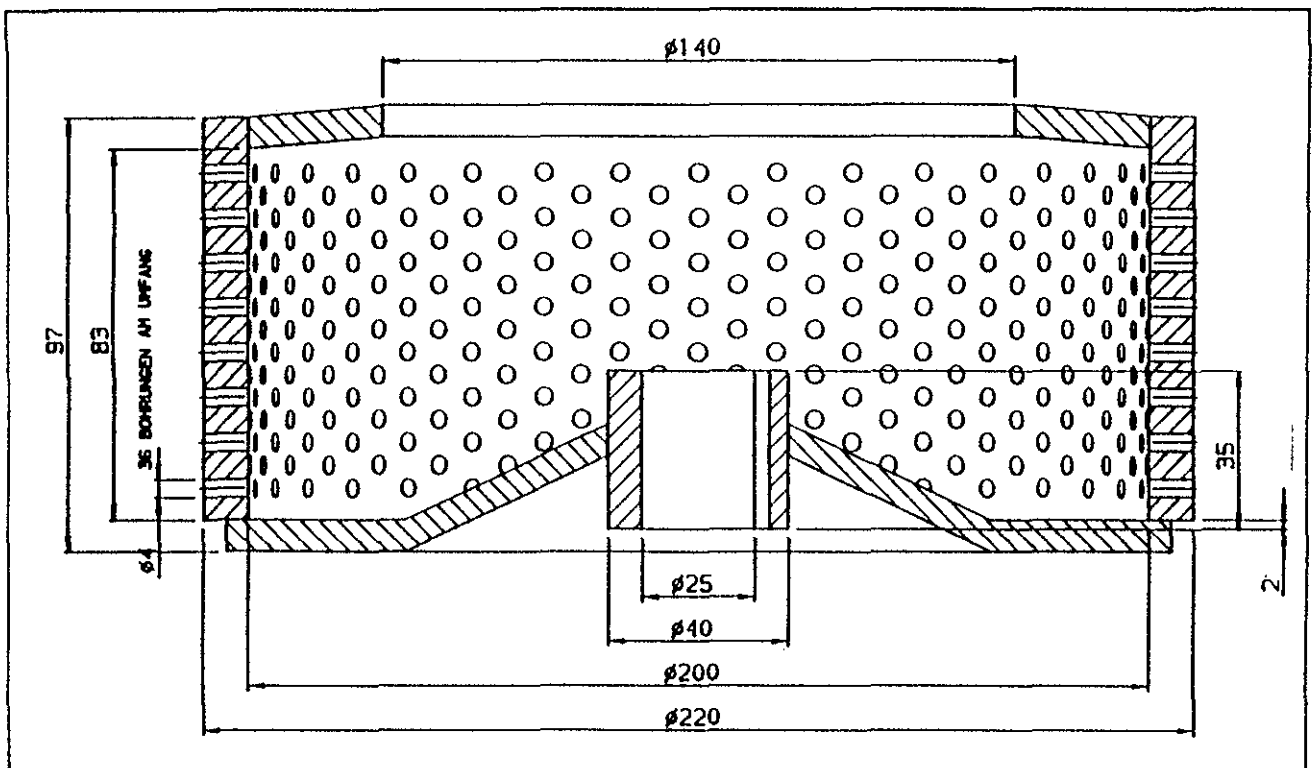


Bild 7: Beispiel 1 einer Zentrifugentrommelzeichnung

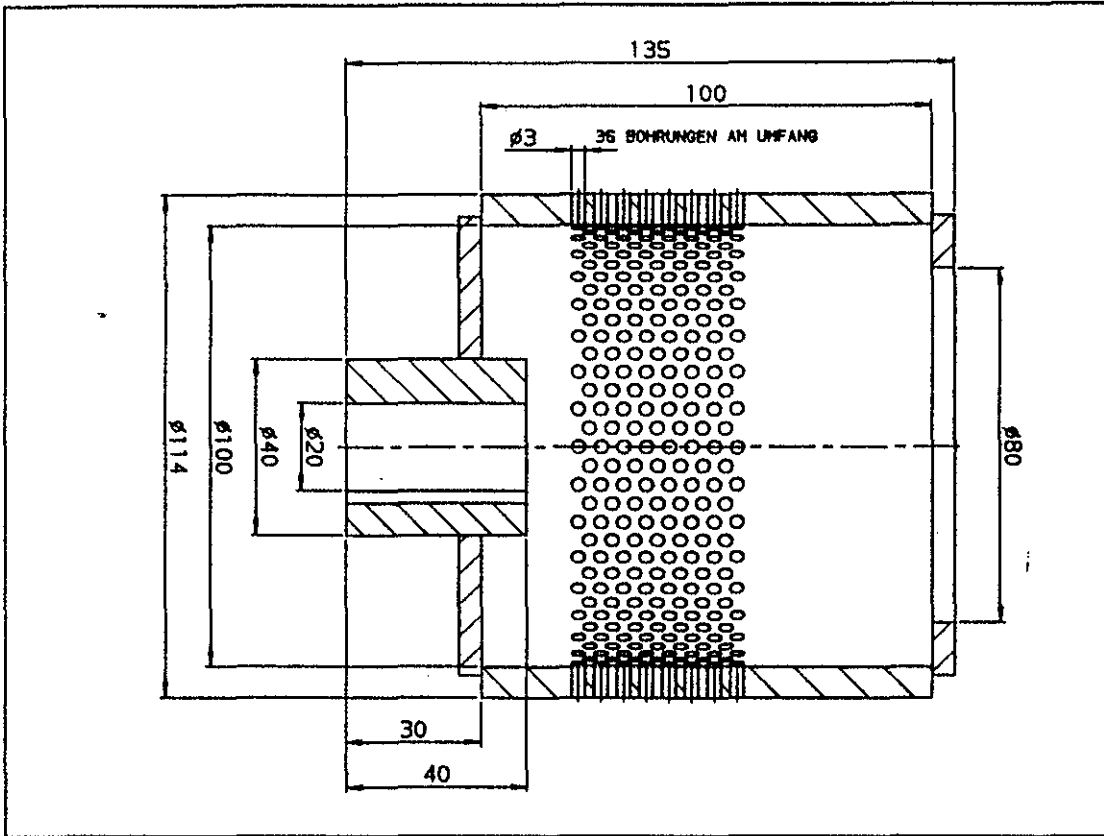


Bild 8: Beispiel 2 einer Zentrifugentrommelzeichnung

Geometrieinformationen wie zu Beispiel Volumen, Massenträgheitsmomente und Schwerpunkte abzuleiten.

Zur Darstellung eines Rotors in MEDUSA 3D werden drei Programme nacheinander aufgerufen:

- mit dem Programm DATEN3D werden die Rotorwerte eingelesen
- das Programm LOCHREIHE3D erzeugt einen Rotorstern, ein System von in einer Ebene gegeneinander verdrehten Rohren die später durch Boolesche Operationen die Durchbrüche im Rotormantel erzeugen.
- das Programm ROTOR3D erstellt die notwendigen Ansichten der Rotorkonstruktion

Der Datenfluß zur Erstellung der 3D-Ansichten ist im Bild 9 ersichtlich.

Nach dem Abarbeiten der Programme bestimmt der Anwender vor dem Start des 3D-Laufes die Art der Abbildung des Rotors mit VIEWER-Kommandos. Dabei können aus dem 3D-Modell alle 2D-Ansichten und Schnitte dargestellt werden. Neben der direkten Übertragung vom 3D-Modell in die 2D-Zeichnung besteht die Möglichkeit aus dem Modell alle

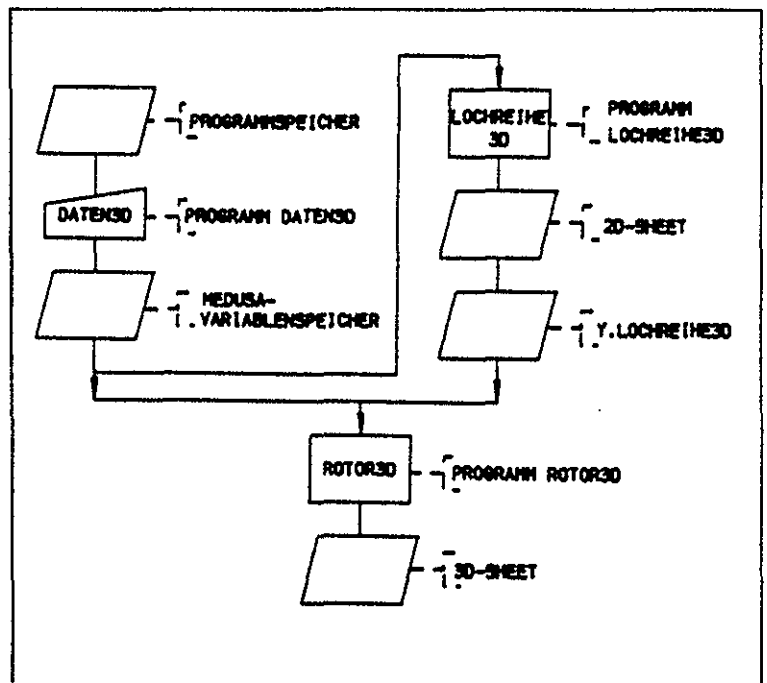


Bild 9: Datenfluß zur Erstellung der 3D-Ansichten

Bild 10 zeigt ein Beispiel für eine 3D-Programmausführung.

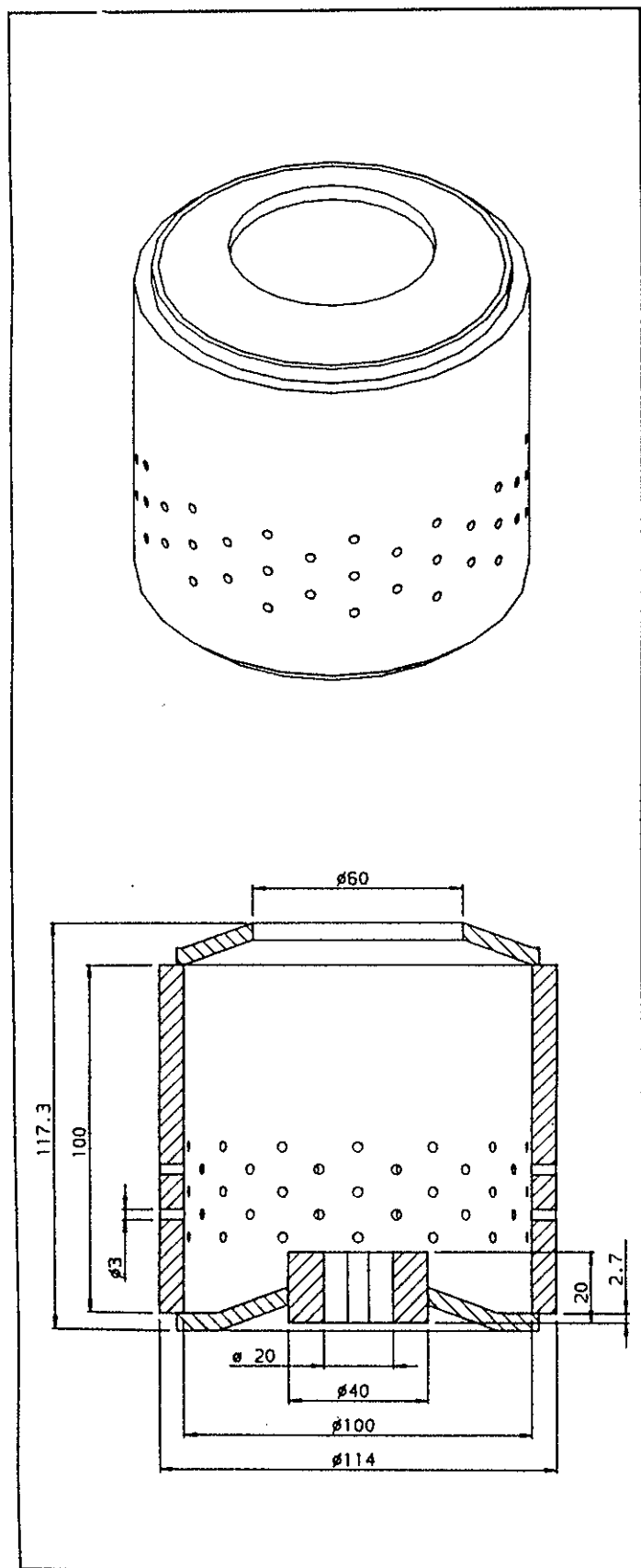


Bild 10: Beispiel einer 3D Anwendung mit Schnitt

4 Sinnvolle Weiterentwicklung eines Variantenprogramms für Rotorsysteme

In der am Beispiel einer Trommelzentrifuge dargestellten Vorgehensweise einer interaktiven Variantenkonstruktion wurde ein erster Ansatz zur wirtschaftlicheren Behandlung konstruktiver Probleme mit Hilfe von CAD vorgestellt.

Die wirtschaftliche Erstellung eines Variantenprogrammes hängt wesentlich von der Anzahl der nach Programmerstellung erstellten Varianten der Konstruktion ab.

Es wurde eine Methode erprobt, die erforderlichen Daten zur Konstruktion von Baukasten und Bau-reihensysteme durch eine Kombination von Gestaltungsabfragen im interaktiven Gesamtprozeß zu ermitteln.

Ein solches noch recht starr aufgebautes Variantenprogramm stellt noch nicht die für die konstruktive Anwendung optimale Lösung dar. In einem nächsten Schritt ist es erforderlich, daß die so konstruierten Rotore für den weiteren Entwicklungsprozeß angepaßt werden. Dabei sollten die Konstruktionsdaten der einzelnen Bauelemente für weitere Variationen in einer Datenbank festgehalten werden.

*

Entwicklung eines Umwälzaggregates für Gastemperaturen jenseits von 1000 Grad

S. Morgenroth

Inhalt:

- 1 Einleitung und Problemstellung
- 2 Vorstellung des Lösungskonzeptes
 - 2.1 Allgemeines
 - 2.2 Die Metallrückenscheibe
 - 2.3 Die Keramikschaufeln
 - 2.4 Ausblick

1 Einleitung und Problemstellung

In Industrieofenanlagen ist eine Gasumwälzung zur Temperaturvergleichmäßigung (Verbesserung der Produktqualität etc.) oder z.B. in der Verbrennungstechnik zur Zwangsförderung von heißen, aggressiven Gasen erforderlich. Die Gase können hierbei eine Temperatur von 800 °C bis zu 1300 °C erreichen und haben häufig merkliche Feststoffgehalte.[1] Bis zu Temperaturen von 1000 °C werden heute Lüfterräder in herkömmlicher Bauweise (Radiallüfter aus Blech geschweißt, siehe Bild 1) ohne Kühlung verwendet. Bei diesen Gastemperaturen kommen

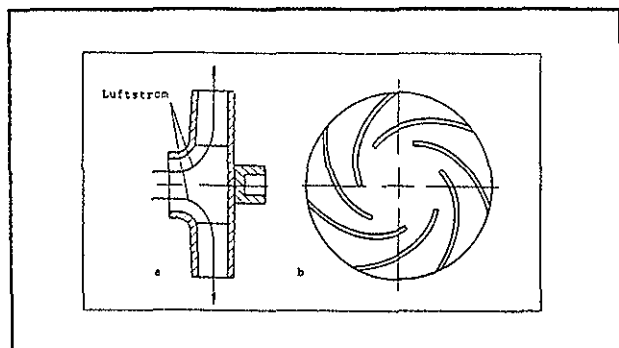


Bild 1: Radiallüfter

a) Meridianschnitt b) Ansicht ohne Deckscheibe [2]

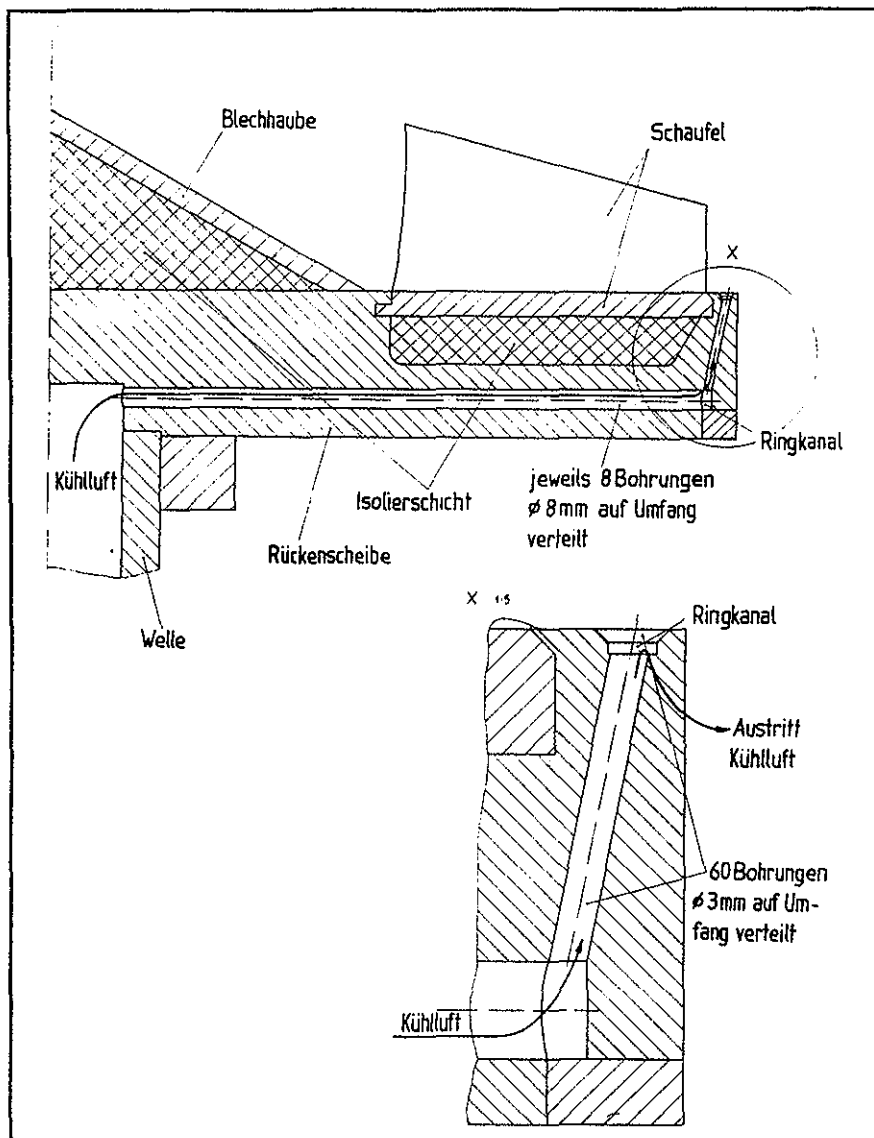


Bild 2: Prinzipdarstellung des Stahl- Keramik- Verbundrades

hochwarmfeste austenitische Stähle, aber auch Nickel- bzw. Kobaltbasislegierungen an ihre Grenze. Eine Dauerfestigkeit ist hier nur noch bei so geringen Beanspruchungen gegeben, daß die erzielbaren Drehzahlen zu keiner nennenswerten Druckerhöhung führen.

Der in Clausthal eingerichtete Sonderforschungsbereich 180 ("Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen bei besonderen mechanischen, thermischen oder chemischen Belastungen") befaßt sich im Projekt B3 mit "Heißgasumwälzung".

Die Problemstellung wurde folgendermaßen definiert: es wird ein Umwälzaggregat gesucht, das in der Lage ist, 5000 Nm³ 1250 °C heiße Ofengase

pro Stunde umzuwälzen. Es soll eine Druckerhöhung von $\Delta p = 13$ mbar erzielt werden.

Zu berücksichtigen ist die Zunahme der Zähigkeit von Luft um den Faktor 15 gegenüber dem Wert bei Zimmertemperatur sowie die Abnahme der Dichte von 1,2 auf $0,23 \text{ kg/m}^3$. [3] Ein nennenswerter Feststoffgehalt läßt einen erheblichen abrasiven Verschleiß erwarten.

Man versucht in diesem Forschungsprojekt mit Hilfe des Prinzips des systematischen Konstruierens neue Wege zur Bewältigung des Problems zu finden.

2. Vorstellung des Lösungskonzeptes

2.1 Allgemeines

Nach Erarbeitung von Anforderungsliste, Funktionsstruktur und morphologischen Kästen (letztere dienen zur systematischen Erarbeitung idealer Lösungen für die einzelnen Teilfunktionen des Gebildes "Umwälzaggregat") wurden die Teillösungen bewertet.

Es zeigte sich, daß ein Radiallüfter am ehesten die gestellten Anforderungen erfüllen kann. Das Rad müßte einen Durchmesser von 550 mm haben und bei einer Drehzahl von 3500 1/min betrieben werden. Dabei liegt auf der Hand, daß herkömmliche Konstruktionen nicht übernommen werden können. Die naheliegendste Lösung, ein komplett aus Metall gebautes, luft- oder wassergekühltes Rad, wurde nicht favorisiert. Abgesehen von dem erheblichen fertigungstechnischen Aufwand müßten die gasberührten Flächen auf mindestens $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ heruntergekühlt werden, um

selbst bei Verwendung hochwertigster Nickelbasislegierungen eine ausreichende Festigkeit zu gewährleisten. Die Differenztemperatur zwischen Gas und Rad betrüge demnach 200° , das Umwälzaggregat würde die Funktion eines Wärmetauschers übernehmen. Eine Abkühlung des zu fördernden Gasstromes ist unerwünscht.

Vielmehr entschied man sich für ein Metall-Keramik-Verbundrad. Eine luftgekühlte Metallscheibe dient als Festigkeitsträger. In ihm werden mit Hilfe zweier



Bild 3: Blick schräg von oben auf das Stahl-Keramik-Verbundrad

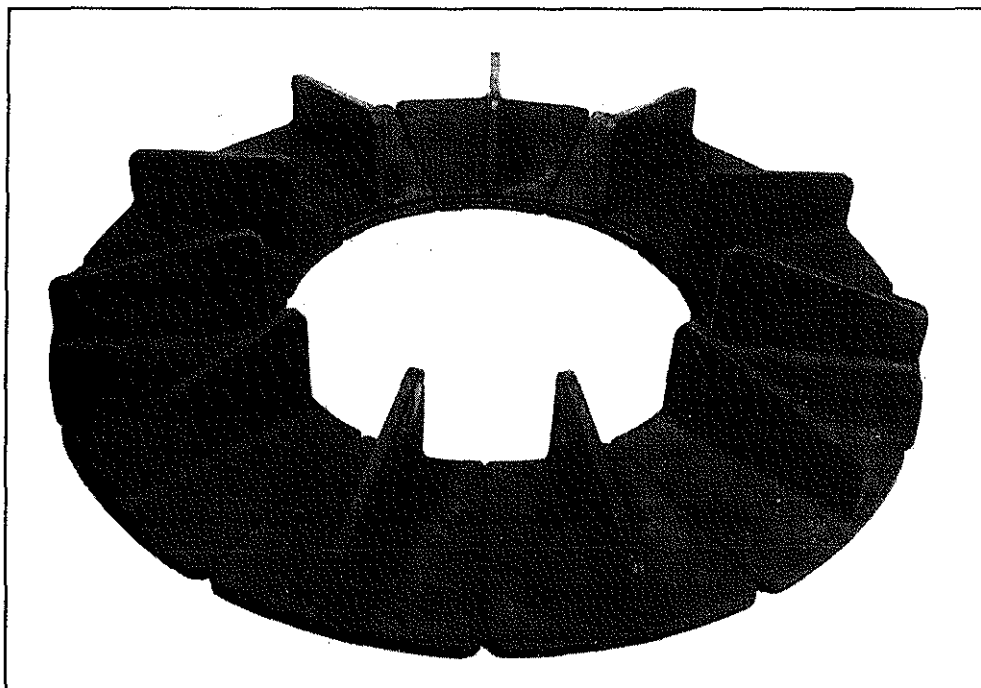


Bild 4: kompletter Schaufelsatz

umlaufender Nuten die Keramikschaufeln eingehängt. Diese Schaufeln bestehen aus einem Fußteil und der daran angegossenen Schaufel selbst. Zwischen Schaufel und Rückenscheibe befindet sich eine 20 mm starke Isolierschicht. Den Aufbau zeigen die Bilder 2 und 3. Wenn man alle Schaufeln zusammenlegt, ergibt sich ein kreisförmiges Gebilde (Bild 4). Die Konstruktion wurde so ausgeführt, daß das Gas nur an den Keramikschaufeln bzw. den keramischen Bodenplatten entlangstreicht und lediglich am Außenumfang des Lüfters die Metallkonstruktion an einer sehr kleinen Fläche berührt.

Industriekeramik hat den Vorteil, daß sie Temperaturen von mindestens 1300 °C ohne Festigkeits- einbuße ertragen kann. Eine Kühlung der einzelnen Schaufeln erübrigt sich dem nach. Als weiterer Vorteil ist die hohe chemische und mechanische Beständigkeit zu nennen. Abrasiver Verschleiß durch vom Gas mitgeführte Feststoffpartikel wird nicht erwartet. Andererseits hat dieser Werkstoff eine ganze Reihe von Nachteilen aufzuweisen, die bei der Konstruktion zu berücksichtigen sind:

- Aufgrund des prinzipiell anderen Molekülaufbaues ist ein plastisches Fließen des Werkstoffes an Stellen örtlicher Überbeanspruchung unmöglich. Das Bauteil versagt an dieser Stelle sofort, weil Keramik ideal- spröde ist.
- Wegen der Sprödigkeit sind scharfe Kanten und Querschnittsübergänge unbedingt zu vermeiden.
- Zugbeanspruchungen sind zu vermeiden. Dagegen ist Keramik gut auf Druck beanspruchbar.
- Bei Keramik- Metall- Verbundkonstruktionen ist der unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizient zu beachten. Je nach verwendeter Materialpaarung kann sich das Metall bis zu 10 mal mehr ausdehnen als die Keramik.
- Die Bauteilgröße ist beschränkt. Die Bauteillänge sollte bei schlickergegossenen Teilen aus Gründen der Materialhomogenität 150 bis 350 mm (je nach Material) nicht überschreiten.
- Bei der Formgestaltung ist auf den Herstellungsprozeß Rücksicht zu nehmen. Einige Hersteller bestehen auf gleichen Wanddicken im gesamten Bauteil, z.T. wird aber auch eine kontinuierliche Wanddickenabnahme verlangt, um beim

Schlickerguß eine gleichmäßige Materialverteilung in der Form zu ermöglichen und die zum Ausformen nötigen Aushebeschrägen zu bekommen.

- Ein nachträgliches Bearbeiten des fertig gebrannten Bauteils ist nur durch Schleifen (im allgemeinen mit Diamantwerkzeugen) möglich. Dieser Prozeß ist entsprechend teuer und daher auf ein Minimum zu beschränken.
- Im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen, bei denen eine Mindestzugfestigkeit vom Hersteller garantiert wird, muß man hier mit Hilfe von statistischen Lebensdauerausagen Dimensionierungen vornehmen. Das liegt an dem sehr spröden Werkstoff und den komplizierten und teuren Prüfverfahren, die dazu dienen, Herstellungs- oder Materialfehler (Lunker, nicht reagierte Keramik, Risse, Entmischungen ect.) zu erkennen.

In der Praxis bedeutet das, daß man Sicherheiten von etwa 10 zu berücksichtigen hat, wenn man nach dem "Save Life- Prinzip" konstruiert. [4,5]

2.2 Die Metallrückenscheibe

Aus Bild 2 entnimmt man, daß die einteilige, kreisförmige Scheibe mit Luft gekühlt wird. Man erkennt in Bild 3 am Außenrand des Rades die Austrittsöffnungen der Kühlluft. Diese Kühlluft wird in die Welle über eine Dreheinführung eingeleitet. Durch 8 radial verlaufende Bohrungen (\varnothing 8 mm) strömt sie einem Ringkanal zu, der die Luft gleichmäßig über den Umfang verteilen soll. Über 60 nahezu axial verlaufende Bohrungen (\varnothing 3 mm) gelangt das Kühlmedium in einen zweiten Ringkanal, um schließlich über 60 weitere Bohrungen (\varnothing 3 mm) aus dem Rad in die Ofenatmosphäre auszutreten.

Da das Rad zunächst in einer Versuchsanlage eingesetzt werden soll und der Kühlluftstrom ($22 \text{ Nm}^3/\text{h}$) sehr klein im Verhältnis zum Heißgasstrom ist, erschien es akzeptabel, beide Medien zu mischen und damit die Konstruktion erheblich zu vereinfachen. Ziel der Versuche ist zunächst die Erprobung verschiedener Keramikkomponenten bei hohen Temperaturen und nicht die Optimierung der Prozeßführung in der Versuchsanlage.

Ursprünglich war geplant, die Rückenscheibe aus einer Nickelbasislegierung zu bauen. Da diese aber nur im Feingußverfahren sinnvoll herzustellen gewesen wäre und außerdem eine spanabhebende Bearbeitung dieser Werkstoffe sehr kompliziert ist, ging man auf eine sehr viel preisgünstigere Möglichkeit über. Die Scheibe besteht aus einem hochwarmfesten, austenitischen Stahl (1.4841), der 26 Gew.-% Chrom und 20 Gew.-% Nickel enthält. Dieser Werkstoff zeichnet sich durch sehr gute Schweißbarkeit und eine hohe Zunderbeständigkeit aus, neigt aber zwischen 600 und 700 °C zur Versprödung.

Trotz Luftkühlung wird man Gastemperaturen von 900 °C bei der Nenndrehzahl von 3500 1/min nicht überschreiten können, weil die Zeitstandfestigkeit geringer ist als die der ursprünglich vorgesehenen Nickelbasislegierung.

Die Bilder 5 und 6 zeigen die mit Hilfe des Finite-Element- Programmes ASKA 8.0 errechneten Temperaturen in der Gesamtkonstruktion. Als Gastemperatur wurden 1250 °C bzw. 900 °C und als Kühlluftstrom 22 Nm³/h angenommen.

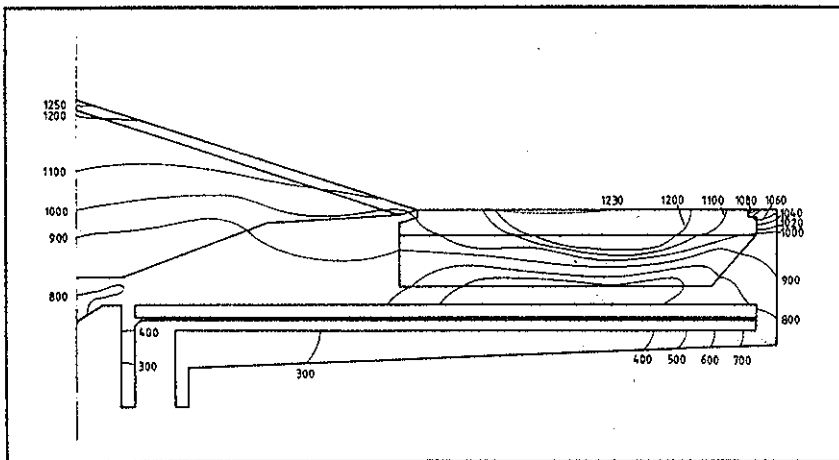


Bild 5: Temperaturen im Rad bei Förderung von 1250 °C heißem Gas (Kühlluftmenge 22 Nm³/h)

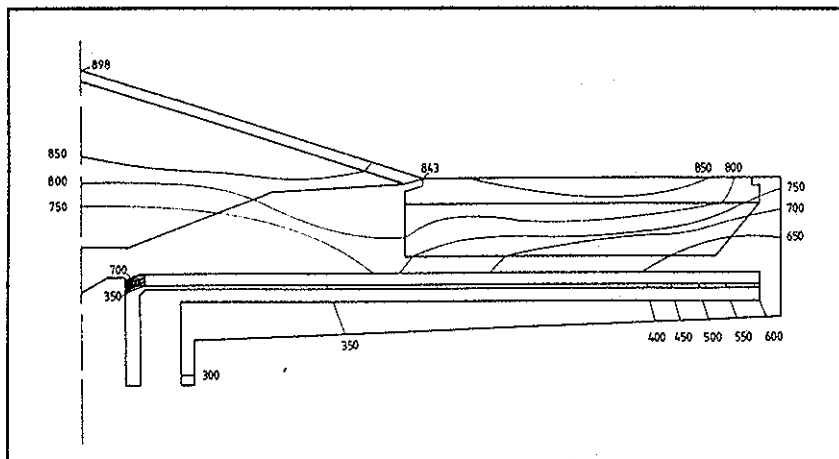


Bild 6: Temperaturen im Rad bei Förderung von 900 °C heißem Gas (Kühlluftmenge 22 Nm³/h)

Die Konstruktion der Rückenscheibe wurde so ausgeführt, daß verschiedenartige Schaufeln eingesetzt werden können.

2.3 Die Keramikschaufeln

Da ein Auswechseln der Keramikschaufeln sehr einfach möglich ist, gestattet das Rad den Einbau von ganz verschiedenartigen Schaufeln. Die Anzahl, die Schaufelform sowie der Werkstoff sind frei wählbar. Lediglich der Innen- und der Außendurchmesser ($D_1 = 275$ mm, $D_2 = 550$ mm) sowie die Breite der Schaufel ($b_1 = 26$ mm, $b_2 = 34$ mm) müssen gleich gehalten werden. Theoretisch wäre die Schaufelbreite auch variierbar, doch hätte dies bei jeder neuen Schaufelform die Anfertigung eines ganz neuen Lüftergehäuses aus Schamotte zur Bedingung. Bislang wurden zwei Arten von Schaufeln entwickelt:

Version 1:

Eintrittswinkel b_1	= 33°
Austrittswinkel b_2	= 50°
Schaufelzahl z	= 18

Diese Schaufeln bestehen aus RBSN (Reaktionsgesintertes Silicium-Nitrid). Dieser Werkstoff besitzt einen geringen Elastizitätsmodul ($E = 165000$ N/mm²) und eine geringe Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 4.5 \cdot 10^{-6}$ 1/K. Das Bild 7 zeigt eine Schaufel aus RBSN sowie eine 10-Pfennig Münze davor als Größenvergleich. Die Bilder 8 und 9 stellen die Ergebnisse der Finite-Element-Rechnung sowie des durchgeführten spannungsoptischen Einfrierversuches dar, die die Fliehkraftbeanspruchung dieses Bauteiles ermitteln sollten. Die in Bild 8 dargestellten Graphen sind Linien gleicher Hauptspannung. Die Maßeinheit ist N/mm². In Bild 9 schaut man von der Seite auf die Araldit-Schaukel. Man erkennt helle und dunkle Linien. Auch sie stellen Orte gleicher Hauptspannungsdifferenz dar.

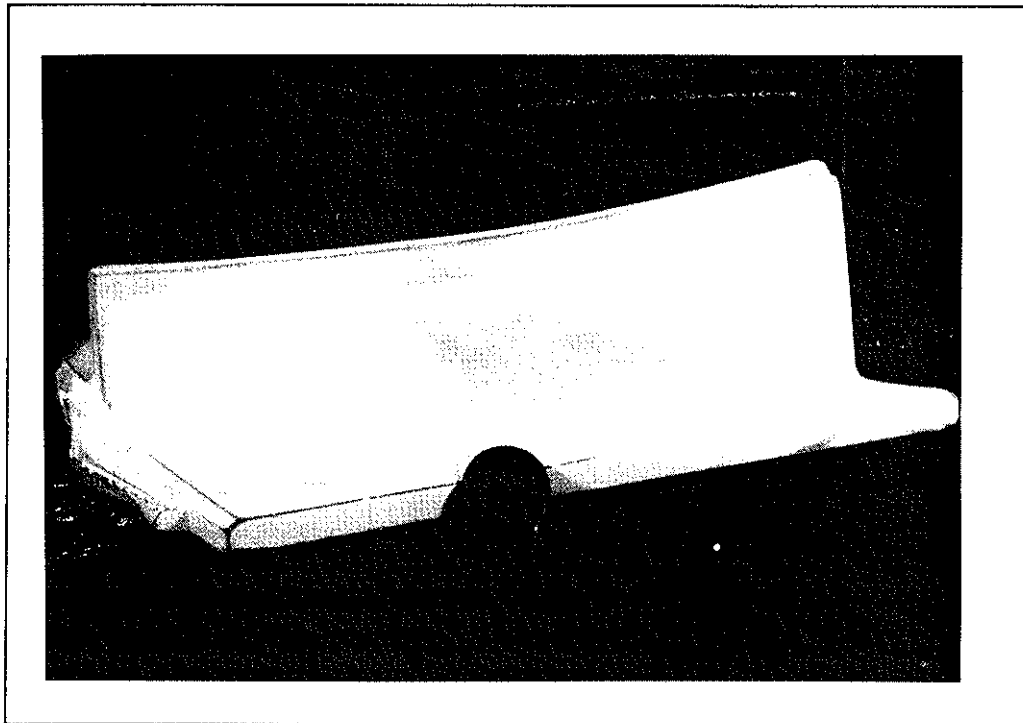


Bild 7: Schaufel (Version 1) aus RBSN

aufgrund von Materialfehlern. Die bis dahin aufgezeichneten Meßwerte zeigen gute Übereinstimmung mit der FE-Rechnung und dem spannungsoptischen Versuch. Die drei Ergebnisse weichen um maximal 12 % voneinander ab. Die höchstbeanspruchte Stelle der Schaufel ist auf Bild 8 gut zu erkennen. Bei Nenndrehzahl ($n=3500$ 1/min) wird an der Innenseite der Schaufel am Übergang

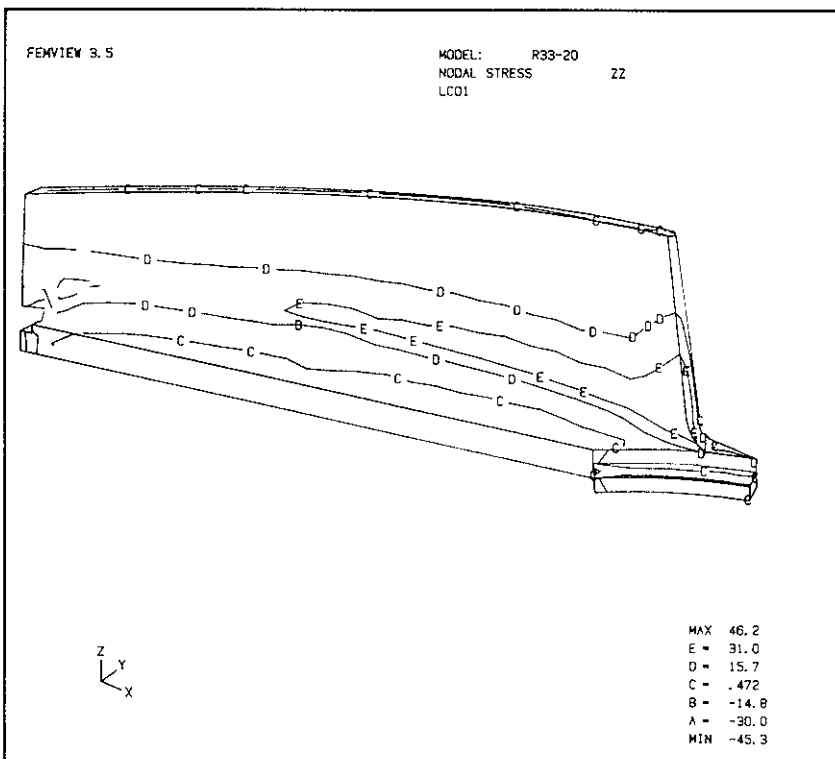


Bild 8: Ergebnisse der FE-Rechnung: Darstellung der maximalen Zugspannungen [N/mm²]

Schaufel-Fuß eine maximale Zugspannung von etwa 46 N/mm² erreicht.

Version 2:

Sie ist gekennzeichnet durch folgende Daten:

- Eintrittswinkel $b_1 = 90^\circ$
- Austrittswinkel $b_2 = 90^\circ$
- Schaufelzahl $z = 11$

Diese Schaufeln bestehen aus silizium-infiltriertem Silizium-Karbid (SiSiC).

SiSiC zeichnet sich durch einen sehr hohen Elastizitätsmodul (380000 N/mm²) und eine Wärmeleitfähigkeit von 120 W/(m²K) (bei Raumtemperatur) aus. Die Wärmeleitung ist somit etwa 27 mal so groß wie die von RBSN und mehr als vier mal so groß wie die von Stahl. Dieser Werkstoff gilt als

einer der härtesten überhaupt.

Die auf den Bildern 3 und 4 dargestellten Schaufeln gehören zur Version 2.

Zwei der gelieferten Keramik-Schaufeln wurden auf eine Metallplatte geschraubt und mit insgesamt 8 Dehnungsmeßstreifen beklebt. Auf dem institutseigenen Fliehkraftprüfstand wurde die Platte geschleudert. Bedauerlicherweise versagten die beiden Schaufeln bei einer Drehzahl von etwa 2400 1/min

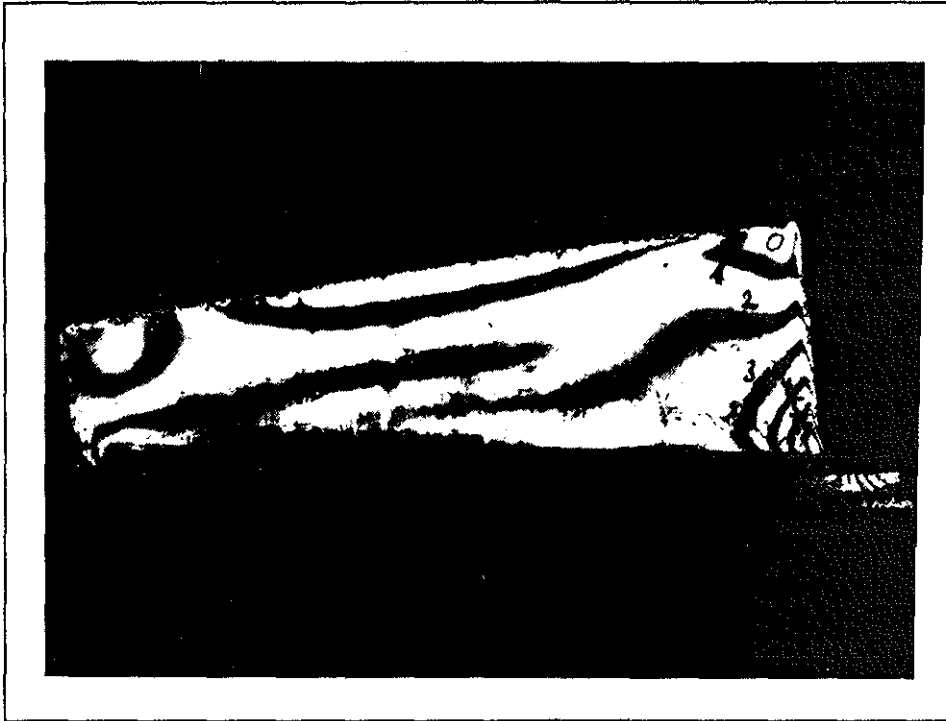


Bild 9: Isochromaten (Blick von der Seite auf die Araldit-Schaufel)

2.4 Ausblick

Mit den beiden Schaufelversionen, die sich von der Form und vom Werkstoff her sehr stark unterscheiden, sollen in den nächsten Wochen und Monaten erste Versuche unternommen werden.

Zunächst wird ein komplettes Rad (mit Isolierung und einem Satz Schaufeln) mit mehreren Thermoelementen versehen werden. Man plant Temperaturmessungen am Rad, um die FE- Wärmerechnungen zu verifizieren. Sie sollen in der Versuchsofenanlage des Institutes für Energieverfahrenstechnik durchgeführt werden. Dort kann man den Lüfter unter realen Betriebsbedingungen bei verschiedenen Drehzahlen und Gastemperaturen betreiben.

*

Literatur:

- [1] o. V.: Sonderforschungsbereich 0180, Arbeitsbericht der Vorförderungsphase 1986 und 1987; Clausthal, 1987
- [2] Bock, U.: Konstruktive und schwingungstechnische Auslegung eines vollkeramischen Radiallüfters; Diplomarbeit, TU Clausthal 1988
- [3] o. V.: VDI- Wärmeatlas, 4. Auflage; Düsseldorf 1984
- [4] Salmang, H., Scholze, H.: Keramische Werkstoffe, 6. Auflage; Berlin, Heidelberg, New York 1986
- [5] Willmann, G.: Konstruieren mit Keramik- Herstellung und Maßhaltigkeit ohne Nachbearbeitung, Fachberichte für Metallbearbeitung, Vol.118, No. 4; 1985
- [6] Bock, Uwe: Festigkeitsmäßige Optimierung der Schaufelkonstruktion eines Radiallüfters; Studienarbeit, TU Clausthal, 1987

Näherungsweise Berechnung der durch aufgezwungene Verschiebungen belasteten Kreisringplatte mit großen Deformationen

J. Ebert
Tan, Li

Inhalt: Es wird eine Lösung für die Kreislochplatte unter aufgezwungenen großen Deformationen hergeleitet. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit einer geometrischen nichtlinearen FE-Rechnung.

Anwendung: Ermittlung der Beanspruchungen von Membrankupplungen, die zum Ausgleich von Axial-, Winkelversatz und Fluchtfehlern in Antriebssträngen dienen.

Die Theorie der linearen Plattenbiegung nach Kirchhoff setzt Durchsenkungen der Platte w voraus, die klein sind im Vergleich zur Plattendicke t | S. 179 ff. Durchsenkungen größer der Plattendicke t treten in der Praxis beispielsweise bei Membrankupplungen auf, die eingesetzt werden, um einen axialen Ausgleich zwischen den Wellen zweier Maschinen zu ermöglichen.

Im Falle großer Deformationen wird die Belastung sowohl durch Querkraftbiegung als auch durch einen Membranspannungszustand aufgenommen, was nach von Kármán die Lösung nunmehr zweier gekoppelter nichtlinearer Differentialgleichungen erfordert | 2 | S. 88 :

$$k\Delta\Delta w = p_z + t \cdot \left(\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (1)$$

$$\Delta\Delta F = E \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \quad (2)$$

mit p_z einer Querbelastung je Flächeneinheit und der bekannten Plattensteifigkeit.

$$k = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

Die Lösung dieser beiden gekoppelten Differentialgleichungen gelingt nur näherungsweise | 2 | S. 89 beispielsweise mit einem Verfahren nach Bubnow - Galerkin, die die Durchbiegungsfunktion als Reihe darstellen :

$$w \approx \bar{w} = \sum_{k=1}^n f_k \bar{w}_k(x, y) \quad (3)$$

wobei $\bar{w}_k(x, y)$ voneinander unabhängige Funktionen sind, die allerdings alle Randbedingungen der Platte erfüllen müssen.

Man setzt nun die genäherte Spannungsfunktion \bar{F} und die Durchbiegungsfunktion \bar{w} in (1) ein und erhält:

$$L_1 = p_z + h \left(\bar{F}_{xx} \bar{w}_{xx} + \bar{F}_{yy} \bar{w}_{yy} - 2 \bar{F}_{xy} \bar{w}_{xy} \right) - k\Delta\Delta \bar{w} \quad (4)$$

Integriert über die Fläche müssen die Gleichungen die Galerkinbedingung :

$$\int_{(A)} L_1 \bar{w}_k dA = 0 \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

erfüllen, was die Aufstellung von n Gleichungen für die n Parameter f_k ermöglicht.

Membrankupplungen sind zumeist rotationssymmetrisch, so daß eine Polarkoordinatendarstellung der Gleichungen (1) und (2) erforderlich ist | 2 | S. 133

$$k\Delta\Delta w = p_z + \frac{t}{r} (w_r F_r)_r \quad (6)$$

$$\Delta\Delta F = - \frac{E}{2r} \left[(w_r)^2 \right]_r \quad (7)$$

Den Verfassern ist keine Lösung der Kreislochplatte unter aufgezwungenen Verschiebungen bekannt, so daß die Lösung von (6) und (7) mit einem eingliedrigeren Näherungsansatz selbst gesucht wurde :

$$\bar{w} = w \left(A + B \ln \frac{r}{b} - A \frac{r^2}{b^2} + D \frac{r^2}{b^2} \ln \frac{r}{b} \right) \quad (8)$$

der die Randbedingungen :

$$\begin{aligned} w(r=a) &= w \\ w(r=b) &= 0 \\ w_r(r=b) &= 0 \end{aligned}$$

erfüllt und die Konstanten :

$$A = - \frac{2 \frac{a^2}{b} \ln \frac{a}{b} + \frac{a^2}{b^2} - 1}{\left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right)^2 - 4 \frac{a^2}{b^2} \ln^2 \frac{a}{b}} \quad (9)$$

$$B = - \frac{4 \frac{a^2}{b^2} \ln \frac{a}{b}}{\left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)^2 - 4 \frac{a^2}{b^2} \ln^2 \frac{a}{b}} \quad (10)$$

$$D = - \frac{Pb^2}{8\pi kw} = \frac{2 \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{\left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)^2 - 4 \frac{a^2}{b^2} \ln^2 \frac{a}{b}} \quad (11)$$

liefert. Durch Integration von (7) unter Einbeziehung der Endlichkeitsbedingung erhält man :

$$\left[\frac{1}{r} (r \bar{F}_r) \right]_r = - \frac{E}{2r} (\bar{w}_r)^2 \quad (12)$$

(12) liefert durch zweimalige Integration die genäher- te erste Differentiation der Spannungsfunktion \bar{F}_r . Die fehlenden Konstanten können aus den Rand- bedingungen :

$$u = r \cdot \varepsilon_\varphi = \frac{r}{E} (\sigma_\varphi - \nu \sigma_r) \quad (13)$$

$$u(r=a)=0 ; u(r=b)=0$$

leicht ermittelt werden.

Somit lassen sich die Membranspannungen :

$$\bar{\sigma}_r = \frac{1}{r} \cdot \frac{d\bar{F}}{dr} \quad (14)$$

und
$$\bar{\sigma}_\varphi = \frac{d^2 \bar{F}}{dr^2} \cdot \bar{F} \quad (15)$$

leicht angeben. Die Biegespannungen erhält man aus den bekannten Plattenbeziehungen :

$$\bar{m}_r = -k \left(\bar{w}_{rr} + \frac{\nu}{r} \bar{w}_r \right) \quad (16)$$

und
$$\bar{m}_\varphi = -k \left(\frac{1}{r} \bar{w}_r + \nu \bar{w}_{rr} \right) \quad (17)$$

Bild 1 zeigt den Vergleich einer nichtlinearen FEM Rechnung mit Hilfe des Programmes SOLVIA mit der hier aufgeführten Näherungslösung. Die SOLVIA - Lösung weicht ausschließlich in den Randpunkten von der analytischen Lösung ab - die analytische Lösung liegt leicht auf der sicheren Seite.

Die hier dargestellte Theorie kann leicht unter Verwendung programmierbarer Taschenrechner auf Platten veränderlicher Querschnittsabmessungen erweitert werden.

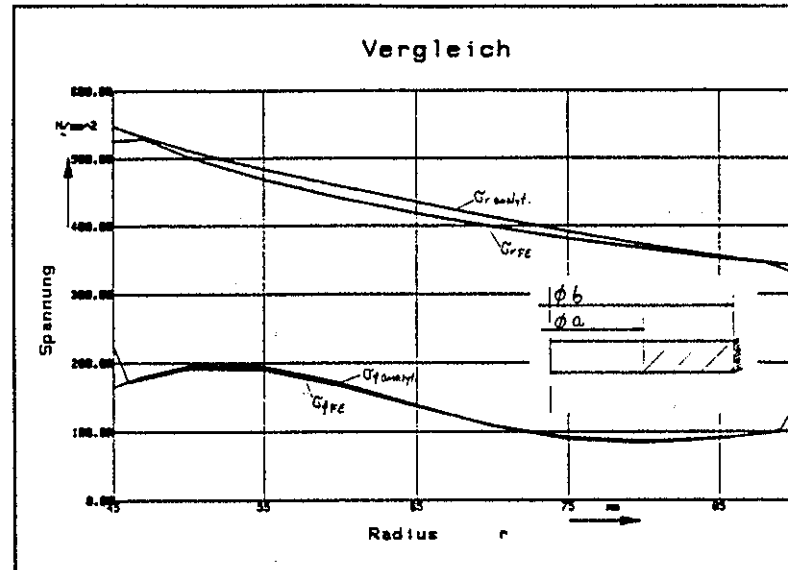


Bild 1: Membranspannungen der gelochten Kreisringplatte unter aufgezogenen Verschiebungen und großen Deformationen im Vergleich mit einer nichtlinearen FEM - Lösung für eine Durchsenkung $w = 2.5$ mm. ($a = 45$ mm ; $b = 90$ mm ; $t = 2.5$ mm ; $E = 210000$ N/mm² ; $\nu = 0.3$)

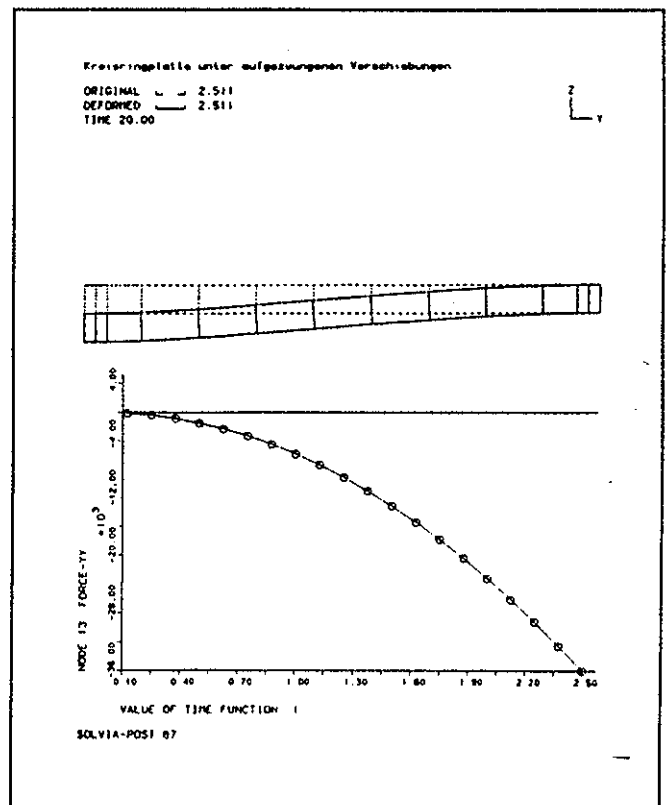


Bild 2: Verwendetes FE - Netz bestehend aus 13 achsensymmetrischen Elementen mit quadratischem Ansatz. (Lasten und Geometrie siehe Bild 1)

Literatur

[1] Szabo, Istvan Höhere Technische Mechanik 5. Auflage Springer 1977
 [2] Göldner, H. Arbeitsbuch Höhere Festigkeitslehre VEB Fachbuchverlag Leipzig 1981.

Ausgewählte Probleme der Dynamik der Kräne

Prof. A. Siemieniec
St. Wolny

Summary

The attention has been taken in this work that it is necessary to apply the other point of view in the subject of determination the dynamic lifting force of travelling cranes in operation. The dynamic analysis of a travelling crane passing on a beam with velocity V_s and concurrent operation of lifting gear has been presented as an example. Analytical equations for crane bridge deformation are given with simplifying assumptions taken on account. Limitation of this deformation to the permissible value may be a basis for determination the value of lifting dynamic force with allowance for the most serious parameters of the system.

1 Einleitung

Die aufgrund der Norm [2] berechnete dynamische Hubkraft betrachtet die Kräne komplexweise je nach deren Tragfähigkeit und Hubgeschwindigkeit. Es zeigt sich jedoch, daß einige Parameter wie Hubhöhe, Gewicht der Laufkatze und die Hubgeschwindigkeit genauer betrachtet werden müssen [3]. Um die dynamische Hubkraft unter Berücksichtigung von wichtigen Parametern der Anordnung wie Kran und Laufkatze zu berechnen, wurde die zu hebende Last auf dem theoretischen Weg und die Dynamik dieser Anordnung in verschiedenen Phasen des Betriebs betrachtet. Die im Ergebnis dieser Analyse in analytischer Form erhaltenen Formeln für Verformung der Trag-elemente des Krans bzw der Krananlage als Funktion der Konstruktions- und Betriebsparameter des Krans sowie auch des Kranbahnträgers dienen zur Ableitung einer Formel. Sie soll die den Wert der dynamischen Hubkraft unter Berücksichtigung der wesentlichen Parameter der Anordnung bestimmen. Die Beschränkung der dynamischen Verformung des Kranbahnträgers hat gestattet, seine Parameter, d.i. Elastizitätsfaktor und Dämpfungsfaktor unter Beachtung von Dauerermüdungsfestigkeit des Trägers

richtig zu wählen. Analysiert wurde die Belastung des Krans in den folgenden Betriebsphasen:

1. instationäres Heben
2. instationäre Fahrt der Laufkatze
3. Überfahrt des Krans über den Träger mit Geschwindigkeit v_s
4. Überfahrt des Krans über eine kleine sprungförmige Unebenheit.

In dem vorliegenden Beitrag wird in einer gekürzten Form die dynamische Analyse des Kranbetriebs vorgestellt, nämlich für den Fall, in dem der Kran mit der Geschwindigkeit v_s über den Träger fährt.

2 Fahrt des Krans über den Träger mit der Geschwindigkeit v_s

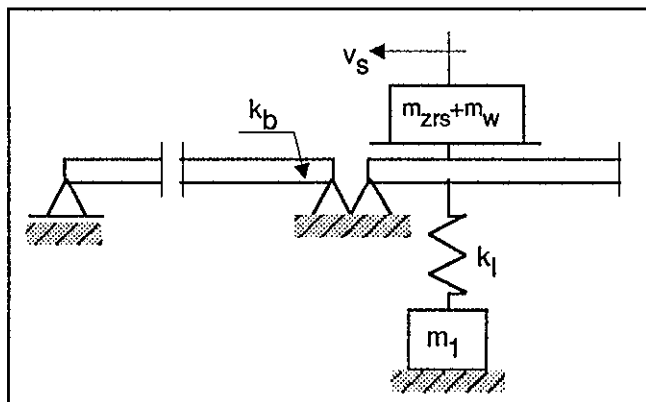


Bild 1: mech. Ersatzschaltbild der behandelten Krananlage

Das mech. Ersatzschaltbild der Krananlage vor der Überfahrt des Krans über den Träger wird in Bild 1 dargestellt. Die aufgehobene Last befindet sich auf der Säule. Erzwungene Schwingungen der Anordnung des Systems werden bei Überfahrt des Krans über den Träger mit Geschwindigkeit v_s und durch Schwingungen der am Seil aufgehängten und hoch gerissenen Last erzeugt.

Die Kraft im Seil beim Aufheben der Last auf der Säule ergibt sich zu [1]:

$$P_1 = Q_1 + k_1 \cdot y_1 = Q_1 + k_1 \frac{V_0}{\omega_2} \sin \omega_2 t \quad (1)$$

es gilt:

- P_1 - Kraft im Seil beim Aufheben der Last
- k_1 - Elastizitätsfaktor des Seiles für den Fall, wenn der Kran durch den Träger fährt
- V_0 - Hubgeschwindigkeit /Heben der Last/
- ω_2 - Schwingungsfrequenz beim Aufheben
- Q_1 - gehobene Last

Diese Kraft wird auf zwei Laufräder mit einem Abstand l_c zerlegt. Auf ein Rad fällt auch eine Hälfte des Gewichts der Laufkatze und 1/4 des Gewichts der Kranbrücke.

Die äußere anregende Kraft wird also betragen:

$$P_w = \frac{2Q_1 + 2Q_w + Q_m}{4} \sin \omega_0 t + \frac{k_1 \cdot V_0}{2\omega_0} \sin \omega_2 t \sin \omega_0 t \quad (2)$$

es gilt:

- P_w - Kraft, die die Schwingungen der Anordnung des Systems für den Fall erzwingt, in dem der Kran den Träger mit der Geschwindigkeit v_s überfährt.
- ω_0 - Frequenz der äußeren anregenden Kraft bei Überfahrt des Trägers
- Q_w - Gewicht der Laufkatze
- Q_m - Gewicht der Kranbrücke.

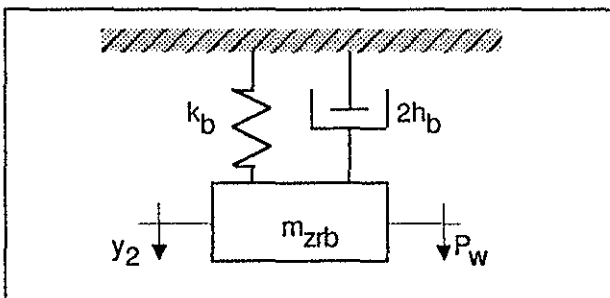


Bild 2: Diskretes physikalisches Modell der Anordnung des Systems

In Bild 2 wird ein diskretes physikalisches Modell der Anordnung des Systems dargestellt, das die Überfahrt des Krans über den Träger veranschaulicht. Die im Schema des Modells auf die Mitte der Spann-

weite reduzierte Masse des Trägers ist durch die Gesamtmasse m_{zrb} repräsentiert. Die Bewegungsgleichung der Masse m_{zrb} bei zwei wirkenden Kräften P_w und beim konstanten Abstand l_c ergibt sich zu:

$$m_{zrb} \ddot{y}_2 + 2h_b \dot{y}_2 + k_b y_2 = P_w u(t) + P_w u(t - T_0) \quad (3)$$

es gilt:

- y_2 - Verschiebung des Trägers
- h_b - Viskositäts-Dämpfungskoeffizient des Trägers für den Fall der Kranüberfahrt
- k_b - Elastizitätsfaktor des Trägers für den Fall der Kranüberfahrt

m_{zrb} - reduzierte Masse des Trägers

T_0 - Überfahrzeit des zweiten Rades vom Moment des Eingangs in die Zone des Balkenfeldes

$$T_0 = \frac{l_c}{v_s}$$

- l_c - Abstand zwischen den Laufrädern des Krans
- v_s - Einfahrtgeschwindigkeit des Krans auf den Träger.

Nach dem Dividieren von (1) durch m_{zrb} und dem Einsatz des Ausdrucks (2) für P_w erhalten wir:

$$\ddot{y}_2 + \frac{2h_b}{m_{zrb}} \dot{y}_2 + \frac{k_b}{m_{zrb}} y_2 = (a_2 \sin \omega_0 t + b_2' \sin \omega_2 t \sin \omega_0 t) u(t) + (a_2 \sin \omega_0 t + b_2' \sin \omega_2 t \sin \omega_0 t) u(t - T_0) \quad (4)$$

es gilt:

l_b = Länge des Trägers

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} \quad \omega_0 = \frac{v_s}{l_b}$$

$$m_1 = \frac{Q_1}{g}$$

$$b_2' = \frac{k_1 \cdot V_0}{2\omega_2 m_{zrb}}$$

$$a_2 = \frac{2Q_1 + 2Q_w + Q_m}{4 \cdot m_{zrb}}$$

Die Lösung der Gleichung (4) ergibt sich

für $0 \leq t \leq T_0$ zu:

$$y_2 = 2|B_1| \sin(\omega_0 t + \varphi_1) + 2|B_2| e^{-\xi t} \sin(\omega_1 t + \varphi_2) + 2|B_3| \sin[(\omega_2 - \omega_0)t + \varphi_2] + \\ + 2|B_4| e^{-\xi t} \sin(\omega_1 t + \varphi_4) - 2|B_5| \sin[(\omega_2 + \omega_0)t + \varphi_5] - 2|B_6| e^{-\xi t} \sin(\omega_1 t + \varphi_6) \quad (5a)$$

für $T_0 \leq t \leq T_c$

$$y_2 = 2|B_1| \sin(\omega_0 t + \varphi_1) + 2|B_2| e^{-\xi t} \sin(\omega_1 t + \varphi_2) + 2|B_3| \sin[(\omega_2 - \omega_0)t + \varphi_3] + \\ + 2|B_4| e^{-\xi t} \sin(\omega_1 t + \varphi_4) + 2|B_5| \sin[(\omega_2 + \omega_0)t + \varphi_5] - 2|B_6| e^{-\xi t} \sin(\omega_1 t + \varphi_6) + \\ + 2|B_1| \sin[\omega_0(t - T_0) + \varphi_1] + 2|B_2| e^{-\xi(t - T_0)} \sin[\omega_1(t - T_0) + \varphi_2] + \\ + 2|B_3| \sin[(\omega_2 - \omega_0)(t - T_0) + \varphi_3] + 2|B_4| e^{-\xi(t - T_0)} \sin[\omega_1(t - T_0) + \varphi_4] - \\ - 2|B_5| \sin[(\omega_2 + \omega_0)(t - T_0) + \varphi_5] - 2|B_6| e^{-\xi(t - T_0)} \sin[\omega_1(t - T_0) + \varphi_6] \quad (5b)$$

für $T_0 \leq t \leq T_0 + T$

$$y_2 = 2|B_1| \sin[\omega_0(t - T_0) + \varphi_1] + 2|B_2| e^{-\xi(t - T_0)} \sin[\omega_1(t - T_0) + \varphi_2] + \\ + 2|B_3| \sin[(\omega_2 - \omega_0)(t - T_0) + \varphi_3] + 2|B_4| e^{-\xi(t - T_0)} \sin[\omega_1(t - T_0) + \varphi_4] - \\ - 2|B_5| \sin[(\omega_2 + \omega_0)(t - T_0) + \varphi_5] - 2|B_6| e^{-\xi(t - T_0)} \sin[\omega_1(t - T_0) + \varphi_6] \quad (5c)$$

für $T_c + T_0 < t$

$$y_2 = 0 \quad (5d)$$

$$\text{es gilt: } \omega_t = \sqrt{\omega_b^2 - \xi^2}$$

$$|B_1| = \frac{a_2}{2 \left[4\xi^2 \omega_0^2 (\omega_b^2 - \omega_0^2) \right]} \sqrt{4\xi^2 \omega_0^2 + (\omega_b^2 - \omega_0^2)^2} ;$$

$$\arg B_1 = \arg \operatorname{tg} \frac{\omega_b^2 - \omega_0^2}{2\xi \omega_0}$$

$$|B_2| = \frac{a_2 \omega_0}{2 \left[4\xi^2 \omega_t^3 + \omega_t (\xi^2 + \omega_0^2 - \omega_t^2) \right]} \sqrt{4\xi^2 \omega_t^2 + (\xi^2 + \omega_0^2 - \omega_t^2)^2} ; \quad \arg B_2 = \arg \operatorname{tg} \frac{\xi^2 + \omega_0^2 - \omega_t^2}{2\xi \omega_t}$$

$$|B_3| = \frac{b_2 \sqrt{\left[\omega_b^2 - (\omega_2 - \omega_0)^2 \right]^2 + 4\xi^2 (\omega_2 - \omega_0)^2}}{2 \left[\omega_b^2 - (\omega_2 - \omega_0)^2 \right]^2 + 8\xi^2 (\omega_2 - \omega_0)^2} ;$$

$$\arg B_3 = \arg \operatorname{tg} \frac{2\xi (\omega_2 - \omega_0)}{\omega_b^2 - (\omega_2 - \omega_0)^2}$$

$$|B_4| = \frac{b_2 \sqrt{\omega_t^2 \left[-\xi^2 + (\omega_2 - \omega_0)^2 - \omega_t^2 \right]^2 + \xi^2 \left[\xi^2 + (\omega_2 - \omega_0)^2 + \omega_t^2 \right]^2}}{2\omega_t \left[4\xi^2 \omega_t^2 + (\xi^2 + (\omega_2 - \omega_0)^2 - \omega_t^2) \right]} ;$$

$$\arg B_4 = \arg \operatorname{tg} \frac{\xi \left[\xi^2 + (\omega_2 - \omega_0)^2 + \omega_t^2 \right]}{\omega \left[-\xi^2 + (\omega_2 - \omega_0)^2 - \omega_t^2 \right]}$$

$$|B_5| = \frac{b_2 \sqrt{\left[\omega_b^2 - (\omega_2 + \omega_0)^2 \right]^2 + 4\xi^2 (\omega_2 + \omega_0)^2}}{2 \left[\omega_b^2 - (\omega_2 + \omega_0)^2 \right]^2 + 8\xi^2 (\omega_2 + \omega_0)^2} ;$$

$$\arg B_5 = \arg \operatorname{tg} \frac{2\xi (\omega_2 + \omega_0)}{\omega_b^2 - (\omega_2 + \omega_0)^2}$$

$$|B_6| = \frac{b_2 \sqrt{\omega_t^2 \left[-\xi^2 + (\omega_2 + \omega_0)^2 - \omega_t^2 \right]^2 + \xi^2 \left[\xi^2 + (\omega_2 + \omega_0)^2 + \omega_t^2 \right]^2}}{2\omega_t \left[4\xi^2 \omega_t^2 + (\xi^2 + (\omega_2 + \omega_0)^2 - \omega_t^2) \right]} ;$$

$$\arg B_6 = \arg \operatorname{tg} \frac{\xi \left[\xi^2 + (\omega_2 + \omega_0)^2 + \omega_t^2 \right]}{\omega_t \left[-\xi^2 + (\omega_2 + \omega_0)^2 - \omega_t^2 \right]}$$

$$\varphi_1 = \arg |B_1| + \frac{\pi}{2} ; \quad \varphi_2 = \arg |B_2| + \frac{\pi}{2} ; \quad \varphi_3 = \arg |B_3| + \frac{\pi}{2} ; \quad \varphi_4 = \arg |B_4| + \frac{\pi}{2}$$

$$\varphi_5 = \arg |B_5| + \frac{\pi}{2} ; \quad \varphi_6 = \arg |B_6| + \frac{\pi}{2} ; \quad b_2 = \frac{b}{2} ; \quad \xi = \frac{h_b}{m_{zrb}} ; \quad \omega_b^2 = \frac{k_b}{m_{zrb}}$$

Obige Gleichungen, die die Verschiebung des Kranbahnträgers beschreiben, sind die Gleichungen der gedämpften Schwingungen. Die Amplituden dieser Schwingungen sind unter anderem eine Funktion der Parameter des Kranbahnträgers, z.B. Elastizitätsfaktor und Dämpfungsfaktor. Diese Parameter können so gewählt werden, daß die Amplituden der durch den Kranbetrieb erzwungenen Schwingungen des Trägers möglichst klein sind und daß diese Schwingungen möglichst schnell abklingen. Beim Umsetzen der theoretischen Untersuchungen in die Praxis ist somit die Bestimmung der Werte der erforderlichen Elastizitätsfaktoren und Dämpfungsfaktoren des Kranbahnträgers, die die Ermüdungsbeständigkeit wesentlich beeinflussen, von großer Bedeutung.

Als Beispiel wurde in Bild 3 eine Verschiebung des Kranbahnträgers und in Bild 4 eine Verschiebung des Kranbahnträgers infolge der gerissenen gehobenen Last mit einem zusätzlichen Dämpfungselement aus Gußeisen dargestellt.

Die Analyse dieser Diagramme gestattet die Feststellung, daß die Anwendung einer Auskleidung die maximale Verschiebungsamplitude im Verhältnis zum Träger ohne Belag (ohne Auskleidung) um 8 % vermindert. Ein genauer Anteil einzelner Parameter des Trägers und des Krans bei Maximalverformung wird Thema einer weiteren Arbeit sein.

Ein großes Problem bleibt die Bestimmung des Dämpfungsfaktors des Trägers unter Berücksichtigung einer vibroisolierenden Auskleidung und der

größenordnungsmäßigen Erfassung der inneren Reibung des Systems Träger-Auskleidungs-Schiene.

Auch dieses Problem wird in weiterführenden Arbeiten genauer behandelt werden.

*

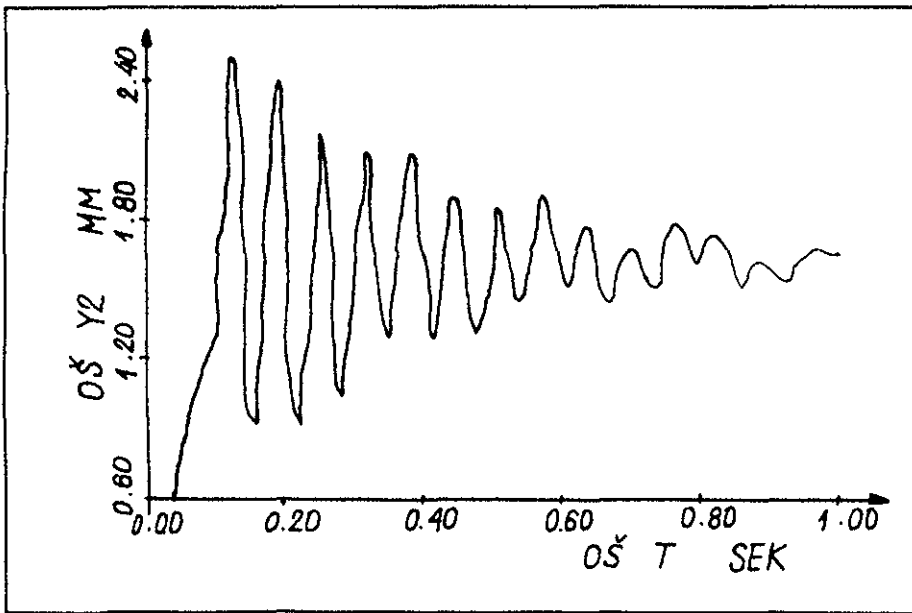


Bild3: Verschiebung des Kranbahnträgers

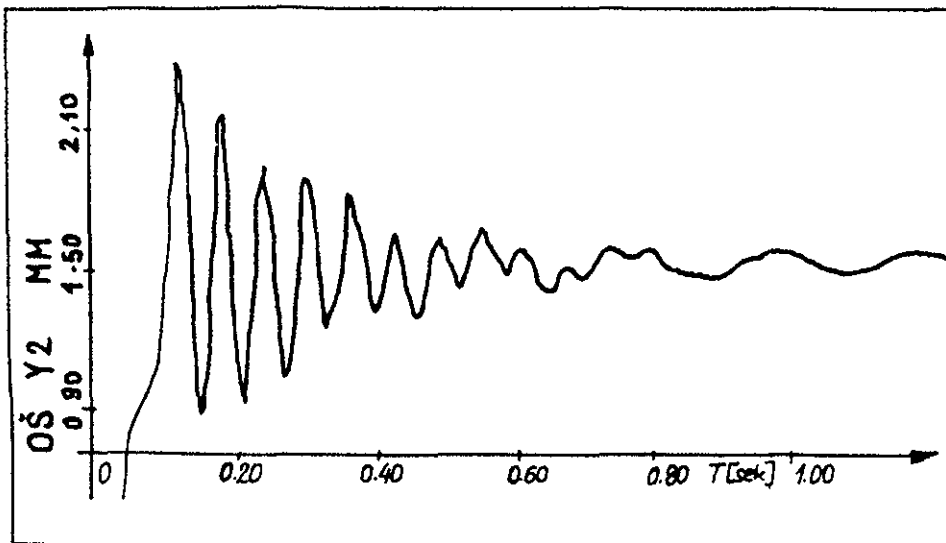


Bild4: Verschiebung des Kranbahnträgers mit einem zusätzlichen Dämpfungselement

3 Schrifttum

[1] Gochberg, M.M.: Metalliceskie konstrukciji podjemnotransportnych masin. Masinstroenie. Leningrad, 1969.

[2] PN-74/M-06514, Obciazenie w obliczeniach ustrojów nosnych dzwignic.

[3] Siemieniec, A.; Wolny, S.: Obciazenia suwnic dla przypadku podrywania ciezaru. II Konferencja naukowa "Problemy w konstrukcji i eksploatacji maszyn hutniczych i ceramicznych".

Mogilany k/Krakowa, 1984

Finite-Element-Untersuchung an einer Förderseiltrommel

M. Wächter

1 Problemstellung

Bei der vorliegenden Untersuchung handelt es sich um die Berechnung einer Fördertrommel mit zwei Wickelbereichen. Als Antrieb wird ein innenliegender Motor verwendet, dessen Rotor direkt mit der Trommelwandung verbunden ist. Die Belastung dieser Trommel kann grundsätzlich in einen rotationssymmetrischen und einen nichtrotationssymmetrischen Teil, auf diesem soll der Schwerpunkt der Untersuchungen liegen, unterschieden werden. Es werden Angaben zu den Verformungen der Trommel erwartet und ein Festigkeitsnachweis für die am stärksten belasteten Stellen der Trommel. Aufgrund der unsymmetrischen Lastanteile kann die Rechnung nicht mit Hilfe des auf rotationssymmetrischen Ansätzen aufgebauten Programms nach [1] geschehen, die Trommel wird deshalb als Finite-Elemente-Struktur nachgebildet.

2 Lastannahmen für die FE-Rechnung der Seiltrommel

2.1 Bestimmung der symmetrischen Lasten mit dem Trommelprogramm

Die Bestimmung der durch die Seilumschnürung und die magnetische Kraft des Motors auf die Trommel wirkenden Belastungen wird nach der Theorie [1] vorgenommen. Danach wird in einer statisch unbestimmten Rechnung mit statisch unbestimmtem Hauptsystem die elastische Trommelstruktur mit "untereinander geschrumpften Seilwindungen" betrachtet und die Reaktion der auf die Trommelwandschale wirkenden Lasten als Eingabe für die Finite-Elemente-Rechnung benutzt. Als Materialkonstanten wird vorausgesetzt:

- E-Modul der Trommel (ST 52-3):
 $E = 210000 \text{ N/mm}^2$
- E-Modul des Seils:
 $E_S = 150000 \text{ N/mm}^2$
- Querelastizitätsmodul des Seils:
 $E_{Sq} = 140 \text{ N/mm}^2$
- Füllfaktor des Seils:
 $q_v = 0,6$

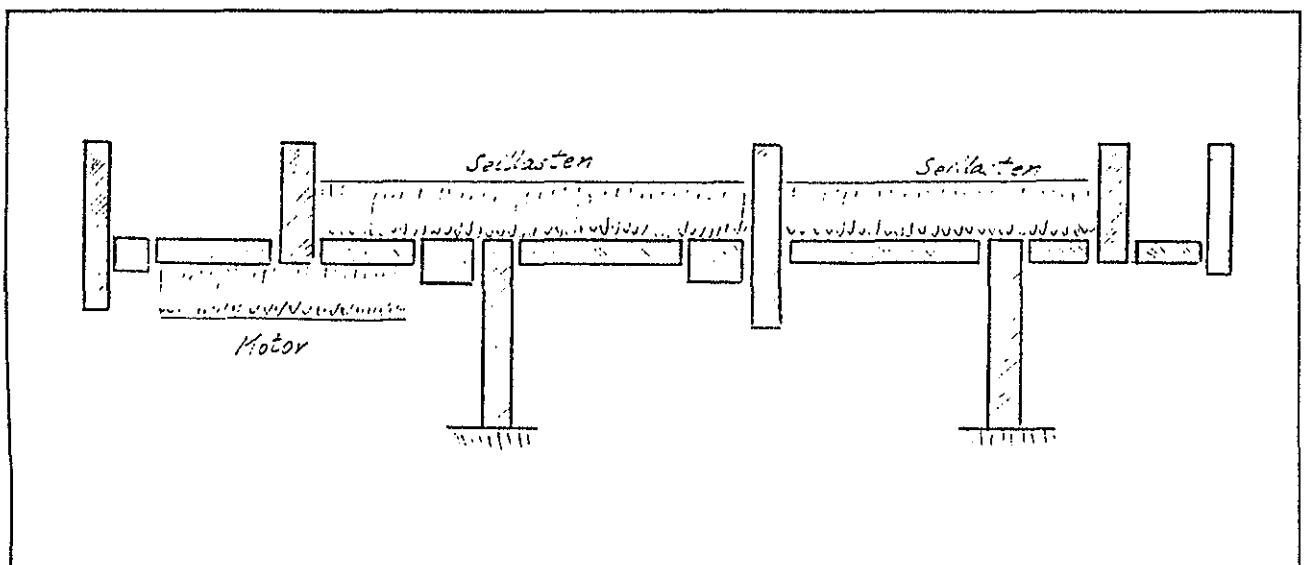


Bild 2.1: Mechanisches Ersatzschaltbild der Seiltrommel

Die mit fünf Lagen bewickelte Trommel wird mit von der Seillage abhängigen Seilkräften belastet. Die Schnürlast als Flächendruck ermittelt sich zu $p_s = 7,2 \text{ N/mm}^2$ (Lastgröße 1).

Zur Berücksichtigung der Motor-Magnetkraft muß die angegebene Kraft von 330 kN/m über dem Umfang auf eine fiktive Seilkraft umgerechnet werden. Programmtechnisch wird damit ein Seil simuliert, das mit einer Kraft von 92712 N in einer Lage und einer Windung aufgewickelt wird und die Trommel im Motorbereich über eine Breite von 1400 mm gleichmäßig belastet. Der Polbereich des Antriebmotors wird mit einem Druck $p_p = 0,235 \text{ N/mm}^2$ belastet (Lastgröße 2).

Zur Ermittlung der durch den axialen Druck der Seile auf die Endscheiben bewirkten Belastungen wird angenommen, daß das Aufsteigen der Windungen auf die nächste Lage innerhalb eines Winkelbereichs von maximal 120° erfolgt. Dies entspricht in etwa dem Verhalten der Seile infolge ihrer elastischen Nachgiebigkeit. Es wird jedoch darauf hingewiesen, daß infolge anderer Bewicklungssysteme mit definierten Auflaufstellen innerhalb der Lagen örtlich erheblich andere Spannungsverhältnisse herrschen können als die hier durchgeführten Berechnungen mit rotationssymmetrischen Angaben ausweisen.

Zur Bestimmung der axialen Kräfte würde als ungünstigster Fall angenommen, daß die Bewicklung in der Mitte beginnt und das noch ein Aufsteigen von der fünften Lage in die sechste Lage stattfindet. Dadurch entstehen an den Bordscheiben der Trommelaußenseiten axiale Kräfte am Ende der ersten, der dritten und der fünften Lage, diese Angaben liegen auf der sicheren Seite der Rechnung. Das Ergebnis der Rechnung sind Linienlasten auf die

Bordscheiben je Seilwicklungs-lage (Lastgröße 3). Die linke Bordscheibe wird dabei in negativer z-Richtung mit der Kraft beaufschlagt, die rechte Bordscheibe in positiver z-Richtung (Bild 2.2).

Die FE-Rechnung gestattet das Einbringen von Lastgrößen nur auf Knotenpunkten. Im vorliegenden FE-Netz (Bild 3.1) liegen die Knotenpunkte auf den Radien 3400 mm, 3200 mm und 3000 mm. Die ermittelten Linienlasten werden auf die Knotenpunktradien extrapoliert. Aus der Gesamtkraft pro Umfang berechnet sich die Einzelkraft je Knoten bei der gegebenen Netzteilung (DIV 20) zu:

2.2 Bestimmung der unsymmetrischen Lasten

Die Seiltrommel wird unsymmetrisch durch zwei Gewichtskräfte, die Seilkraft und die magnetische Zusatzkraft belastet.

Die magnetische Zusatzkraft wird über den Umfang cosinusförmig und über die gesamte Polbreite angreifend angenommen. Die Funktion ermittelt sich aus der Gesamtkraft $F_m = 132 \text{ kN}$. Die Gesamtkräfte müssen in x-, y-Kräfte zerlegt werden für die FE-Rechnung und zum weiteren über die Polbreite aufgeteilt werden entsprechend der Anzahl der Elemente (DIV 6). Dabei ist zu beachten, daß die Außenknoten nur mit der halben Kraft beaufschlagt werden dürfen. Die magnetische Zusatzkraft wird im weiteren als Lastgröße 4 bezeichnet.

Die Seilkraft (Lastgröße 5) $F_s = 550 \text{ kN}$ wird über den halben Umfang in den Punkten A und B (Bild 2.2) angreifend in die Rechnung eingebracht. Die ermittelten Kräfte werden zerlegt in x- und y-Komponenten.

Radius (mm)	Linienlast (N/mm)	Knotenpunktlast (N)
3400	$q_3^* = 0$	0
3200	$q_2^* = 24,3$	24430
3000	$q_1^* = 61,1$	57567

Tabelle 2.1: Knotenpunktlast in Abhängigkeit vom Ort

Das Gewicht der vollständig aufgewickelten Seile (Lastgröße 6) wird im Wickelbereich durch Veränderung der Dichte der maßgebenden Elemente berücksichtigt. Aufgrund der geometrischen Abmessungen und des Seilgewichtes ($G = 38376 \text{ kg}$) wird für den Rechenlauf die Dichte des entsprechenden Bereiches mit $\rho = 19,56 \text{ kg/dm}^3$ angenommen.

Die Gewichtskraft des Rotors (Lastgröße 7) wird in entsprechender Weise berücksichtigt. Es ergibt sich eine Dichte von $\rho = 23,89 \text{ kg/dm}^3$.

Das **Bild 2.2** zeigt den Angriffsort der Beanspruchungen. Die Seiltrommeln werden durch 7 unterschiedliche Lastgrößen beansprucht, die zusammenfassend noch einmal aufgelistet sind:

- Lastgröße 1: Schnürlast der Seile
- Lastgröße 2: Magnetkräfte des Motors
- Lastgröße 3: Kraft auf Bordscheiben
- Lastgröße 4: Unsymmetrische magnetische Zusatzkraft
- Lastgröße 5: Seilkraft
- Lastgröße 6: Gewicht der Seile
- Lastgröße 7: Gewicht des Rotors

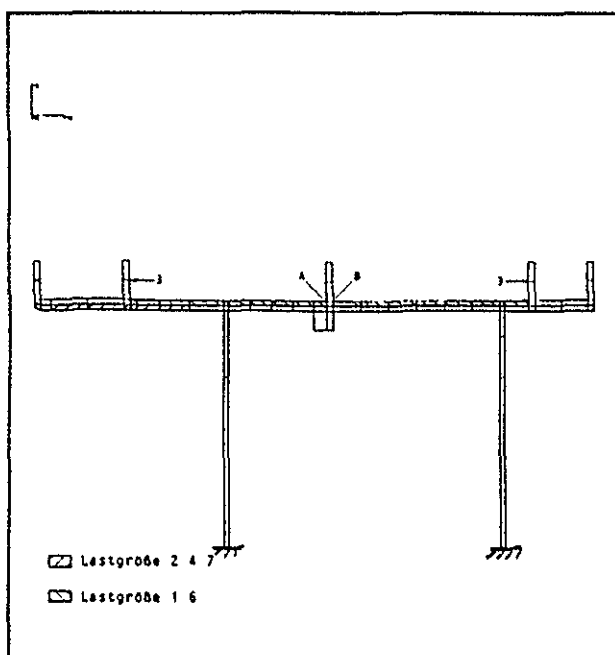


Bild 2.2: Angriffsorte der Lastgrößen

3 Aufbau des FE-Netzes

Die Finite-Elemente-Rechnungen werden mit dem Programmsystem ASKA durchgeführt. Zu dem Programmsystem stehen der Preprozessor FEMGEN zur Netzerstellung und der Postprozessor FEMVIEW zur Auswertung der Rechenergebnisse zur Verfügung. Die Seiltrommel wird durch den Volumenelementtyp Hexe 8 nachgebildet, welcher einen linearen Verformungsansatz aufweist. Die Hexe 8-Elemente sind Quaderelemente mit 8 Knotenpunkte. Dieser Elementtyp erlaubt zum einen eine Einzelkrafteinleitung in jedem Knotenpunkt, eine Druckbelastung des Bauteiles und ermöglicht die Berücksichtigung der Gewichtskraft. Der Umfang der Seiltrommel ist in 20 Segmente unterteilt (DIV 20) (**Bild 3.1**). Die Einspannung des Bauteiles erfolgt im Bereich der Lager durch Festlegen der markierten Oberflächen (**Bild 2.2**) in allen drei Raumrichtungen. Die FE-Struktur setzt sich aus 164 Teilkörpern (Bodies) mit 2460 Knotenpunkten (Nodes) zusammen.

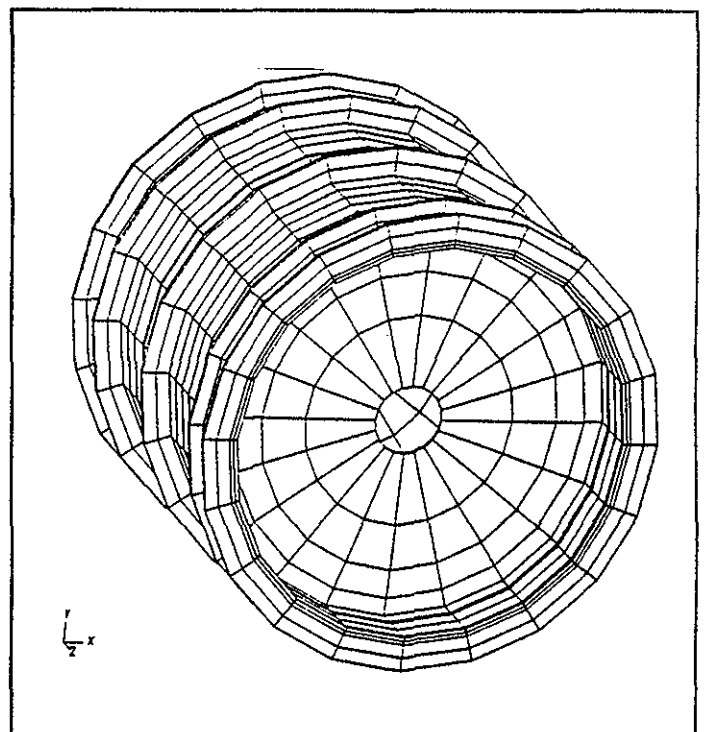


Bild 3.1: Darstellung eines räumlichen FE-Netzes

4 Auswertung der Rechenergebnisse

Zur Ermittlung der Verformungen im Bereich des Rotors und der Endscheiben sind drei Rechenläufe durchgeführt worden.

- ① Lastgröße 1-7 (Gesamtlast)
- ② Lastgröße 1-3 (symmetrisch)
- ③ Lastgröße 4-7 (unsymmetrisch)

Die unterschiedlichen Rechnungen dienen dem Zweck, die Einflüsse der einzelnen Lastgrößen besonders deutlich darzustellen und damit Hinweise für die Lastannahmen auch künftig zu berechnender Trommeln zu geben.

Die maximalen Verformungen unter Gesamtlast betragen 3,33 mm (Bild 4.1), bei symmetrischer Belastung ergibt sich eine maximale Verformung von 3,31 mm an identischer Stelle im Bauteil. Der Rechenlauf mit nur unsymmetrischer Belastung liefert eine maximale Verschiebung von 0,068 mm im Bereich des Rotors.

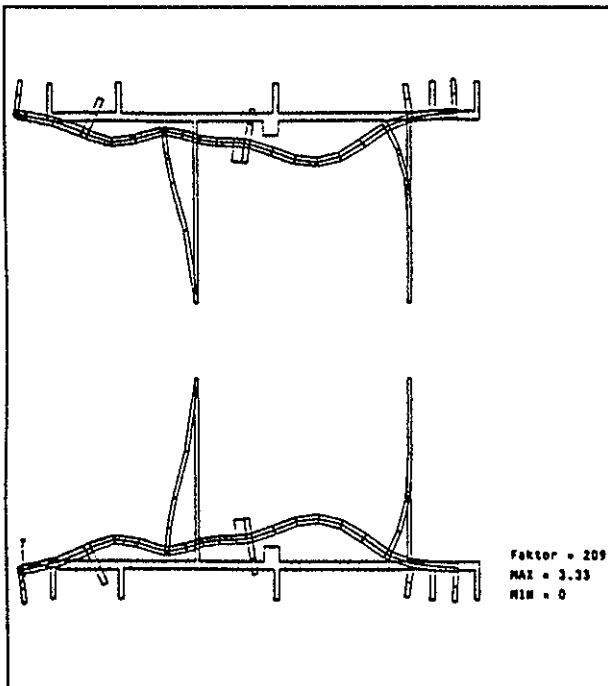


Bild 4.1: Schnitt durch Stelle höchster Gesamtverschiebung bei Gesamtlast

Es läßt sich aus den Ergebnissen schließen, daß der Einfluß von Seilgewicht, Rotorgewicht, Seilkraft und magnetischer Zusatzkraft im Bereich der Aussagegenauigkeit der Rechenergebnisse liegt. Für spätere Untersuchungen ähnlicher Problemstellung sind

Rechnungen unter Berücksichtigung der Schnürlast, Motorlast und der Endscheibenlast ausreichend.

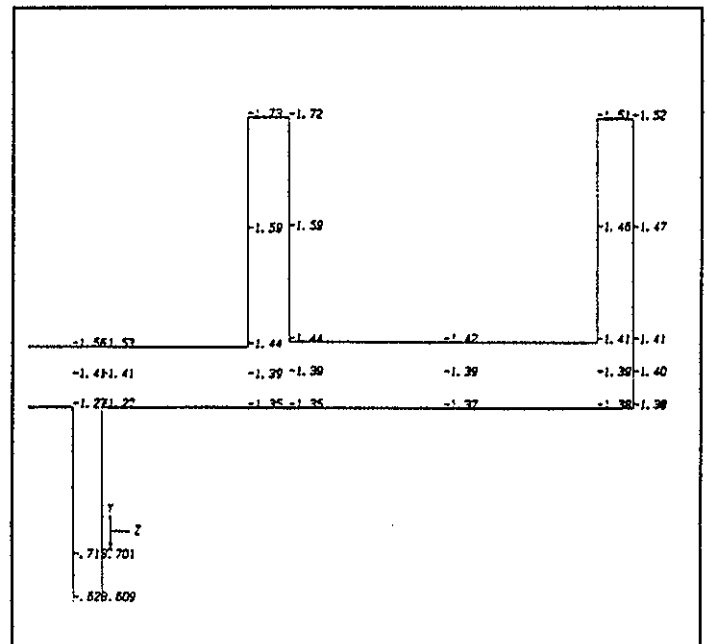


Bild 4.2: Verschiebung in z-Richtung im Bereich der rechten Endscheibe, Gesamtlast

Von besonderem Interesse sind die Verschiebungen im Bereich des Rotors und im Bereich der Endscheiben. Die rechte Endscheibe (RE) weist in der interessierenden z-Richtung eine maximale Verschiebung von -1,52 mm (nach innen) auf (Bild 4.2).

Im Vergleich dazu die Ergebnisse bei nur symmetrischer Last $f_z = -1,48$ mm und $f_z = -0,047$ mm bei unsymmetrischer Last.

Die linke Endscheibe (LE) zeigt durchweg höhere Verschiebungen als die rechte Endscheibe. In z-Richtung treten maximale Verschiebungen von -1,97 mm bei Gesamtlast auf (Bild 4.3). Die symmetrische Belastung weist Verschiebungen von $f_z = -1,94$ mm auf und bei nur unsymmetrischer Last ergeben sich Verschiebungen von $f_z = -0,043$ mm.

Im Bereich des Rotors sind die Verformungen in x- und y-Richtung von Bedeutung, die eine Verengung oder Aufweitung des Spaltes bewirken. Die ermittelten Verschiebungen sind in Tabelle 4.1 aufgelistet, dabei verlagert sich der Ort der maximalen Verformungen über den Umfang.

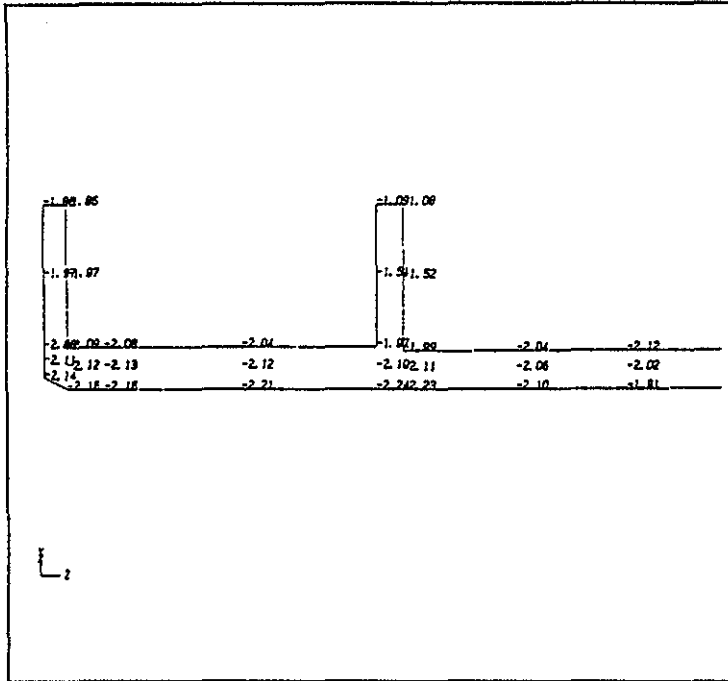


Bild 4.3: Verschiebung in z-Richtung im Bereich der linken Endscheibe, Gesamtlast

Variante	f _{xmax}		f _y max	
	-Δ	+Δ	-Δ	+Δ
gesamt I	1,540	0,185	1,510	0,237
sym. I	1,540	0,185	1,540	0,185
unsym. I	0,002	0,002	0,000	0,048

Tabelle 4.1: Darstellung der Veränderung des Spaltes im Bereich des Rotors (-Δ = Spaltverengung, +Δ = Spaltaufweitung)

Die Vergleichsspannung von Mises ist ermittelt worden (Bild 4.4 $\sigma_{vmax} = 233 \text{ N/mm}^2$). Der Ort maximaler Vergleichsspannung befindet sich im Wickelbereich an der Stelle der größten Verschiebung und ist damit im wesentlichen durch Ringspannungen infolge der Seilumschnürung bedingt.

5 Zusammenfassung

An einer Fördermaschinentrommel wurden statische Festigkeitsrechnungen mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente durchgeführt. Die Bestimmung der auf die FE-Struktur wirkenden Lasten erfolgt zum Teil mit dem in [1] entwickelten Programm.

Die Ergebnisse der Berechnungen weisen Verformungen der Trommelwandung bis zu 3,33 mm radialer Durchbiegung im Bereich der rechten Trommelbewicklung. Maßgebend für diese Verformungen sind die symmetrischen Belastungen, der Einfluß der unsymmetrischen Belastungsanteile liegt bei maximal 2 %. Die axiale Verformung der Bremscheiben beträgt ca. 1,5 mm (rechte Bremscheibe, bis 2 mm linke Bremscheibe), ihre Schiefstellungen sind vernachlässigbar klein. Auch hier rührt der maßgebliche Anteil aus den symmetrischen Lasten.

Im Bereich des Rotors ergeben sich Spaltveränderungen bis zu 1,54 m, hier läßt sich ein Einfluß der nicht-symmetrischen Lasten verzeichnen.

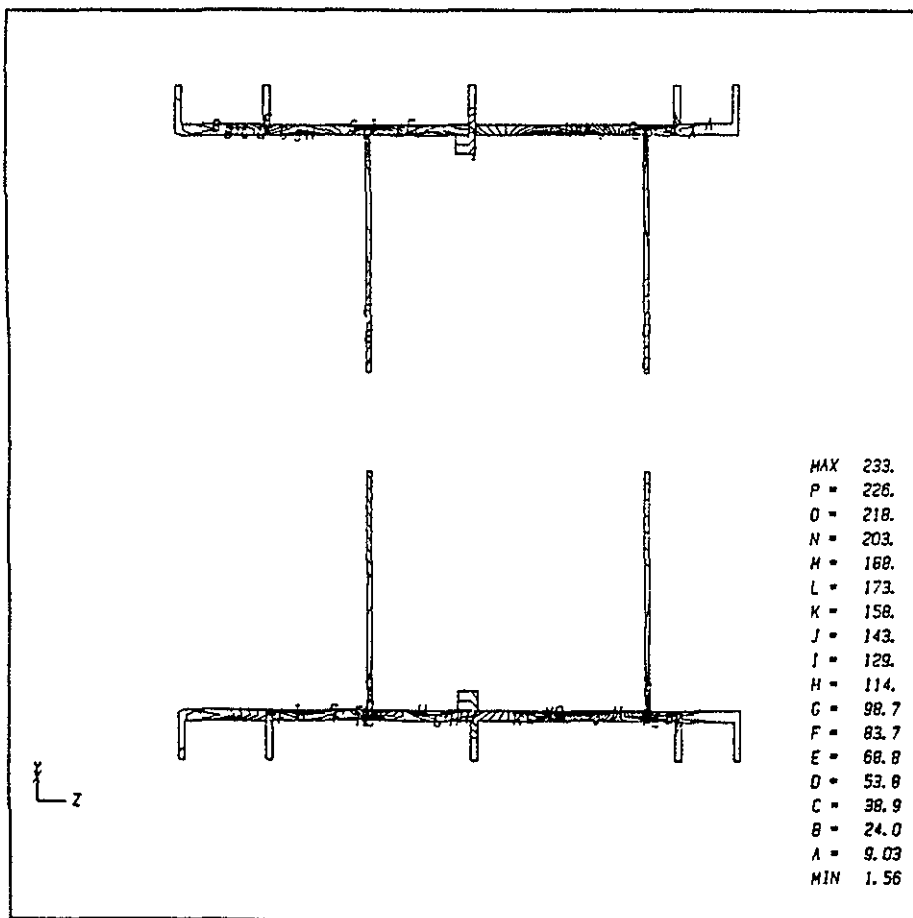


Bild 4.4: Vergleichsspannung nach Mises, Schnitt durch die Stelle höchster Gesamtverschiebung

Die höchste Beanspruchung liegt mit einer Vergleichsspannung nach von Mises von 233 N/mm^2 unter der Schwellfestigkeit des Werkstoffs ST 52-3. Die im Bereich der Schweißnähte berechneten Spannungen überschreiten in keinem Falle 150 N/mm^2 .

Damit ist der rechnerische Tragfähigkeitsnachweis für die der Untersuchung zugrunde liegenden Trommel erbracht. Bis auf die Verformungsbetrachtungen im Bereich des Motorspalts überwiegen die Einflüsse aus den symmetrischen Lastfällen, insbesondere aus dem Umschnürungsdruck der Seile so stark, daß für künftige Rechnungen eine Berücksichtigung der unsymmetrischen Lastfälle weitgehend unberücksichtigt bleiben kann.

*

Literatur

- [1] Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln.
Forschungsberichte der Z-VDI, Reihe 13 Nr. 12,
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf

Spannungsoptische Modelluntersuchung an einer Schreitausbau-Einheit

W.Kalliwoda

1 Einleitung

Spannungsoptische Untersuchungen ermöglichen die Spannungsermittlung auch bei komplexer Beanspruchung eines Bauteils. Dabei wird anhand eines räumlichen Modellversuchs der Spannungszustand bestimmt und an den kritischen Stellen ausgewertet. Ausgehend vom ermittelten Istzustand schließt sich eine Gestaltoptimierung der kritischen Bereiche an. Die Vorgehensweise beim Modellversuch wird im folgenden anhand der Untersuchung einer Schreitausbau-Einheit gezeigt. Bild 1:

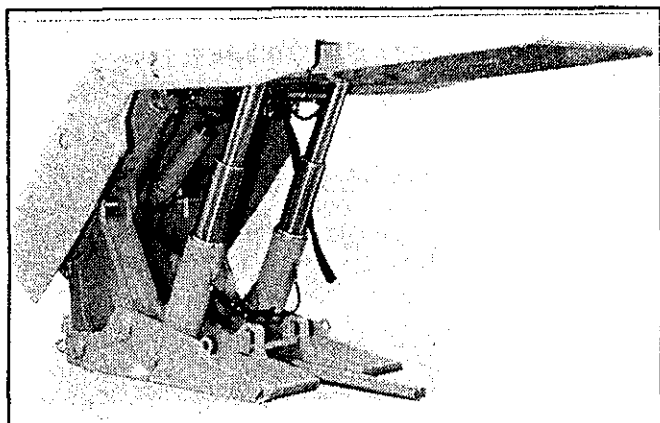


Bild 1: Schreitausbau-Einheit

2 Spannungsoptische Untersuchung der Schildkappenkonstruktion

Über steiler angeordnete Hydraulikstempel soll die Kräfteinleitung in die Schildkappe und letztlich der Ausbauwiderstand verbessert werden. Dies soll durch eine Bauhöhenminimierung einzelner Elemente des Schreitausbaus erreicht werden. Durch eine spannungsoptische Untersuchung soll die Spannungsverteilung in kritischen Bereichen der Konstruktion ermittelt werden. Die Analyse des Istzustands anhand des spannungsoptischen Modells umfaßt nach Bild 2 folgende Arbeiten:

Nach dem Einrichten des Modells im Belastungsrahmen wird der Einfrierversuch durchgeführt. Die Modellspannungen werden durch Zerschnitt des Modells und Auswertung der Schnittisochromaten

und -isoklinen bestimmt. Mit Hilfe der Ähnlichkeitsgesetze wird schließlich das Versuchsergebnis auf Werkstoff und Baugröße des Originals übertragen.

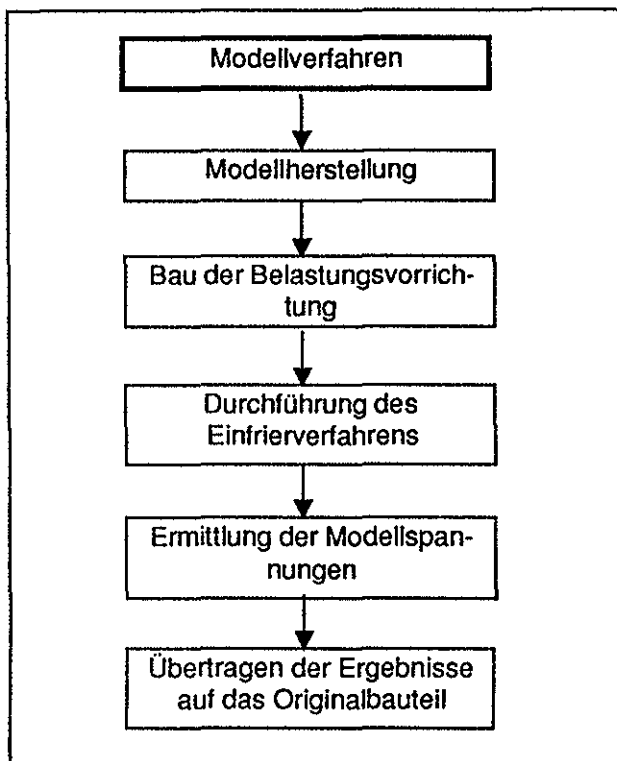


Bild 2: Modellverfahren

2.1 Modellherstellung

Ausgehend von den vorgegebenen Abmessungen des Schreitausbaus wurde ein räumliches spannungsoptisches Schildkappenmodell im Maßstab 1: 2,5 gefertigt. Bild 3:

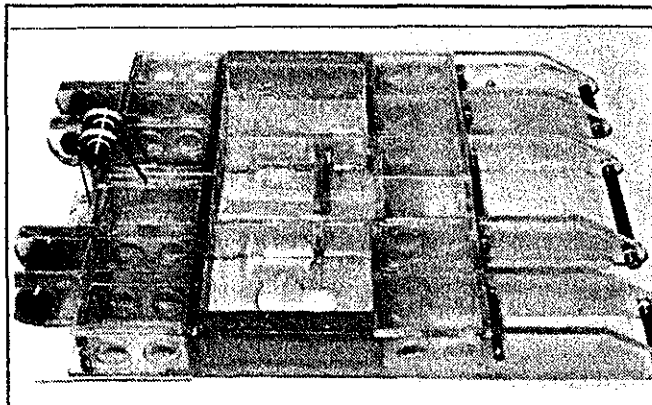


Bild 3: Schildkappenmodell

Der Schweißkonstruktion des Originalbauteils entsprechend, setzt sich das geometrisch ähnliche Modell aus einem Verbund von Trägern, Platten und den beiden Stempeltöpfen zusammen.

Das Modell wurde dementsprechend aus mehreren ebenen und räumlichen Einzelteilen aus doppelbrechenden Modellwerkstoff hergestellt und mittels Klebtechnik zusammengesetzt. Die Klebung sollte bei Raumtemperatur möglich sein und bei Einfriertemperatur eine ausreichende Bindefestigkeit behalten. Als Klebstoff wurde deshalb eine kalthärtende Harz-Härterkombination mit einer für das Einfrierverfahren notwendigen Warmformbeständigkeit eingesetzt. Das Klebstoffmaterial bestand aus einer Aralditbeschichtung und entsprechendem Härter auf mehrlagigem Glasfaservlies. Vorversuche hatten gezeigt, daß bei ausreichender Aushärtezeit die mit Glasfasermatten versteiften Klebenähte eine ausreichende mechanische Festigkeit unter Modellbelastung bei Einfriertemperatur erreichen.

2.2 Bau der Belastungsvorrichtung

Das räumliche Schildkappenmodell wurde in einer eigens konstruierten Belastungsvorrichtung, entsprechend der Prüfanordnung des Originalbauteils belastet. Bild 4:

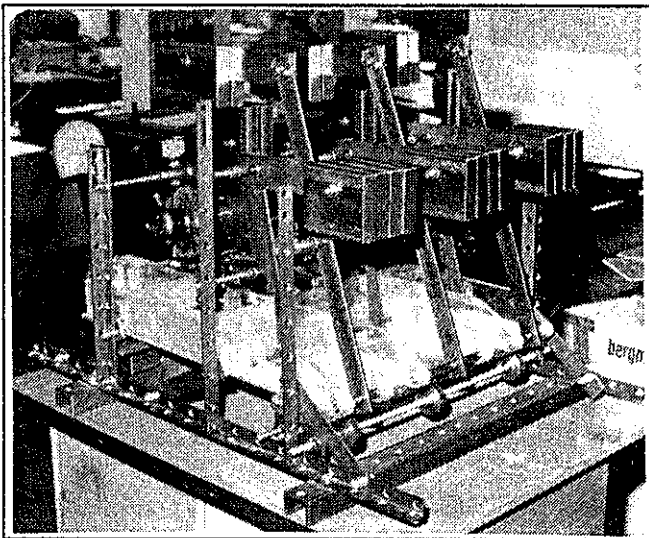


Bild 4: Belastungsvorrichtung

Das Modell wurde aufgrund besserer Lastangriffsmöglichkeit auf dem Obergurt liegend in die Belastungsvorrichtung eingebaut.

Wegen unterschiedlicher Wärmedehnung zwischen Modellwerkstoff und Belastungsvorrichtung ist auf die notwendige Vorrichtungsgenauigkeit zu achten. Die eintretende Modelilverformung muß sich frei einstellen können. Der Vorderschild liegt auf einer winkelbeweglichen Platte. Auftretende Wärmedehnungen sind durch ausreichendes Spiel der über Hülsen gelagerten Hebel berücksichtigt. Im Bereich des Lastangriffs wird durch Ausgleichsmaterial die Kraft gleichmäßig über die Modelldicke eingeleitet. Um die Lasthöhe zu bestimmen und die Belastungsvorrichtung richtig zu dimensionieren, wird die Modellbelastung über den Kräftemaßstab κ überschlagsmäßig berechnet.

$$\kappa = \lambda^2 \cdot \frac{\sigma}{\sigma'}$$

$$\text{mit : Laengenmaßstab } \lambda = \frac{l}{l'}$$

$$\text{Spannungsmaßstab } \frac{\sigma}{\sigma'} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma'_1 - \sigma'_2} = \frac{R_{\text{eH}}}{S \cdot n} \cdot d'$$

mit der Richtlinie :

Isocromatenordnung $n = 7$

Schnittdicke $d' = 5 \text{ mm}$

Spot. Konstante $S_{\text{eff}} = 0.28 \frac{\text{N}}{\text{mm} \cdot \text{Ordng.}}$

R_{eH} = Streckgrenze Originalbauteil

ergibt sich $\kappa = 10260$.

Damit ergeben sich als wichtigste Einzelbelastungen am Modell:

$$\text{Stempel: } F'_{\text{st}} = \frac{F_{\text{st}}}{\kappa} = \frac{1400 \text{ KN}}{10260} = 136 \text{ N}$$

$$\text{Lasche: } F'_{\text{La}} = \frac{F_{\text{La}}}{\kappa} = \frac{207 \text{ KN}}{10260} = 20.1 \text{ N}$$

$$\text{Lenker: } F'_{\text{Le}} = \frac{F_{\text{Le}}}{\kappa} = \frac{472 \text{ KN}}{10260} = 45.9 \text{ N}$$

Die zu montierenden Gewichte werden auf die wirkenden Hebelarme umgerechnet und mittels Kraftmesser kontrolliert.

2.3 Einfrierverfahren

Das Verfahren beruht auf der Eigenschaft des wärmehärtenden Epoxidharzes ab einem bestimmten Temperaturbereich in den gummielastischen Zustand überzugehen. Bei entsprechender Modellbelastung verformt sich das Modell rein elastisch, wobei der durch die Verformung entstehende Spannungszustand beim entlasteten Modell erhalten bleibt. Die Spannung kann an den interessierenden Stellen durch entsprechende Schnittführung ausgewertet werden.

2.4 Modellzerlegung

Beide Stempeltöpfe sind innerhalb des Gesamtmodells vereinfacht als lokalsymmetrisch bezüglich Form und Belastung anzunehmen. Die Kalotte wurde in der einen Symmetriehälfte durch Schnitte in Längsrichtung (x-Richtung) in der anderen Hälfte über die Kalottenbreite (y-Richtung) zerlegt.

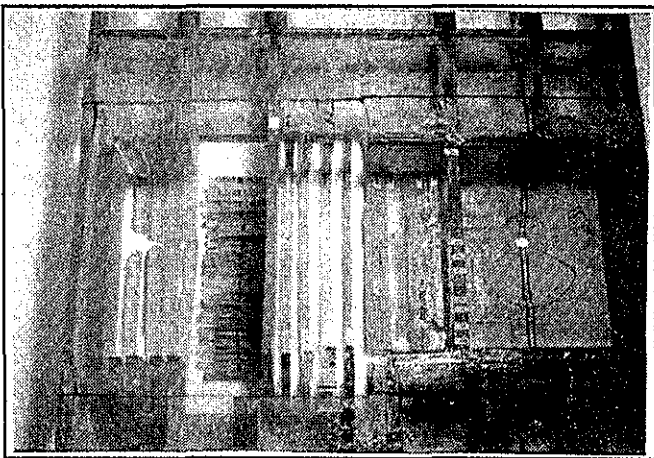


Bild5: Schnittverlauf im Stempeltopfbereich

Auswertung im lastfreien Oberflächenbereich:

Die Schnittisochromaten geben die Differenz der sekundären Hauptspannungen ($\sigma'_1 - \sigma'_2$) an. Unter der vereinfachenden Annahme des Symmetriecharakters der Kalotten, ergeben sich bei Senkrechtdurchstrahlung der Schnittisochromaten die Hauptspannungsdifferenzen ($\sigma_1 - \sigma_2$) in den Schnittebenen. Bei senkrechter Beobachtung der beiden orthogonalen Schnittverläufe können die Hauptnormalspannungsverläufe in Längs- und Querrichtung ermittelt werden.

Auswertung an belasteter Oberfläche:

Die Ermittlung des 3-achsigen Spannungszustands an einem Punkt der Kontaktfläche erfolgt mit 2 Durchstrahlungen senkrecht zur Schnittebene. Die Durchstrahlung des Symmetrieschnitts liefert die Hauptspannungsdifferenz aus der tangential am Kugelrand wirkenden Hauptspannung σ_1 und der orthogonalen Hauptspannung σ_2 . Mit Hilfe des Schubspannungsdifferenzverfahrens wird die Hauptspannungsdifferenz getrennt. Die senkrecht zur Symmetrieschnittebene wirkende 3. Hauptspannung ergibt sich durch einen Oberflächenschnitt.

2.5 Die Übertragung der Ergebnisse

Der Spannungszustand muß vom Modell mit Hilfe der Ähnlichkeitsgesetze auf das Originalbauteil übertragen werden.

$$\sigma_H = \sigma_M \cdot \frac{F_H}{F_M} \cdot \left(\frac{l_M}{L_H} \right)^2$$

- mit: σ_H = Spannung in der Hauptausführung
- σ_M = Spannung in der Modellausführung
- F_H = Belastung in der Hauptausführung
- F_M = Belastung in der Modellausführung
- l_M/L_H = Maßstabsverhältnis von Modell zur Hauptausführung

Wegen der Werkstoffeigenschaften des Epoxidharzes bei Einfriertemperatur ($\epsilon_{\text{eff}}=20\text{N/mm}^2$; $\nu_{\text{eff}}=0.5$) wird mit angenäherten Ähnlichkeitsgesetzen gearbeitet.

2.6 Spannungsoptische Ergebnisse an den interessierenden Stellen der Konstruktion

Bild6 gibt einen Überblick der Spannungsverteilung an der Kalottenoberfläche. Angegeben sind je nach Schnittverlauf die in Längs- bzw. Querrichtung wirkenden Hauptnormalspannungen für Kalottenober- und -unterseite.

Durch Ausnutzen der Symmetrieebene kann für einen zu untersuchenden Punkt die Vergleichsspannung σ_v angegeben werden. Da beide Hauptspannungen im Zugbereich liegen, entspricht die Vergleichsspannung nach Tresca der größeren der beiden Hauptnormalspannungen.

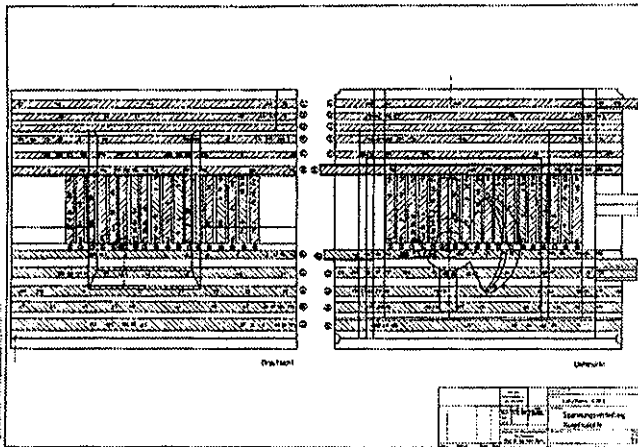


Bild 6: Spannungsverteilung Kugelkalotte

In Ergänzung der Auswertung im Kontaktbereich wurde eine Kugelkalotte im Kontaktbereich durch 4 Schnitte zerlegt. Schnitt 1 liegt in Symmetrieebene, Schnitt 2 senkrecht dazu. Schnitt 3 und 4 sind je um 45° zur Symmetrieachse versetzt. Bild 7 zeigt die Schnittführung.

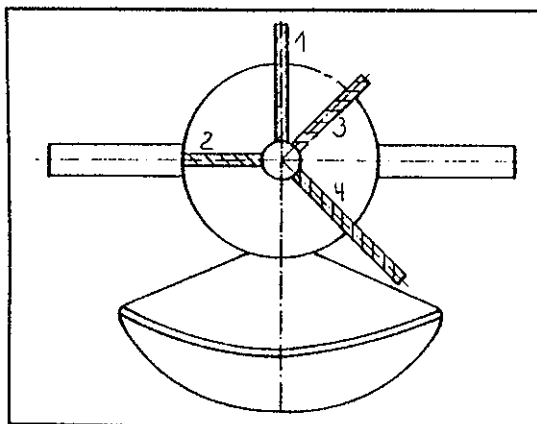


Bild 7: Schnittführung in der Stempelauflage

Schnitt 1 der durch die vordere Kalottenhälfte läuft, zeigt die höchste Spannung am Kugelauslauf. Entlang des Kugelradius fällt die Spannung ab, um im Bereich der Entlastungsbohrung wieder leicht anzuheben. Die gleiche Tendenz zeigt Schnitt 2. Die hohe Randspannung ist durch die konstruktive Kerbe der Montagenut hervorgerufen.

3. Zusammenfassung

Die modellmaßstäbliche Nachbildung des Originalbauteils machte die Herstellung eines glasfaserverstärkt geklebten Modells erforderlich. Die kalt-härtende Klebung war unter Einfriertemperatur ausreichend warmformbeständig. Der Modellversuch ermöglicht eine vollständige Aussage über den zu untersuchenden Bereich der Schildkappe. Das Ergebnis ist eine Grundlage zur gezielten Aufstellung von Finite-Elemente Netzen. Mittels Variationsrechnungen der Finite-Elemente Methode wird anschließend eine Gestaltoptimierung der Konstruktion durchgeführt.

*

Literatur:

- /1/ A. Kuske: Einführung in die Spannungsoptik
- /2/ I.Föppl, E.Mönch: Praktische Spannungsoptik
- /3/ H.Wolf: Spannungsoptik I

Festigkeitsberechnung einer Schildkappe für einen Untertage Schreitausbau mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente (FEM)

A. Kratzsch

Inhalt: In diesem Aufsatz wird am Beispiel einer Schildkappe dargestellt, wie mit Hilfe der Finiten - Element - Methode durch Parameterrechnungen gezielte Gestaltoptimierungen durchgeführt werden, um eine Verbesserung des Spannungszustandes zu erreichen.

Anwendungen: Durch die dargestellte Vorgehensweise der FEM-Berechnung mit experimenteller Absicherung anhand eines spannungsoptischen Vorversuchs ist es möglich, ohne aufwendige Originalbauteiluntersuchungen zeitoptimiert durch Rechneranwendung Gestaltoptimierungen an Bauteilen durchzuführen.

1 Einleitung

Ein Schreitausbau dient im Steinkohlenbergbau dazu, im Streb das Hangende abzustützen und den Abbauvorschub durch die Hobel- bzw. Schräm-anlage zu gewährleisten.

Bild 1 zeigt eine der Schreitausbaueinheiten, die nebeneinander im Streb angeordnet werden. Die Länge eines Strebs kann je nach Abbaubedingungen bis zu 300 Metern betragen.

Die Ausbaueinheit besteht aus einer Schildkappe, die von zwei hydraulischen Stempeln gegen das Hangende gedrückt wird und einem hinteren Bruchschild, das über ein Getriebe mit den Kufen verbunden ist. Das Getriebe, ein sogenanntes Lemnis-katengetriebe, ermöglicht eine Mächtigungs-änderung des Schildes mit möglichst geringen Abweichungen in der Horizontalen. Alle Schild-elemente werden durch bewegliche Bolzenver-bindungen miteinander verbunden.

Die gesamte Ausbaueinheit wird vor ihrem ersten Einsatz Untertage einer dynamischen Belastungs-

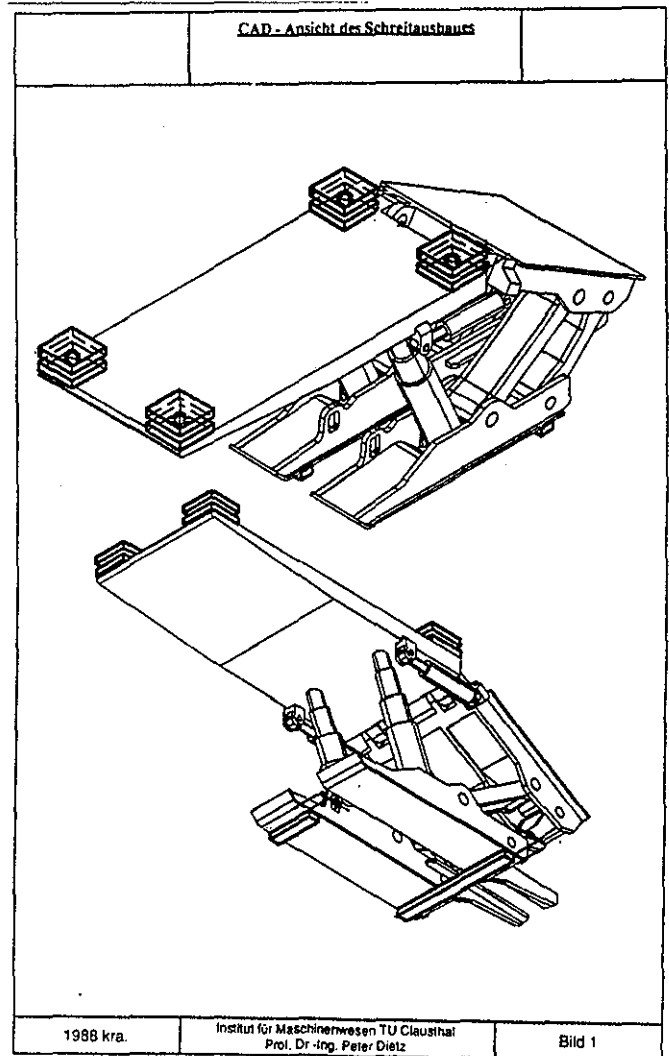


Bild 1: CAD-Modell des Schreitausbaues.

prüfung unterzogen. Der Ausbau wird dazu in einem Verspannprüfstand an Kappe und Kufe mit Wider-lagern unterlegt und in Stufen bis maximal 120 % der Nennlast belastet. Durch eine Variation der Auflager-anordnung können verschiedene Belastungszu-stände, die in der Praxis auftreten können, simuliert werden.

In diesem Aufsatz soll beispielhaft für den sogenan-ten mittigen Lastfall der Ausbaueinheit die Ermittlung des Spannungszustandes in der Schildkappe mit Hilfe der Methode der finiten Elemente vorgestellt werden.

2 Allgemeine Vorgehensweise

Zur Ermittlung der kritischen Beanspruchungen an der Schildkappe und als Ausgangspunkt für weitere Optimierungsüberlegungen wurde vor den FEM-Berechnungen ein spannungsoptischer Modellversuch durchgeführt. Über diesen Modellversuch mit seinen Ergebnissen wird in einem weiteren Aufsatz dieser Institutsmitteilung berichtet. In diesem Modellversuch wurde nicht nur der Ist-Zustand bestimmt, sondern er bildete infolge seiner vollständigen Aussage über den ganzen Bereich der Schildkappe die Grundlage der gezielten Aufstellung des FE-Netzes. Die aufzustellende FE-Struktur kann dann mit Hilfe der vorliegenden Erkenntnisse rechenzeitoptimiert gestaltet werden und ist durch die spannungsoptischen Ergebnisse bereits experimentell abgesichert. Insbesondere konnten im Bereich von Kontaktzonen, wie zum Beispiel die Stempelaufleger, spannungsoptische Ergebnisse herangezogen werden, da FE-Untersuchungen hier Genauigkeitsschwächen zeigen. Anschließend wurden nach Kenntnis des Spannungszustandes Gestaltoptimierungen ermittelt und hierzu Parameter-Rechnungen mit der Methode der finiten Elemente durchgeführt.

3 FEM-Berechnung der Schildkappe

Zur Netzgenerierung der Schildkappe sind 2-dimensionale Plattenelemente, sogenannte QUAD-Elemente verwendet worden. Aufgrund der Komplexität des Modelles sind 3-dimensionale Elemente nicht geeignet, da diese Elemente eine doppelt so hohe Knotenanzahl benötigen und die Rechnerkapazität bei der Auflösung der Elementmatrizen nicht ausreicht. Für die Berechnungen wurde ein 32 bit Rechner der Firma Prime, Typ 9655, mit 8 MB Kernspeicher und zwei Festplattenspeicher von jeweils 315 MB verwendet. Als Software wurde das FEM-Programmpaket ASKA 8.6 der Firma Ikoss mit dem Modellgenerierungs- und Auswerteprogramm FEM-GEN und ASKAVIEW benutzt. Das Quadelement ist ein quadratisches Plattenelement mit 4 Eckknoten zur Berechnung von Membran- und Biegespannungen unter Berücksichtigung der Scherung. Die

Schersteifigkeit ist bei diesem Element in Anlehnung an die Kirchhoffsche Plattentheorie abhängig von der Plattendicke, so daß bei der Netzgenerierung Restriktionen bezüglich der Elementabmessungen beachtet werden müssen.

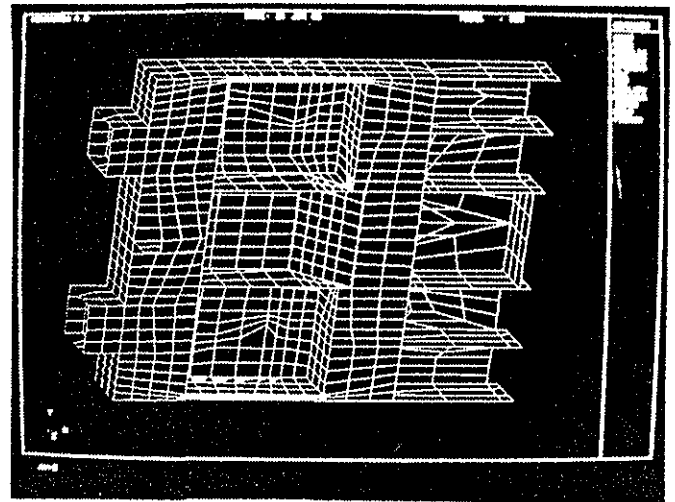


Bild 2: Rechnermodell der Kappe aus Quad4-Elementen.

Bild 2 zeigt das generierte Gesamtmodell der zu untersuchenden Schildkappe. Die Schildkappe hat eine Gesamtlänge von 1600 mm bei einer Breite von 1200 mm. Die Schildkappe ist aus 1700 Quadelementen mit annähernd 1600 Knoten aufgebaut. Die reine Rechenzeit zur Lösung der Matrizen betrug rund 35 Stunden.

Die Schildkappe besteht aus zwei quer angeordneten Kastenprofilen, die den Kalottenbereich der beiden Druckzylinder einschließen. Die eingeleiteten Querkräfte werden von Längsblechen an den durchgehenden Obergurt weitergegeben. Auf der linken Seite der Schildkappe befinden sich die Anschlüsse zum Bruchschild. Die Bolzenbohrungen sind zur Berechnungsvereinfachung entfallen. Ebenfalls erkennt man im hinteren Kappenbereich ein Auge, an dem ein Zylinder zur Verspannung des Bruchschildes angreift. Auf der rechten Seite sind die Anschlußstege für eine vordere Anstellkappe angeordnet. Die Anstellkappe hat die Aufgabe, das Hangende im Bereich der Gewinnung abzustützen.

Im Bild 3 sind die für die Berechnung aufgegebenen Lenker- und Zylinderkräfte des Modelles aufgeführt. Die Kräfte wurden durch ein Statikprogramm für das Kräftegleichgewicht der Ausbaueinheit berechnet.

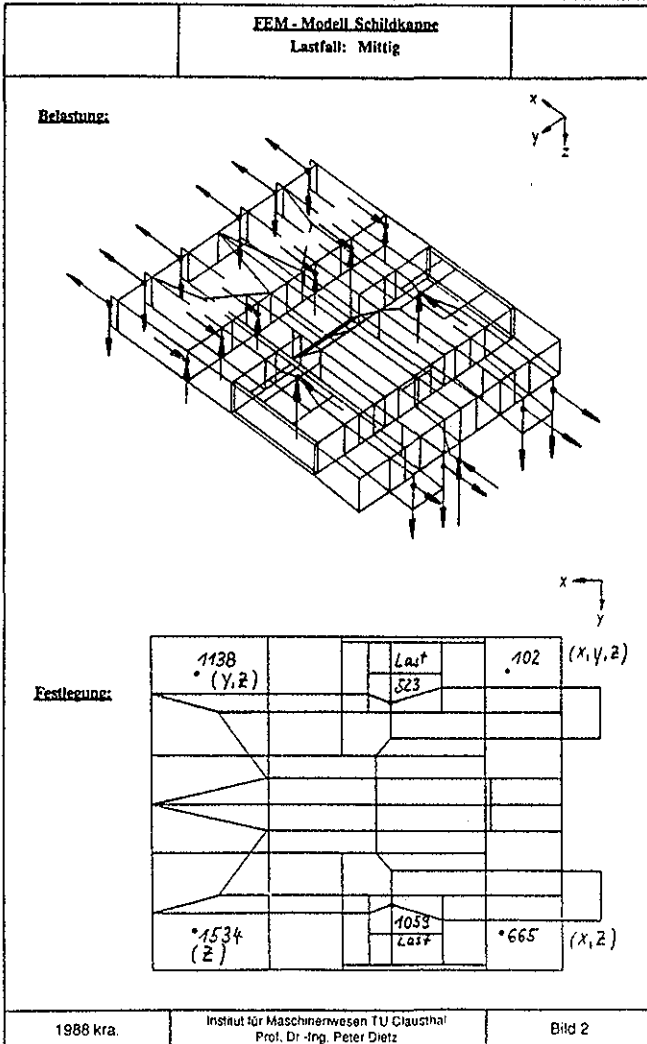


Bild 3: Kraftgrößen und Festlegungen des mittigen Lastfalles.

Im unteren Teil des Bildes 3 sind in einer Draufsicht auf die Schildkappe die Auflagerknoten und die beiden Lastangriffsknoten der Stempel gekennzeichnet. Die Festlegungen wurden so gewählt, daß durch die Einspannung der Schildkappe keine zusätzlichen Zwangskräfte in das Modell eingeleitet werden.

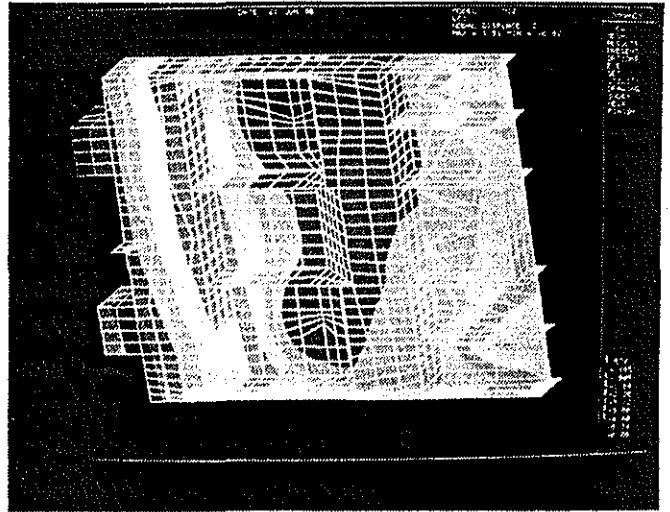


Bild 4: Verformung der Schildkappe.

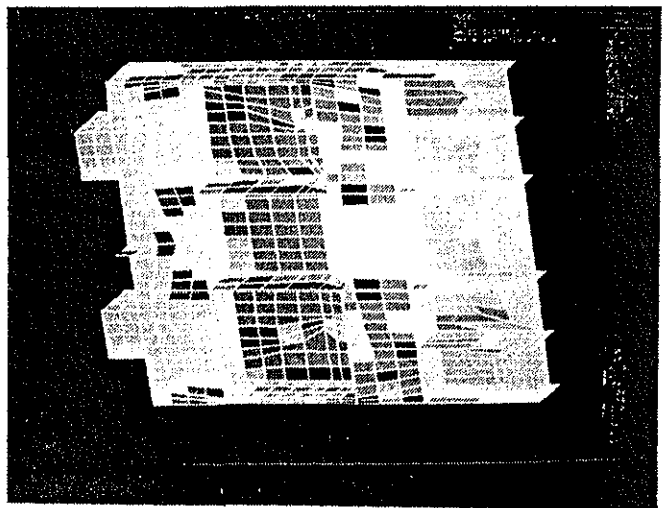


Bild 5: Spannungen σ_x der Schildkappe.

4 Berechnungsergebnisse

Im Bild 4 sind die berechneten Verformungen der Schildkappe für den mittigen Lastfall abgebildet. Jedem Verformungsbetrag ist im Ergebnisausdruck eine Farbe zugeordnet, die am rechten Bildrand abzulesen ist. Aus drucktechnischen Gründen sind in diesem Aufsatz nur schwarz-weiß Abbildungen aufgeführt. Die ungleichmäßige Durchbiegung zwischen den beiden Kappenhälften rührt daher, daß eine nachgiebige Einspannung gewählt wurde, um Zwangskräfte zu vermeiden.

Im Bild 5 sind die Biegespannungen um die Querachse, die X-Achse der Schildkappe abgebildet. An den äußeren Stegen kann der Biegespan-

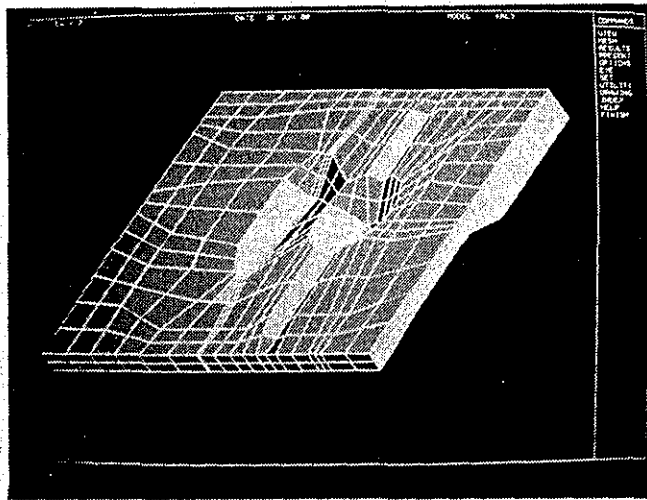


Bild 6: Kalottenmodell aus HEX8-Elementen.

nungsverlauf verfolgt werden. Im Obergurtbereich treten Zugspannungen und im Untergurtbereich Druckspannungen auf. Auch die mittleren Stege der Kalotte weisen diese Druckspannungen auf, die örtlich ausgeprägter als bei den Außenstegen sind. Bei den Außenstegen sind die Biegespannungskonzentrationen mehr auf den Übergang zum Quersteg verschoben.

Mit den verwendeten Quadelementen kann die Feinstrukturierung der Stempelkalotte nicht nachgebildet werden. Deshalb ist zur Optimierung der Kalottengeometrie ein spezielles Volumenmodell aus HEX-Elementen generiert worden, das im Bild 6 in einer Unteransicht abgebildet ist. Man erkennt hier die Kalottenauflagefläche und eine Ausfräsung für den erforderlichen Schwenkbereich des Stempels.

Mit Hilfe der spannungsoptischen Ergebnisse für den Kalottenbereich wurden das Volumenmodell belastet und ebenfalls Parameterrechnungen durchgeführt.

5 Optimierung der Schildkappe

Die anschließend durchgeführte Optimierung der Schildkappe ist auf die Problembereiche konzentriert worden, die sich bei der durchgeführten FE-Berechnung des Ist-Zustandes ergeben haben und auch beim spannungsoptischen Modellversuch sichtbar

wurden.

Nach einer systematischen Aufstellung von Optimierungsmöglichkeiten für diese Bereiche wurden geeignete Gestaltsänderungen ausgewählt und das FE-Modell entsprechend geändert. Auf die durchgeführten Gestaltsänderungen soll aufgrund interner Absprachen mit dem Unternehmen, für das diese Berechnungen vorgenommen wurden, in diesem Aufsatz nicht näher eingegangen werden.

Die Gestaltoptimierungen hatten für den mittigen Lastfall zum Ergebnis, daß sich die Gesamtverformung in z-Richtung um 16 % vermindert hat. Die Vergleichsspannungen konnten ebenfalls in den kritischen Bereichen um 32 % gesenkt werden.

6 Zusammenfassung

Abschließend kann gesagt werden, daß sich aufgrund der durchgeführten Gestaltoptimierungen an den erkannten kritischen Stellen der Schildkappe eine Vergleichmäßigung der Spannungsverläufe ergeben hat. Es wurde gezeigt, wie mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente selbst bei großen Bauteilen Spannungsverläufe ermittelt und Verbesserungen durchgeführt werden können, ohne aufwendige Bauteilversuche durchzuführen. Die Ergebnisse aus dem spannungsoptischen Vorversuch wurden dabei zum gezielten Aufbau des FE-Netzes herangezogen und dienten der experimentellen Absicherung der FE-Ergebnisse.

*

Ein hybrides Meßverfahren mit Spannungsoptik und Moire

G.Wan

Inhalt: Ein hybrides Meßverfahren zur Messung der Beanspruchungen unter dynamischer Belastung wird entwickelt. Mit dem Versuchsaufbau werden die Verschiebungen durch Moiretechnik und die Isochromaten durch Spannungsoptik zeitgleich aufgenommen. Zum Trennen der Verschiebungsisothenen wird die Weißlichtzerlegung eingesetzt, welche auch zum Multiplizieren der Moireinterferenzlinien dient.

Anwendungen: Das hybride Meßverfahren wird zur Untersuchung des dynamischen Spannungszustands sowohl von elastischen als auch nicht elastischen Bauteilen eingesetzt. Es ermöglicht, dynamische Beanspruchungen im elastischen, viskoelastischen oder elasto-plastischen Bereich zu ermitteln und quantitativ auszuwerten.

1 Einführung

Dynamische Spannungsoptik ist ein günstiges Meßverfahren zur Beobachtung des Verhaltens von Spannungswellen. Vom Isochromatenverlauf für eine Reihe von Einzelzeitpunkten werden die Ausbreitung, Reflexion oder Interferenz der Spannungswellen wesentlich erklärt.

Zur vollständigen Beschreibung des Spannungszustandes reichen die Isochromaten und Isoklinen, die durch einen spannungsoptischen Versuch aufgenommen werden, allein aber nicht aus. Zur Trennung der Hauptnormalspannungen und zur Auswertung der Koordinatenspannungen ist außer der Hauptspannungsdifferenz und dem Hauptspannungswinkel eine dritte Variante zu ermitteln.

Es wurde ein Programm unter Anwendung eines numerischen Verfahrens zur Trennung der Hauptnormalspannungen und der Koordinatenspannungen im Institut für Maschinenwesen entwickelt. Dabei muß man für jeden auszuwertenden Zeitpunkt mindestens neben Isochromaten 10 Isoklinenbilder aufnehmen. Außerdem ist die Auswertung stark begrenzt in elastischem Bereich.

Wenn man die Isoklinenbeobachtung wegen des Aufwandes ausschließt oder wenn man die Spannungsanalyse außerhalb des elastischen Bereiches durchführt, bietet sich für die Lösung des Problems eine hybride Experimentiertechnik an, die die vollständigen Informationen für die Auswertung liefern kann.

Die von Durelli vorgeschlagene Isopachenermittlung läßt sich mit Hilfe von holografischer Interferometrie erzielen, die gleichzeitig mit ebenen Isochromatenaufnahmen erzeugt werden. Diese Experimentier- und Auswertungstechnik ist so weit fortgeschritten, daß für statische Belastungsfälle und Schwingungen vollständige Spannungsfelder analysiert werden können. Für das stoßbelastete Problem scheidet diese Experimentiertechnik aus, da die zeitgleichen Aufnahmen wegen der äußerst empfindlichen Holografien von der apparativen Seite wie von der Versuchsdurchführung her große Schwierigkeiten bereitet.

Neben der Spannungsoptik hat sich die Moiretechnik seit den letzten Jahrzehnten rasch entwickelt. Die Empfindlichkeit der Inplane-Moire, die zur Messung der ebenen Verformung geeignet ist, erreicht eine Verschiebung bis 0,00025 mm. Mit Hilfe der optischen Bildverarbeitung bzw. der räumlichen Filterung kann die Koordinatenverschiebung aus einer Kreuzrasterpaarung getrennt werden. Die Moirestreifen lassen sich dabei multiplizieren.

Hierbei wird eine kombinierte Methode von Spannungsoptik und Moire-Technik vorgestellt. Das Ziel der Methode ist die Untersuchung und zahlenmäßigen Bestimmung von Spannungsfeldern in Abhängigkeit von der Zeit, die durch stoßartige Belastung verursacht sind. Die gleichzeitige Verwendung der beiden Meßtechniken führt zu einem hybriden Verfahren, mit dem neben reinen elastischen Spannungszuständen auch der Einfluß der Viskoelastizität und die örtliche plastische Verformung gezielt untersucht werden können.

2 Versuchsaufbau und die Technik

Der Versuchsaufbau ist in Bild 1 schematisch dargestellt.

Der Lichtstrahl, der vom Blitzgerät durch Polarisator, Viertelwellenplatte, Modell, an dessen Oberfläche ein Kreuzmoireraster als Objektraster angebracht wurde, geführt wurde, wird hinter dem Modell durch einen halbdurchlässigen Spiegel geteilt. Der Lichtweg 1 liefert über Kamera 1 das Moire-Bild, während

der Lichtweg 2, der vom halbdurchlässigen Spiegel reflektiert wird, durch die zweite Viertelwellenplatte und Analysator in die Kamera führt, die Isochromaten bietet.

Nach dem Stoß wird der Blitz nach einem eingestellten Zeitpunkt ausgelöst. Dadurch werden die Moirestreifen und die Isochromaten für den gleichen Zeitpunkt aufgenommen.

erscheint dann eine 'gemischte' Verschiebungsisothete von U und V.

Wird hier statt des Kreuzrasters ein Liniengitter parallel zu einer der beiden Koordinatenrichtungen gestellt, erhält man die entsprechende Koordinatenverschiebungsisothete U oder V. Da die Koordinatenverschiebung getrennt aufgenommen wird, muß man den gleichen Vorgang nochmal wiederholen, um die vollständigen Verschiebungsfelder zu erreichen.

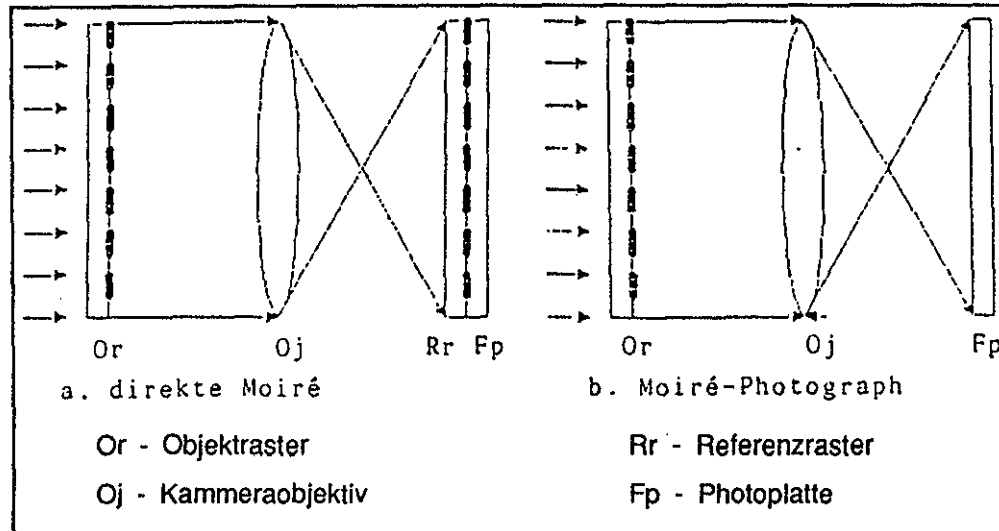


Bild 2: Moire-Aufnahmetechnik

Zur Trennung der Koordinatenisotheten von Moirestreifen stehen zwei Methoden zur Verfügung. Im Bild 2a wird ein Referenzraster unmittelbar vor das Fotomedium nämlich eine Photoplatte gestellt. Der verformte Objektraster wird durch die Objektive auf dem Referenzraster 1:1 abgebildet, die Moirestreifen werden dadurch in der Photoplatte aufgenommen. Wenn der Referenzraster ein Kreuzraster ist,

Die zweite Methode ist in Bild 2b dargestellt. Hier wird die Arbeit in zwei Phasen geteilt. Man bildet erst den Objektraster durch die Objektive genau 1:1 auf die Photoplatte ab. Sobald der Stoß und der Blitz ausgelöst wird, ist der verformte Objektraster in der Photoplatte aufgenommen. Überlagert man die Photoplatte mit dem Referenzraster, erscheinen gleich die Moirestreifen. Mit Hilfe

der Weißlichtzerlegung werden die Koordinatenverschiebungen getrennt und auch multipliziert.

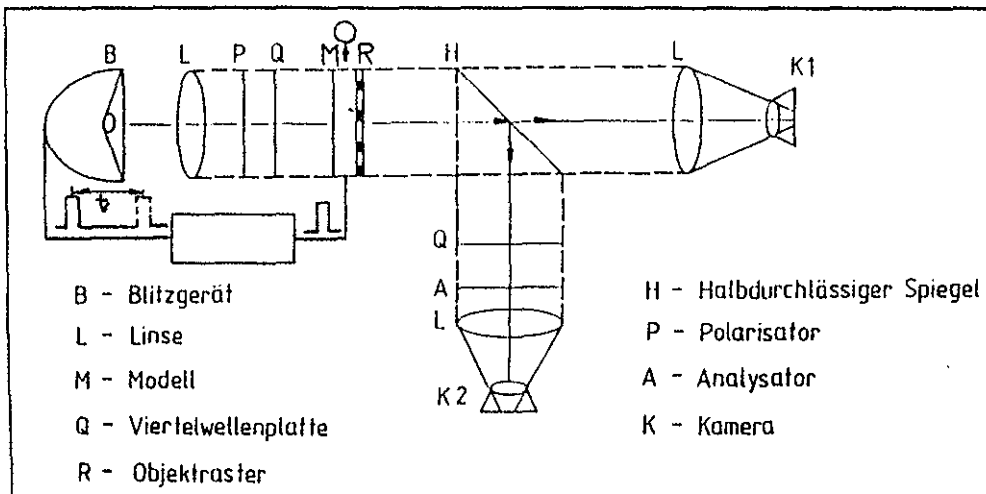


Bild 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

3 Die Weißlichtzerlegung

Zur Trennung der Koordinatenverschiebung und zur Multiplikation der Moirestreifen wird die Weißlichtzerlegung benötigt. Die optische Bank ist dargestellt im Bild 3.

Das parallel laufende Strahlenbündel aus der Weißlichtquelle wird hinter der Rasterpaarung gebeugt. Durch Linse 2 wird es an der Frequenzebene konvergiert. Es ist die erste optische Fouriertransformation, durch die zwei Interferenzordnungsreihen in der Frequenzebene erzeugt werden. In gleicher Ordnung wird es je nach der Wellenlänge bzw. der Farbe verteilt. Eine Filterplatte wird an die F-Ebene gestellt. Je nach Bedarf läßt man nur ein dünnes Lichtbündel in bestimmter Ordnung mit einem bestimmten Farbband filtern. Die Linse 3 liefert die Rücktransformation, die für die Erscheinung des Bildes mit entsprechender Information aus dem durchlaufenden Lichtbündel sorgt. Auf der Mattscheibe an der Bildebene erscheint nun die Verschiebungsisothete, die eine Koordinatenverschiebung ungestört von der anderen darstellt. Die Isotheten können noch multipliziert werden, indem man das Lichtbündel aus der höheren Interferenzordnung durchlaufen läßt.

Die Weißlichtzerlegung kann auch zur Farbkodierung und Bildspeichern benutzt werden.

4 Die Auswertung

Mit den Verschiebungsisotheten und Isochromaten läßt sich die Auswertung der Koordinatenspannungen, -dehnungen und Verschiebungen ohne weiteres durchführen.

Bild 4 zeigt das Flußdiagramm des Auswertungsprozesses im rein elastischen Fall. Durch die Splineflächenanpassung wird die Verschiebung rekonstruiert und das entsprechende Dehnungsfeld abgeleitet. Die beiden Normaldehnungen, die von den Verschiebungen abgeleitet werden, und die Hauptspannungsdifferenz reichen für den elastischen Fall aus.

Ein weiterer Vorteil davon ist, daß die Verschiebungs- und die Dehnungsfelder auch vorhanden sind. Sie werden zur Berechnung der Energiebilanz benötigt.

Für dynamisch viskoelastischen oder elasto-plastischen Spannungszustände kann man aus Verschiebungen die komplexen Dehnungsfelder berechnen. Aus den ermittelten Dehnungsfeldern und Isochromaten erhält man die Spannungsfelder. Hierbei muß man nach dem zeitabhängigen Materialgesetz kontinuierlich auswerten

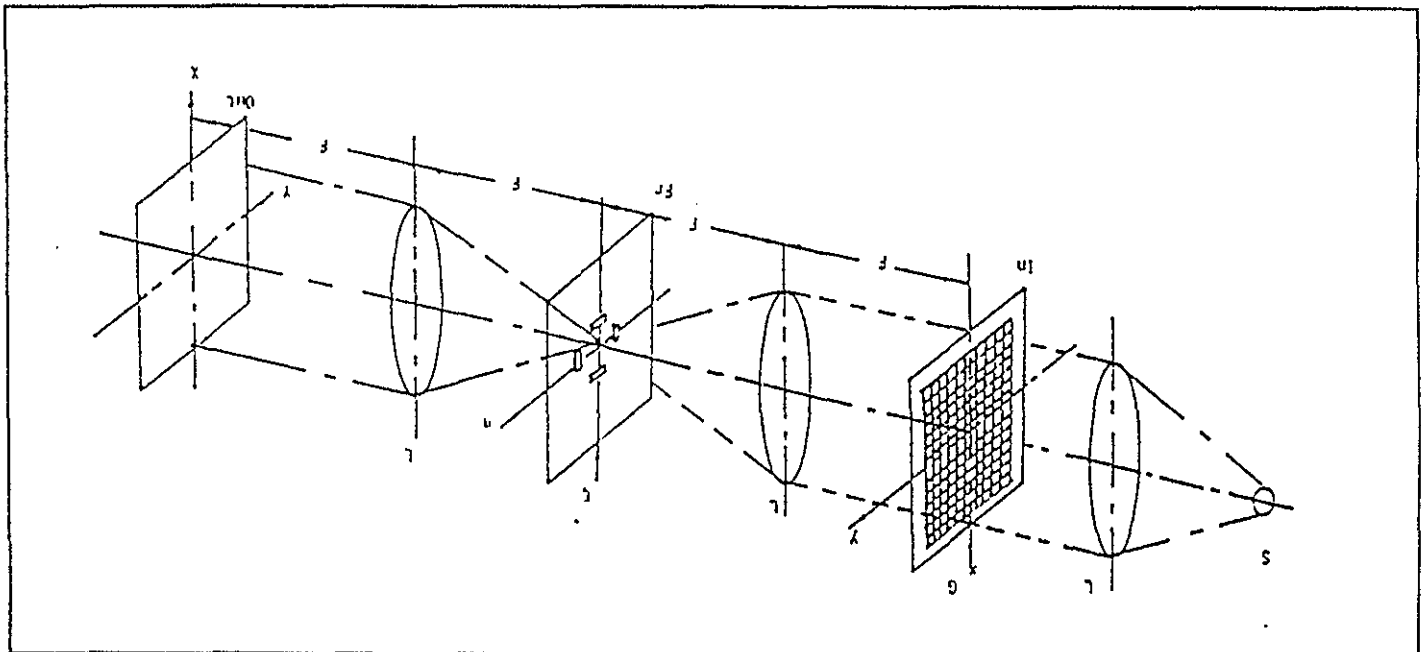


Bild 3: Optische Bank für Weißlichtzerlegung

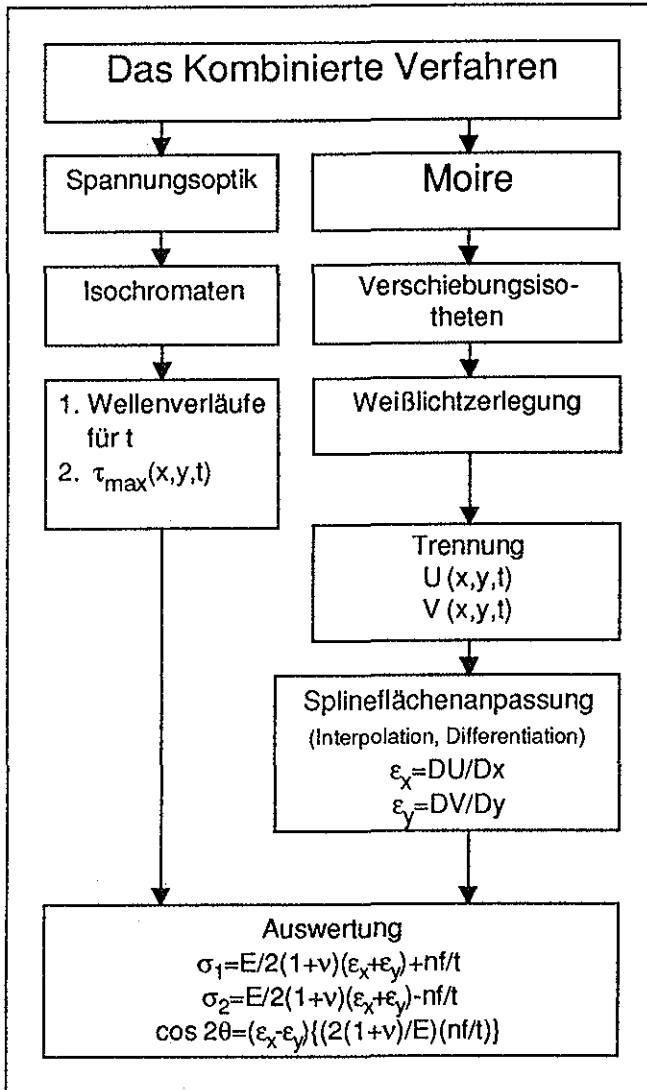


Bild4: Auswertungsschema

5 Versuchsdurchführung

Ein Vorversuch zum Testen des hybriden Meßverfahrens wurde durchgeführt.

Als Modell wurde hier eine rechteckige Platte (80 * 80 mm) aus Araldit GY255 genommen. Das Modell wurde durch ein fallendes Gewicht gestoßen. An der Kontaktstelle zwischen Gewicht und Modell wurde ein elektronischer Impuls ausgelöst, der eine stufenlos einstellbare Verzögerungseinrichtung (Retarder) triggert. Der Retarder löst dann nach der vorher eingestellten Verzögerungszeit die Blitzlampe aus. (siehe Bild 1) Durch den Lichtweg 1 wurden die Isochromaten bzw. durch den Lichtweg 2 die Moire-Streifen aufgenommen.

Bild 5 zeigt den Versuchsaufbau.

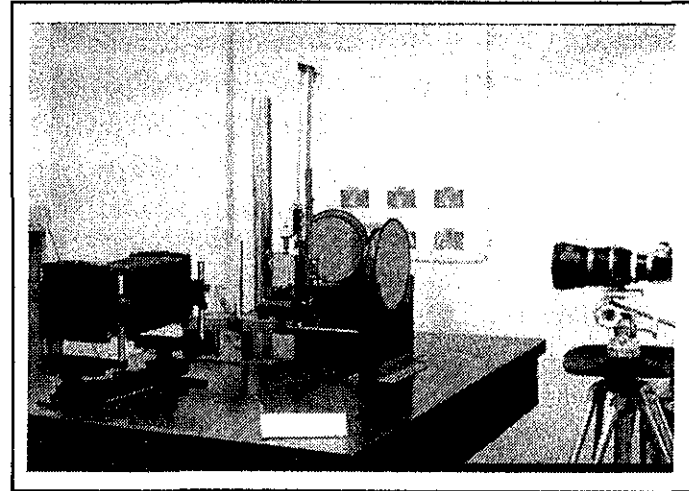


Bild5: Versuchsaufbau

Die Moire-Streifen wurden nach der zweiten Methode (Moiré-Photograph) aufgenommen. Mit Hilfe der Weißlichtzerlegung wurden die Verschiebungsisothermen U und V getrennt. Auf der optischen Bank (Bild 3) wurde die Rasterpaarung (die Referenz- und die Verformungsraster) in der Input Ebene gestellt, durch die erste Frequenzordnung in Y-Richtung wurden die Verschiebungsisothermen V aufgezeichnet. (siehe Bild 6 b). Durch die Frequenzordnung 2 in X und Y Richtung wurden die beiden zweifach multiplizierten Verschiebungsisothermen X und Y aufgenommen. (siehe Bild 6 c, d)

Bild 6 zeigt die Isochromaten und entsprechende Moire-Isothermen von 3 verschiedenen Zeitpunkten nach dem Stoß. Es war ein quasistatischer Stoß. Man sieht hier, daß sich die Verschiebungsisothermen mit den Isochromaten proportional bewegten. In Reihe b sind die Verschiebungsisothermen V, die nicht multipliziert sind. In Reihe c und d sind die Verschiebungsisothermen U und V, die 2 fach multipliziert wurden.

6 Zusammenfassung

Das hybride Meßverfahren mit der Kombination von Spannungsoptik und Moire bietet die Möglichkeit, die vollständige Information im dynamischen Vorgang zeitgleich aufzunehmen. Eine vollständige Auswertung von den Isochromaten, Isoklinen und Moire-Isothermen unter Unterstützung von Computer- und

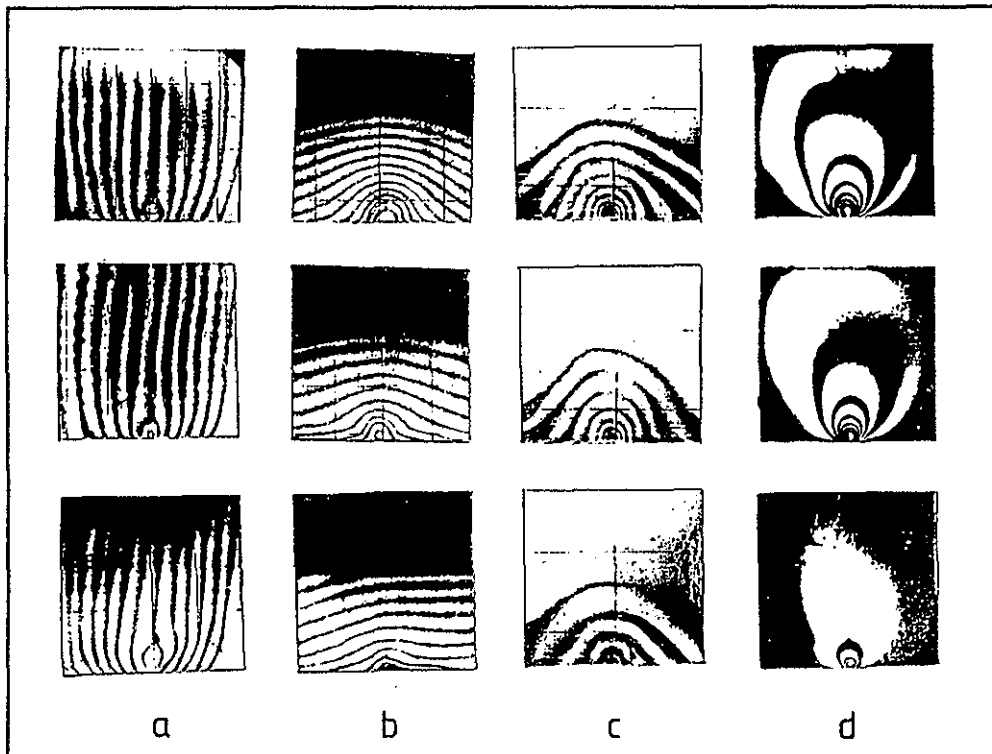


Bild 6: Aufnahme der Isochromaten und Moire-Isotheten

Bildverarbeitungstechnik erlaubt eine vollständige Bestimmung sowohl der Spannungs- als auch der Dehnungsfelder. Dadurch ist man in der Untersuchung unabhängig vom Werkstoffgesetz und kann sowohl das viskoelastische Verhalten als auch die lokal plastische Verformung gezielt untersuchen.

*

Dynamische spannungsoptische Untersuchungen über das Körperschallverhalten von Aggregateträgern

J. Albers
G. Wan

Einleitung

Im Zuge der Lärmbekämpfung wird es immer wichtiger, die Entstehung und Leitung von Körperschall an Maschinen zu reduzieren. Beispielsweise ist es ein Anliegen der Kraftfahrzeughersteller, die Ausbreitung von Körperschall über den Motor an die Karosserie zu verringern. Hierzu bedarf es einer günstigen Gestaltung der Lagerungen. Mit Hilfe der dynamischen Spannungsoptik ist es möglich, Aussagen über die Körperschallausbreitung in Bauteilen zu machen, indem diese Bauteile in Form von spannungsoptischen Modellen nachgebildet werden.

1 Körperschall und Körperwellen

Unter Körperschall versteht man die Erzeugung, Übertragung und Abstrahlung von zeitlich wechselnden Bewegungen und Kräften in festen Körpern. Dabei werden hauptsächlich Frequenzen im hörbaren Bereich, also von 16 bis 16.000 Hz betrachtet. Unter Körperwellen versteht man die Spannungswellen, die durch eine mechanische Störung wie Stoß oder Explosion ausgelöst werden und eine ständig veränderliche Massenteilchenbeschleunigung im Körper verursachen. Wenn die Stoßdauer kürzer als die Hälfte der Eigenschwingungsdauer ist, beeinflussen die Spannungswellen die Spannungsverteilung so stark, daß Spannungshöhe und -verteilung sich wesentlich von den Zuständen unter statischer Belastung unterscheiden. Dadurch verändert sich auch das akustische Verhalten.

2 Reflexion und Überlagerung von Spannungswellen

An der Peripherie eines Körpers werden die Spannungswellen gebrochen und reflektiert. Dadurch werden neue Wellen erzeugt, die sich vom Reflexionspunkt aus ausbreiten. Die einfallende Wellen-

energie wird durch Reflexion in andere Richtungen abgelenkt und zum Teil in einen anderen Energietyp umgewandelt.

Fällt eine Longitudinalwelle (P) mit Amplitude (A_1) an den Rand ein, so wird sie in eine reflektierte Longitudinalwelle mit Amplitude (A_2) und eine reflektierte Transversalwelle mit Amplitude (B_2) zerlegt. Ein Teil der eingestrahlichten Dilatationalenergie wird dadurch in Distortionalenergie umgewandelt. (s. Bild 1)

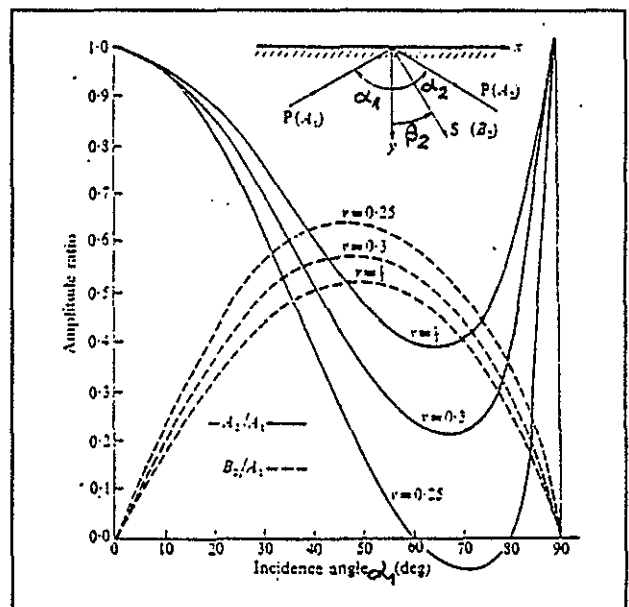


Bild 1: Reflexion einer Longitudinalwelle

Im Diagramm von Bild 1 ergeben sich die Amplitudenverhältnisse zwischen ein- und rückstrahlenden Wellen.

Bild 2 zeigt die Reflexion einer einfallenden Transversalwelle, die ebenfalls in eine reflektierte Longitudinalwelle mit Amplitude A_2 und eine reflektierte Transversalwelle B_2 verteilt wird. Hier wird ein Teil der Distortionsenergie in Dilatationsenergie umgewandelt.

Falls ein parallel laufendes Wellenbündel in eine gekrümmte Peripherie eines Körpers eintritt, werden die reflektierten Wellen je nach Krümmungsrichtung konvergiert oder divergiert (s. Bild 3 a, b).

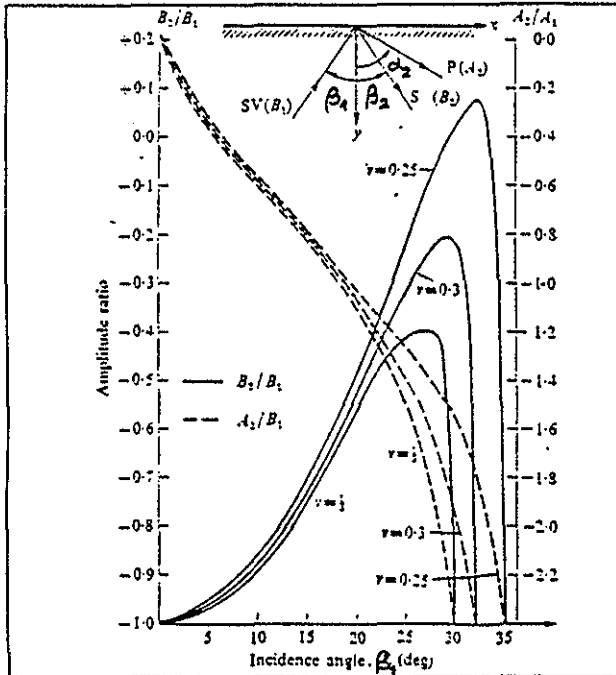


Bild 2: Reflexion einer Transversalwelle

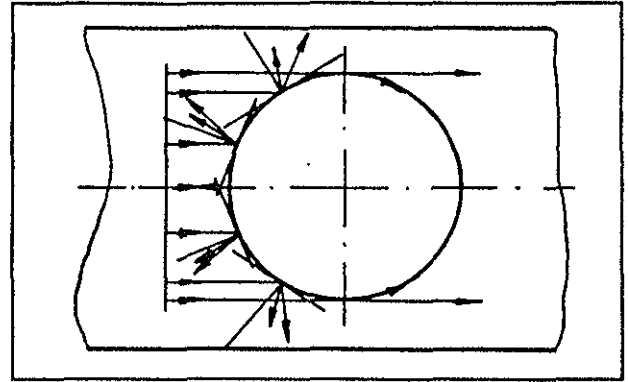


Bild 4: Reflexion der Spannungswelle an einem Loch

Wenn das Wellenbündel auf ein Loch trifft, so werden die Wellen am unteren Rand reflektiert und divergieren. Am Rand bildet sich eine neue Randwelle, die sich den Rand entlang langsam ausbreitet. So ist der Bereich oberhalb des Randes für eine kurze Zeit spannungsfrei bzw. isoliert. (s. Bild 4)

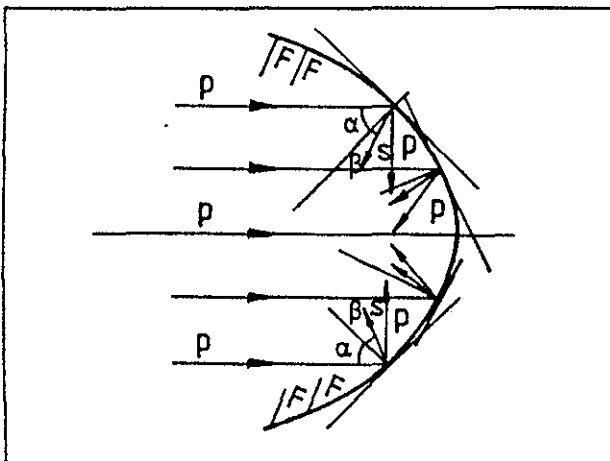


Bild 3a: Reflexion der Spannungswelle an einer konvexen Peripherie

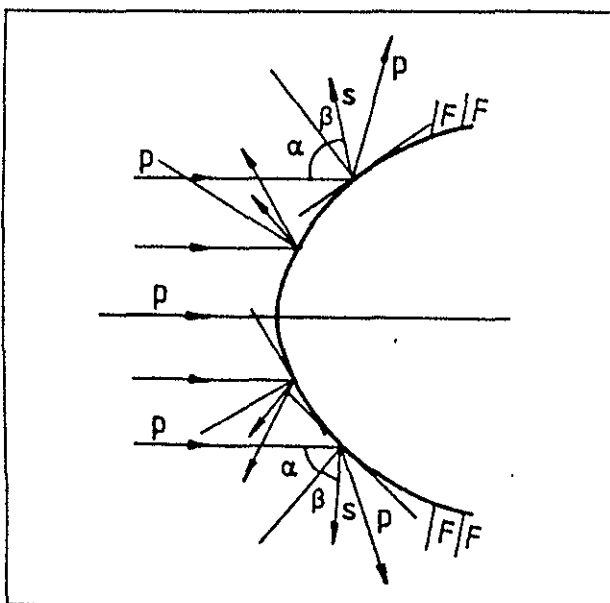


Bild 3b: Reflexion der Spannungswelle an einer konkaven Peripherie

3 Versuchstechnik

Der gummielastische Kern eines Aggregateträgers soll auf seine Eigenschaften bezüglich der Leitung von Körperschall untersucht werden. Die Untersuchung erfolgt anhand ebener spannungsoptischer Modelle aus Araldit nach der Methode der verzögerten Einzelblitze.

4 Modelle

Bild 5 zeigt den gummielastischen Kern des Aggregateträgers.

Für die spannungsoptische Untersuchung wurde die Struktur des Kerns als ebenes Modell im Maßstab 2:1 nachgebildet. Als Modellwerkstoff wurden Scheiben aus Araldit von 5 mm Stärke verwendet. Bild 8 zeigt das ebene Modell.

Zur qualitativen Beurteilung der Kernstruktur bezüglich Körperschalleitung wurden zwei weitere Modelle gleicher Größe aber unterschiedlicher Struktur für vergleichende Untersuchungen angefertigt.

- a) Ein Vollmodell Bild 6
- b) Ein Modell mit drei Bohrungen Bild 7

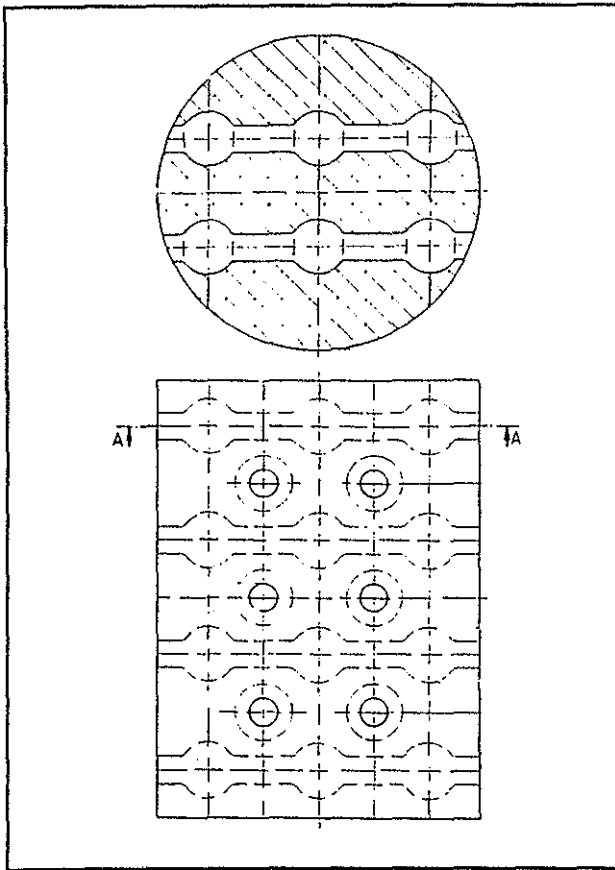


Bild 5: gummielastischer Kern

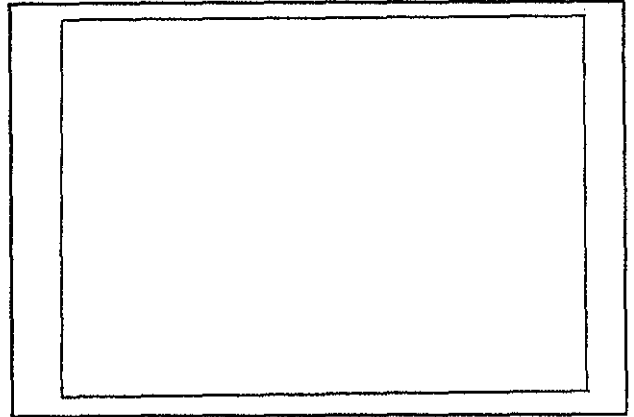


Bild 6: Vollmodell-

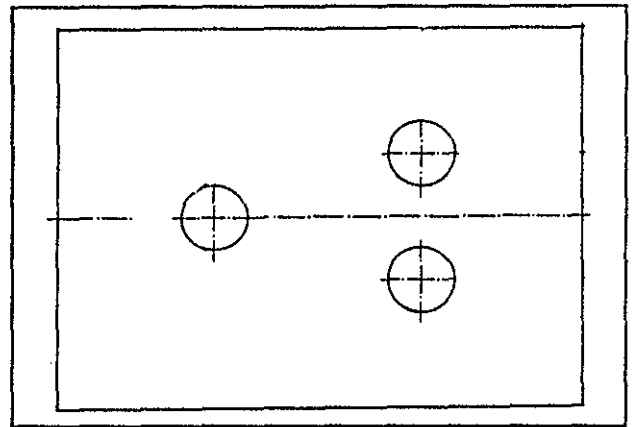


Bild 7: Modell mit drei Bohrungen

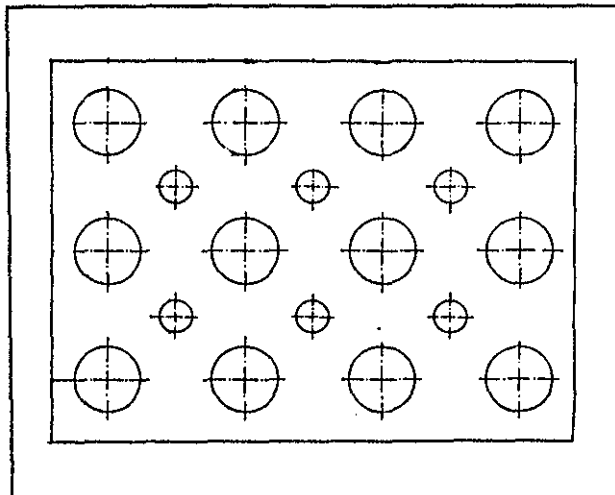


Bild 8: ebenes Modell

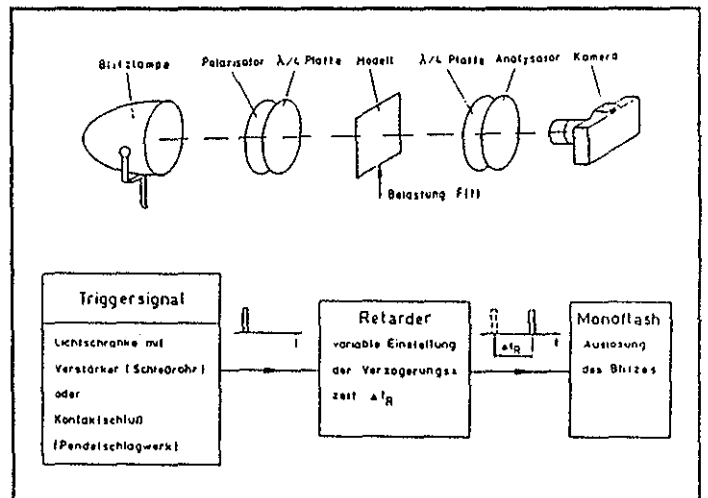


Bild 9: spannungsoptische Bank-

5 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden nach der Methode der verzögerten Einzelblitze in einer spannungsoptischen Bank durchgeführt (Bild 9). Die Stoßbelastung des Modells wird durch eine Wälzlagerkugel aufgebracht, die in einem Schießrohr (Bild 10) beschleunigt wird. Durch Auslösen eines Magnetventils wird das

Schießrohr mit Druck beaufschlagt, der die Kugel beschleunigt. Die verwendete Wälzlagerkugel hat einen Durchmesser von 5,5 mm, der Überdruck am Magnetventil beträgt 2,1 bar. Um das Modell nicht vorzeitig zu zerstören, prallt die Kugel zuerst auf eine Zylinderrolle, den sogenannten Amboß, der den Stoß an das Modell weiterleitet. Beim Durchlauf der Kugel durch das Schießrohr wird über eine Licht-

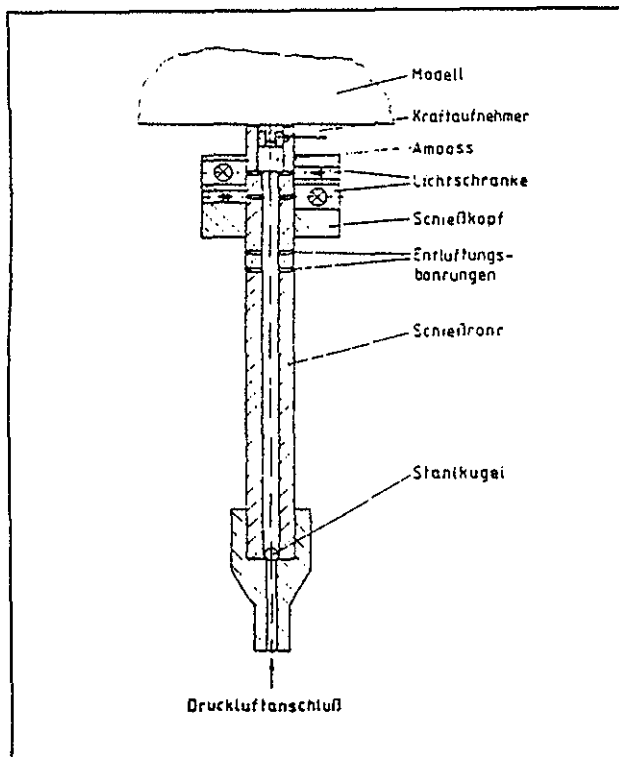


Bild 10: Schießrohr

schanke ein Impuls ausgelöst, der eine stufenlos einstellbare Verzögerungseinrichtung triggert. Dieser sogenannte Retarder löst dann nach der vor-eingestellten Verzögerungszeit eine Blitzlampe aus. Dieser Hochleistungsblitz hat eine Blitzdauer von 1 Mikrosekunde und eine Blitzenergie von 2,2 Ws. Das Spektrum ähnelt dem des Tageslichtes. Die Intensität ist ausreichend, um einen handelsüblichen Film zu belichten. Für die Aufnahme wird eine 16 mm Filmkamera mit Einzelschaltung eingesetzt. Durch die Variation der Verzögerungszeit am Retarder können so zu jedem beliebigen Zeitpunkt des Stoßvorganges Einzelbilder erstellt werden.

Durch die hohe Reproduzierbarkeit der Versuche ist es möglich, den Stoßvorgang in einer Reihe von Einzelbildern vollständig zu dokumentieren. Für jedes Modell wurden etwa 800 Einzelbilder im Abstand von 1 Mikrosekunde aufgenommen. Zur Dokumentation der Zeit wurde in jedes Bild eine Uhr eingeblendet, die die Zeit in Mikrosekunden nach Stoßbeginn anzeigt. Zusätzlich wurden mit einer Kleinbildkamera einzelne charakteristische Phasen des Stoßverlaufes in den jeweiligen Modellen festgehalten. Diese Fotos sind am Ende des Beitrags aufgeführt.

6 Das Ähnlichkeitsgesetz beim dynamischen Vorgang

Zur Übertragung der aus dem Modellversuch gewonnenen Ergebnisse auf die Hauptausführung sind auf Grund des Ähnlichkeitsgesetzes die folgenden Bedingungen zu erfüllen.

1. Ähnliche physikalische Vorgänge. Dazu gehören eine ähnliche Belastungsart und ähnliche Rand- und Anfangsbedingungen.
2. Lineare Maßstäbe der Dimensionen. (Länge und Zeit)
3. Materialähnlichkeit wie Homogenität, Isotropie usw.

Für ähnliche Vorgänge in Modell und Hauptausführung ist beim Stoßvorgang die Ähnlichkeit der Impulse zu fordern.

Für den Maßstab der Anstoßgeschwindigkeiten v_k muß gelten:

$$v_k = v_h / v_m = c_h / c_m = c_k$$

h = Hauptausführung

m = Modell

v = Anstoßgeschwindigkeit

c = Geschwindigkeit der Wellenausbreitung

c_k = Maßstab der Wellengeschwindigkeiten

Die Voraussetzung dafür ist, daß das Verhältnis der stoßenden Massen im Modellversuch gleich ist wie in der Hauptausführung.

$$M_{hst} / M_h = M_{mst} / M_m$$

M = Masse der Körper

st = stoßender Körper

7 Ergebnisse

Vollmodell (Bild 11 bis 14)

Bild 11 zeigt, wie sich die Wellenfront nahezu ungestört ausbreitet. In Bild 12 hat die Longitudinalwelle etwa die Mitte des Modells erreicht. In Bild 13 hat die Wellenfront den oberen Modellrand erreicht und wird reflektiert. Auch an den Seitenrändern treten verstärkt Reflexionen auf. Es kommt zu Überlagerungen der reflektierten Longitudinalwelle mit der langsameren Transversalwelle. Im weiteren Verlauf des Vor-

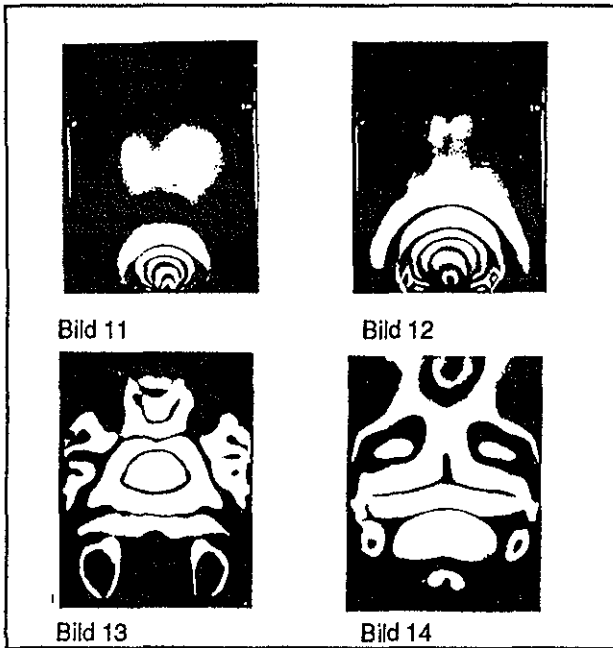


Bild 11 bis 14: Stoßverlauf Vollmodell-

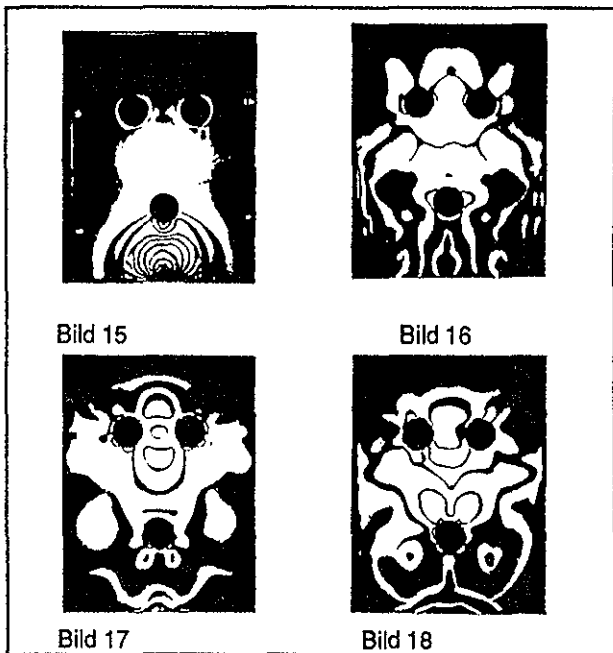


Bild 15 bis 18: Stoßverlauf Modell mit drei Bohrungen-

ganges ist erkennbar, daß die Spannungswellen sich im ersten Durchlauf nahezu ungedämpft zwischen dem oberen und dem unteren Modellrand ausbreiten können (Bild 14).

Modell mit drei Bohrungen (Bild 15 bis 18.)

Bild 15 zeigt, daß die Wellenfront an der unteren Bohrung aufgebrochen wird und daß von der Bohrung bereits eine Rückreflexion einsetzt. In Bild 16 ist erkennbar, daß an den oberen Bohrungen eine weitere Aufspaltung der Wellenfront stattgefunden hat. Über den Bohrungen bilden sich keilförmige spannungsfreie Zonen aus. An den seitlichen Rändern etwa auf halber Höhe des Modells haben sich Spannungskonzentrationen gebildet. Auf den weiteren Bildern erkennt man, daß sich um die Bohrungen Spannungskonzentrationen bilden. Es ist festzustellen, daß durch den relativ großen Abstand der oberen Bohrungen ein Teil der Wellen zum oberen Rand des Modells durchlaufen kann (Bild 17, 18).

Modell mit 18 Bohrungen (Bild 19 bis 22)

Bild 19 läßt erkennen, daß die Wellenfront schon an der unteren Lochreihe völlig aufgebrochen wird. Zwischen den Bohrungen treten starke Reflexionen auf. In den nächsten Bildern (Bild 20 bis 22) sieht man, daß auch an den folgenden Lochreihen die Span-

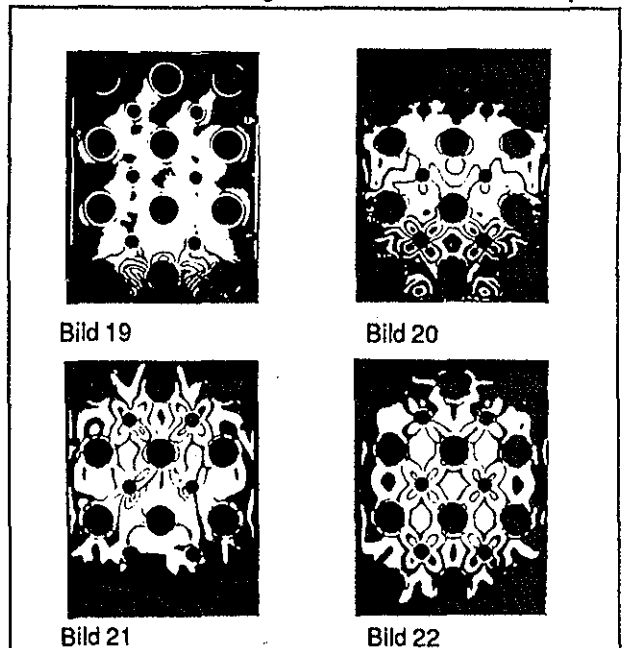


Bild 19 bis 22: Stoßverlauf Modell mit 18 Bohrungen

nungswellen stark reflektiert werden und nur ein Teil der Wellen das Modell ganz durchläuft. An den Bohrungen selbst treten verstärkt Spannungskonzentrationen auf, während der obere und untere Rand nahezu spannungsfrei sind. Die Spannungswellen werden fast ausschließlich zwischen den Lochreihen und den Bohrungen selbst reflektiert und überlagert.

8 Zusammenfassung

Am Vollmodell erkennt man, daß die Spannungswellen fast ungehindert den oberen Rand des Modells erreichen und im gesamten Modell hin und her pendeln. Der Körperschall wird also gut weitergeleitet.

Etwas besser ist das Verhalten des Modells mit drei Bohrungen. Hier kommt es durch die Bohrungen zu einem Aufbrechen der Wellenfront. Es treten verstärkt Überlagerungen und Reflexionen auf, der obere und untere Rand des Modells werden nicht so stark beansprucht wie beim Vollmodell. Die Körperwellen werden besser gedämpft.

Am günstigsten verhält sich das Modell mit 18 Bohrungen, das der Struktur des Gummikerns nachempfunden ist. Schon an den unteren Lochreihen wird die Wellenfront total aufgebrochen. Die Spannungswellen erreichen den oberen Rand nur noch sehr abgeschwächt. Zwischen den Lochreihen werden die Wellen hin und her reflektiert, die Ränder werden kaum beansprucht. Die Körperwellenabkopplung ist sehr gut. Allerdings treten an den Lochrändern und zwischen den Lochreihen hohe Spannungskonzentrationen auf, so daß hier im Bauteil mit einer hohen Materialbeanspruchung zu rechnen ist. Bei einer dauernden stoßartigen Beanspruchung im Betrieb tritt möglicherweise eine Erwärmung des Bauteils auf, da die durch den Stoß eingebrachte Energie das Teil nicht durchläuft, sondern zwischen den Löchern und Lochreihen durch die Dämpfung in Wärme umgesetzt wird.

Digitale Signalanalyse - Möglichkeiten und Grenzen

M. Quaß

Inhalt:

- 1 Einleitung
- 2 Signalerfassung
- 3 Analysemethoden
 - 3.1 Zeitbereich
 - 3.1.1 Autokorrelation
 - 3.1.2 Kreuzkorrelation
 - 3.2 Frequenzbereich
 - 3.2.1 Fourieranalyse
 - 3.2.2 Cepstrum und Backstrum
 - 3.2.3 Spektrale Leistungsdichte (Autospektrum)
 - 3.2.4 Spektrale Kreuzleistungsdichte (Kreuzspektrum)
- 4 Abgrenzung der digitalen von der analogen Signalverarbeitung
- 5 Zusammenfassung
- 6 Literaturhinweise

1 Einleitung

Massenproduktion aufgrund standardisierter Bauteile, zunehmende Miniaturisierung und daher günstige Preise - das sind Gründe für den wachsenden Anteil der Digitaltechnik auf vielen Gebieten, so auch in der Meßwertverarbeitung. In dem Bewußtsein, daß die Meßwertempfänger oder -wandler für mechanische Größen auch in dieser Zeit noch analog arbeiten, spricht man von digitaler Meßwertverarbeitung und nicht von digitaler Messung.

Daraus ergibt sich der umfangreiche Problembereich der Analog/Digital- Wandler (ADC), der in diesem Aufsatz jedoch nur am Rande behandelt werden soll. Im Mittelpunkt steht vielmehr der Versuch, eine Übersicht über die verwirrende Vielfalt einiger unterschiedlicher, z. T. mit mißverständlichen Bezeichnungen betitelter Analysemethoden zu geben, die nicht zwingend auf Digitaltechnik angewiesen sind, die aber wegen der Vorteile der Digitaltechnik (Geschwindigkeit, Genauigkeit usw., s.u.) ein besonderes Gewicht in der Meßtechnik erlangt haben.

Dazu gehören die schon eher "klassischen" Analyseverfahren wie z. B. die Fast-Fourier-Transformation (FFT) ebenso wie die neueren, durch bestimmte Rechenoperationen begründeten Verfahren (zunächst ohne physikalischen Hintergrund) wie Cepstrum und Backstrum.

2 Signalerfassung

Am Anfang jeder Meßkette steht ein Meßwertempfänger, der bei der Messung mechanischer Größen beispielsweise (Kraft, Druck, Beschleunigung usw.) üblicherweise einen Meßwandler darstellt. Gewandelt wird häufig direkt in eine elektrische Größe (Strom, Spannung, Ladung, Widerstand), die dann von einem Anpassungsverstärker für die weitere, in diesem Falle digitale Verarbeitung zur Verfügung gestellt wird.

Die Schnittstelle zwischen dem analogen und dem digitalisiertem Signal ist ein sogenannter A/D-Wandler. In diesem Wandler wird das Analogsignal mit einer bestimmten Frequenz abgetastet, d. h. die wechselnde Signalamplitude wird in äquidistanten Zeitschritten gemessen. Das Ergebnis ist eine Treppenfunktion, die also für eine gewisse Zeitspanne Δt einen festen Amplitudenwert besitzt (Bild 1).

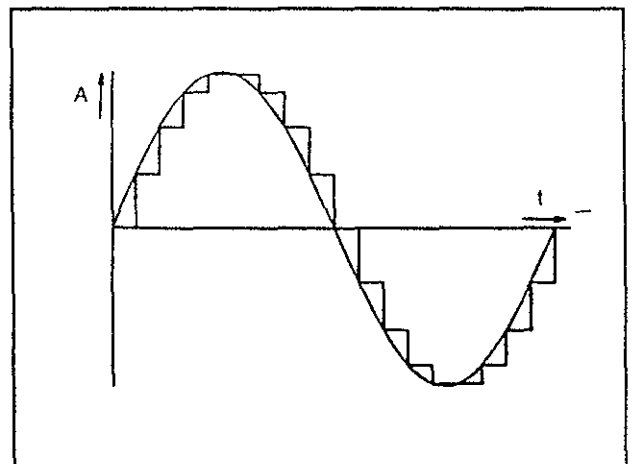


Bild 1: Treppenfunktion durch Digitalisierung: das Sinussignal wird in diesem Beispiel mit 18facher Frequenz abgetastet.

Solche "quantisierten" Signale lassen sich nun digital speichern und bearbeiten.

Von großer Bedeutung für die Zuverlässigkeit der Auswertung ist in diesem Zusammenhang das Verhältnis der maximalen Abtastfrequenz des A/D-Wandlers zu der maximalen Frequenz des Meßsignals. Nach einem von Shannon formulierten Abtasttheorem sollte die Abtastfrequenz mindestens doppelt so groß sein wie die höchste im Meßsignal vorkommende Frequenz. Wird dieses Theorem nicht beachtet, so kann es zum sogenannten Aliasing-Effekt kommen, d. h. im digitalisierten Signal verändern sich bestimmte Frequenzen zu ihren "Alias"-Frequenzen, die im ursprünglichen Signal nicht notwendigerweise vorhanden sein müssen. Anschaulich sei dieser Effekt im Bild 2 dargestellt.

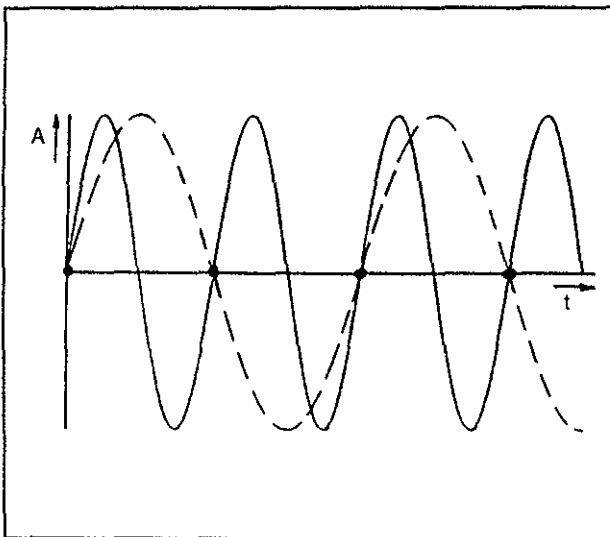


Bild 2: Verletzung des Abtasttheorems: das Signal (durchgezogene Kurve) wird mit der halben Frequenz in den Nulldurchgängen abgetastet. Die sich ergebende Frequenz ist 0 Hz.

Da die Abtastfrequenz üblicherweise gerätespezifisch vorgegeben ist, muß das Signal in seinem zu messenden Frequenzbereich entsprechend dem Abtasttheorem mittels Tiefpaßfiltern angepaßt werden. Diese Filter heißen dann, ihrem Zweck entsprechend, Anti-Aliasing-Filter.

An solche Filter werden sehr hohe Anforderungen bezüglich der Flankensteilheit gestellt. Ideal wären Rechteckfilter mit vollständiger Dämpfung oberhalb ihrer Eckfrequenz, die jedoch nicht realisierbar sind.

Praktisch darf die Eckfrequenz, in diesem Zusammenhang auch Grenzfrequenz genannt, nicht, wie sonst üblich, beim 3 dB-Dämpfungspunkt liegen, sondern es sollte die vorhandene Amplitudendynamik des A/D-Wandlers als Mindestdämpfung für Signalfrequenzen oberhalb der halben Abtastfrequenz angestrebt werden. Die Dynamik hängt ab von der Auflösung n des ADC in Bit und errechnet sich zu

$$D = 20 \log(2^n)$$

Für eine Auflösung des Wandlers von 10 Bit ergibt sich eine Dynamik von 60 dB. Sehr gute Tiefpaßfilter erreichen derzeit eine Flankensteilheit von 120 dB pro Oktave. Das bedeutet, daß für dieses Beispiel die höchste zu messende Frequenz etwa ein halbe Oktaven unterhalb der nach dem Shannon-Theorem errechneten Frequenz liegen muß.

3 Analysemethoden

Einige häufige Analysemethoden sind in den folgenden Kapiteln, in Zeitbereichs- und Frequenzbereichsmethoden untergliedert, dargestellt. Häufig wird im Zusammenhang mit digitalen Auswertungsverfahren auch von "Zeitreihenmethoden" gesprochen. Bei Natke /1/ wird eine Zeitreihe als die geordnete Menge einer Folge definiert, "die das zu bestimmten Zeiten abgetastete Signal bildet". Damit ist klar, das jedes digitalisierte Signal eine Zeitreihe, also keine Zeitfunktion mehr, darstellt, und alle hier vorgestellten Verfahren auch unter den Zeitreihenverfahren eingeordnet werden können.

3.1 Zeitbereich

3.1.1 Autokorrelation

Bei der Autokorrelation werden die Amplituden eines begrenzten Zeitsignals mit den entsprechenden Werten eines identischen, aber zeitlich um einen bestimmten Wert verschobenen Zeitsignals multipliziert, und die Produktsumme aller Einzelwerte gebildet. Die Korrelationsvorschrift lautet:

$$k_{xx}(\tau) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n(n \cdot \Delta t) \cdot x_n(n \cdot \Delta t + \tau)$$

Für die Zeitverschiebung $\tau = 0$ ergibt sich z. B. für ein Rauschsignal eine maximale Produktsumme, die mit zunehmender Zeitverschiebung τ immer kleiner wird. Dies zeigt Bild 3a; hier ist die Produktsumme über die Zeitverschiebung τ aufgetragen. Aus der Sinusfunktion wird durch die Autokorrelation eine Cosinusfunktion (Bild 3b).

Die Autokorrelation des Rauschens geht für große Zeitverschiebungen gegen Null, während die Autokorrelation eines periodischen Signals ungedämpft bleibt. Daher bietet sich als mögliche Anwendung an, periodische Signale aus einem Rauschhintergrund herauszuheben (Bild 3c). Es ist allerdings anzumerken, dass durch die Autokorrelation die Phaseninformation verlorengeht.

signale und die sie anregenden, ursächlichen Signale vergleichen. Auch in Echoeinrichtungen, z.B. beim Radar oder in der Geophysik, wird die Kreuzkorrelation zur Signalidentifikation eingesetzt.

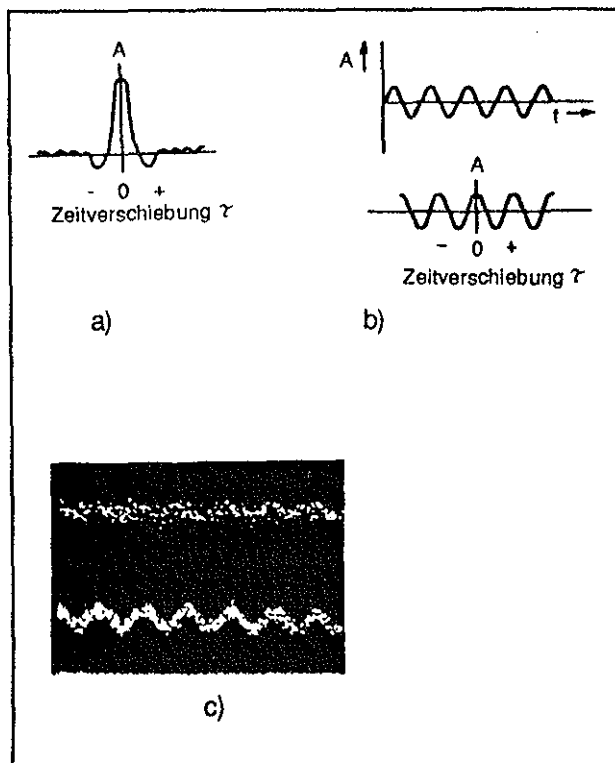


Bild 3: a) Autokorrelation eines Rauschsignals
 b) Autokorrelation eines Sinus-Signals
 c) Sinus-Signal, verdeckt durch Rauschen (oben) und das Ergebnis der Autokorrelation

3.1.2 Kreuzkorrelation

Die Kreuzkorrelation vergleicht nicht zwei zeitverschobene Zeitreihen des gleichen Signals, sondern zwei unterschiedliche Signale. Die Rechenvorschrift entspricht grundsätzlich der der Autokorrelation:

$$k_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n(n \cdot \Delta t) \cdot y_n(n \cdot \Delta t + \tau)$$

Mit der Kreuzkorrelation wird die Ähnlichkeit zweier Signale ermittelt, und zwar in Abhängigkeit von der Zeitverschiebung τ . Gleiche (korrelierte) Anteile beider Signale werden hervorgehoben, während nichtkorrelierte Anteile, auch Rauschen oder Störsignale, reduziert oder unterdrückt werden. So lassen sich in der Akustik beispielsweise auch Körperschall-

3.2 Frequenzbereich

3.2.1 Fourieranalyse

Jedes periodische Signal kann man sich als Summe aus einer definierten Anzahl von reinen Sinus- und Cosinus-Schwingungen denken. Diese Summe der Einzelschwingungen wird nach J.B. Fourier auch Fourierreihe genannt. Auch die Rücktransformation ist möglich, sofern man von den Einzelanteilen die Amplitude und die Phasenlage kennt.

Die einzelnen Amplituden in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen ergeben das Amplitudenspektrum. Für periodische Signale ergibt sich immer ein Linienspektrum. Bei zeitbegrenzten oder einmaligen Vorgängen (Transienten, Impulse) rücken die Linien beliebig dicht zusammen, so daß sich ein kon-

tinuierliches Spektrum ergibt (Fourierintegral, Bild 4). Man spricht dann von der Spektraldichte einer nicht-periodischen Funktion.

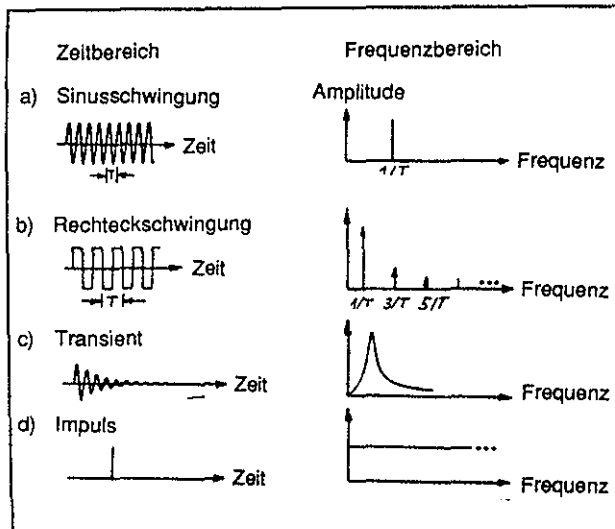


Bild 4: Beispiele für Fourieranalysen unterschiedlicher Signale

Da der A/D-Wandler meist nur zeitliche Ausschnitte des zu messenden Signals erfassen kann, müssen für die FFT Randbedingungen an den künstlichen Grenzen (Signalbeginn und Signalende) festgelegt werden. Probleme bereitet die Fourieranalyse bei der Erfüllung der Randbedingungen. Unstetigkeiten müssen hier auf jeden Fall vermieden werden, da sonst Frequenzen erzeugt werden, die im Ursprungssignal nicht oder mit anderer Amplitude und Phase enthalten sind.

Daher definiert man Fensterfunktionen, mit denen der Signalausschnitt bewertet wird, um die Randbedingungen zu erfüllen. Es gibt unterschiedliche Fenstertypen, die alle einen Kompromiß zwischen der Amplitudentreue und der Frequenztreue des verarbeiteten Signals darstellen. Das wegen seines guten Kompromisses am häufigsten verwendete ist das Hanning - Fenster. Für bestimmte Zwecke sind aber auch spezielle Fensterfunktionen besser geeignet /5/.

Die Wirkung des Hanning - Fensters auf die FFT eines zeitlich unbegrenzten periodischen Signals zeigt Bild 5.

Die Rechenvorschrift für die Fourier-Reihe lautet:

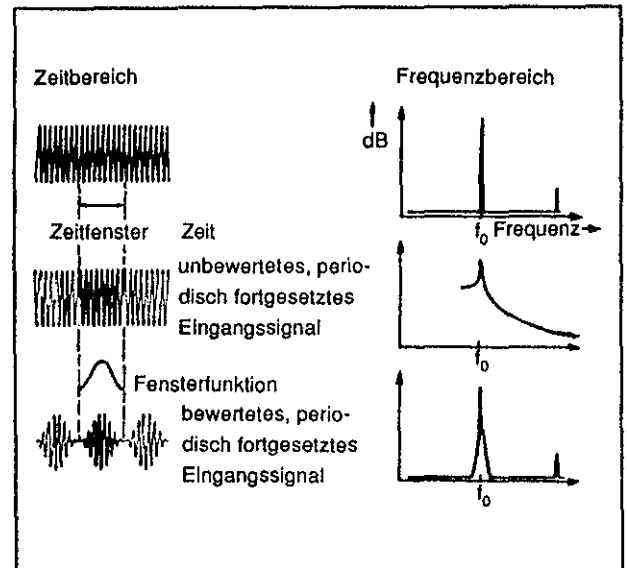


Bild 5: Wirkung der Fensterfunktion

- Originalsignal
- Fourieranalyse des abgetasteten Bereichs ohne Fensterfunktion
- Fourieranalyse mit Fensterfunktion

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=0}^{\infty} \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \cdot \cos(n \cdot \omega_0 \cdot t + \varphi_n)$$

A_n und B_n sind die Fourierkoeffizienten, deren Berechnung z. B. bei Natke /1/ angegeben wird.

Zur Berechnung der Fouriertransformation eines digital dargestellten Signals sind einige Anpassungen vorzunehmen, da eben keine kontinuierliche Funktion vorliegt. Der sich daraus ergebende Algorithmus wird diskrete Fouriertransformation (DFT) genannt. Da diese Rechnungen einen großen Rechenaufwand erfordern, nutzt man bestimmte Symmetrieeigenschaften der DFT aus, wodurch sich eine enorme Rechenzeiterparnis von z.B. 99% bei $N=1024$ Stützstellen ergibt /2/. Angesichts dieser Geschwindigkeitsverbesserung wird dieser Transformationsalgorithmus als Fast Fourier Transformation (FFT) bezeichnet.

Mit der FFT werden direkt bestimmte Frequenzen in einem Signal sichtbar, die man aus einer Zeitfunktion nicht reiner Sinus- oder Cosinusschwingungen nicht entnehmen kann, so z. B. Eigenschwingungen und deren Harmonische, Anregungsfrequenzen usw. Im Gegensatz zur Korrelation sind periodische Signale mit kleinen Amplituden hinter einem Rauschsignal oft nur zu erkennen, wenn man die

gesuchte Frequenz kennt, da Rauschen durch den FFT- Algorithmus nicht unterdrückt wird.

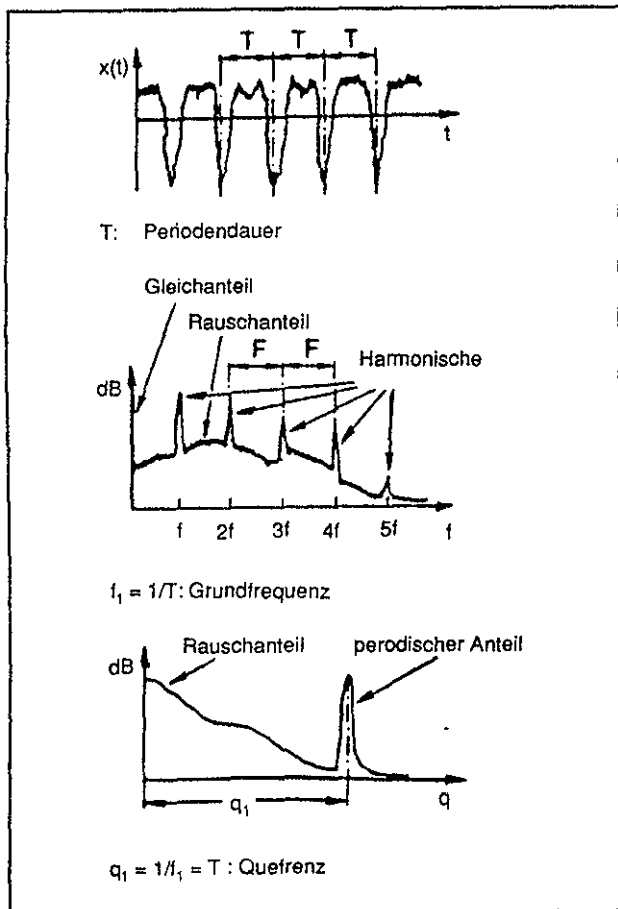


Bild 6: Anwendungsbeispiel für das Cepstrum nach /3/

3.2.2 Cepstrum und Backstrum

Cepstrum und Backstrum sind Kunstwörter, mit denen zwei Algorithmen bezeichnet werden, die das Ergebnis einer FFT- Analyse weiterverarbeiten.

Cepstrum bedeutet, daß das Amplitudenspektrum wiederum als Zeitsignal aufgefaßt wird und darauf wieder die FFT angewendet wird. Damit ergibt sich für die unabhängige Größe der Reihe erneut die Dimension einer Zeit, die dann Queffrequenz genannt wird.

Wenn im Frequenzbereich nach der ersten Fourieranalyse harmonische Anteile des Signals vorhanden sind, so werden diese im Cepstrum durch einen einzigen Spitzenwert dargestellt. Daraus ergeben sich z.B. Vorteile bei der Maschinenüberwachung mittels Beschleunigungsmessungen. Die Beobachtung kann sich auf einen einzigen Wert im Cepstrum, der Queffrequenz von kritischen Harmonischen, konzentrieren (Bild 6).

Backstrum ist eine vom Institut für hydraulische und pneumatische Steuerungen in Aachen (IHP) entwickelte Alternative zum Cepstrum, die bestimmte Nachteile für die Maschinenüberwachung vermeiden soll /3/. Das Backstrum greift nicht auf das logarithmierte Spektrum zurück (wie das Cepstrum), sondern verarbeitet direkt das lineare Amplitudenspektrum.

3.2.3 Spektrale Leistungsdichte (Autospektrum)

Es ist möglich, aus der Autokorrelation die Frequenzinformation zu gewinnen, wenn man auf die Korrelierte die FFT anwendet. Das Ergebnis wird als spektrale Leistungsdichte des Signals oder auch Autospektrum bezeichnet. Der Begriff Leistung bezieht sich auf die quadrierende und mittelnde Operation bei der Korrelation. Ein Bezug auf die physikalische Leistung wird nicht notwendigerweise vorgenommen.

Die spektrale Leistungsdichte vereint die Vorzüge der Autokorrelation, nämlich ein Signal aus einem Rauschhintergrund herauszuholen, mit den Vorteilen der FFT, die Frequenzen des Signals übersichtlich darzustellen.

Nachteilig ist, daß die Information über die wahre Amplitude versteckt und die Phaseninformation verloren ist.

3.2.4 Spektrale Kreuzleistungsdichte (Kreuzspektrum)

Ebenso wie bei der Autokorrelation läßt sich auch auf die Kreuzkorrelation die Fourieranalyse anwenden. Als Ergebnis erhält man die spektrale Kreuzleistungsdichte oder kurz das Kreuzspektrum. Dieses enthält, wie schon die Kreuzkorrelation, nur Frequenzen, die den beiden zu vergleichenden Signalen gemeinsam sind.

Bezüglich der Begriffsbildung gilt das über die spektrale Leistungsdichte Gesagte entsprechend. Das Kreuzspektrum ist ein nützliches Werkzeug z. B. in der Modalanalyse, auf die an dieser Stelle aber nicht weiter eingegangen werden soll.

Ein gegenüber dem Autospektrum bedeutender Vorteil ist, daß die Phaseninformation der Signalanteile im Kreuzspektrum erhalten bleibt.

4 Abgrenzung der digitalen von der analogen Signalverarbeitung

Die Frage nach den Vor- und Nachteilen der analogen und digitalen Signalverarbeitung muß auf zwei Ebenen beantwortet werden, die sich jedoch in weiten Bereichen überlappen. Die eine Ebene beinhaltet die gerätespezifischen Eigenschaften, die andere Ebene wird von dem erzielbaren Ergebnis einer Analyse, also deren Nutzen geprägt.

Gerätespezifisch ergeben sich für die digitale Signalverarbeitung einige gewichtige Vorteile:

1. Digitale Systeme können (abhängig von den vorgeschalteten Geräten) genauer sein, da sie einen höheren Dynamikbereich als analoge Systeme und damit auch eine größere Auflösung besitzen. Die Dynamik sehr guter Digitalgeräte ist mit 70 dB bis 90 dB etwa um den Faktor zwei bis drei höher als bei Analogsystemen.
2. Digitale Systeme sind schneller als viele Analogsysteme.
3. Digitale Systeme bieten eine ausgezeichnete Wiederholgenauigkeit, da gerade durch die Digitalisierung des Signals Umwelteinflüsse wie Temperaturänderungen z. B. kaum Einfluß auf die Signalverarbeitung haben.
4. Digitale Systeme bieten außerdem einen hohen Grad an Flexibilität. Anpassung der Auswertung an eine bestimmte Meßaufgabe kann durch einfachen Komponentenaustausch bei festverdrahteten Prozessoren erfolgen. Noch einleuchtender ist dieses Argument, wenn man von programmierten Funktionen ausgeht. Bei analogen Systemen muß in jedem Fall eine Impedanzanpassung der einzelnen Geräte erfolgen. Dazu sind in jeder Stufe hochwertige Verstärkerschaltungen erforderlich, um das Ursprungssignal bezüglich Amplitude, Frequenz und Phase nicht zu verfälschen.

Andererseits wird dem Anwender von digitalen Signalanalysegeräten häufig eine verwirrende Vielfalt von Programmelementen geboten, die die große Gefahr der Fehlprogrammierung und somit Fehlinterpretation der Ergebnisse birgt. Diese Gefahr ist bei analoger Technik geringer, da sich der Anwender hier mit der korrekten Verschaltung der Geräte beschäftigen muß, das "Knöpfe drücken" steht erst an zweiter Stelle.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß es ein Gerät der Analogtechnik ist, nämlich der Tiefpaßfilter, der die Genauigkeit der Digitaltechnik erst nutzbar macht, und der auch nicht durch einen Digitalfilter ersetzt werden kann, es sei denn, die Abtastraten der A/D-Wandler sind für die höchsten im zu messenden Signal vorkommenden Frequenzen ausreichend groß, was derzeit in vielen Anwendungsbereichen an technische Grenzen stößt. Aufgrund der zuvor genannten Vorteile der Digitaltechnik setzt sich diese gegenüber der Analogtechnik immer mehr durch, denn die Nachteile sind sekundärer Natur und bei entsprechender Sorgfalt in der Anwendung nicht bedeutend.

5 Zusammenfassung

In dem vorliegenden Aufsatz wird die digitale Signalanalyse als eine sich in ihrem Anwendungsbereich immer mehr ausdehnende Alternative zur analogen Signalverarbeitung vorgestellt. Die wichtigsten Analyseverfahren werden erfaßt und mögliche Einsatzfelder beispielhaft genannt. Auch Nachteile der Digitaltechnik gegenüber Analogsystemen, so z.B. der "Aliasing"-Effekt werden beschrieben und die Konsequenzen dargelegt.

Weiterführende Informationen zu den genannten Verfahren können hier nicht gegeben werden, um den Rahmen nicht zu sprengen. Diesbezüglich sei auf die Literaturangaben verwiesen.

Aus der Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile ergeben sich auch Grenzen für die ausschließliche Anwendung einer einzigen Technik. So müssen sich auch zukünftig, betrachtet man die gesamte Meß- und Auswertetechnik, die digitale und die analoge Signalverarbeitung gegenseitig ergänzen, um optimale Ergebnisse zu erzielen. *

6 Literaturhinweise

- /1/ Natke, Einführung in die Theorie und
 Hans Günther Praxis der Zeitreihen und Mo-
 dalanalyse
 Verlag Vieweg + Sohn,
 Braunschweig 1983
- /2/ Pläging, J. Neue "Digitale Signalaufberei-
 tung" und ihre Einsatzmöglich-
 keiten in der Zukunft
 Vortragsmanuskript
 Transamerica Instruments
 GmbH, Reichelheim 1988
- /3/ Ritter, M. Schallanalyse in der Scha-
 Schwarz, T. densdiagnose
 Welschoff, B o+p 32 (1988), Nr. 3
- /4/ Chamberlain, Die Zeitreihenanalyse
 Leo J. Elektronik 21 (1972)
 Nr. 7,8,9
- /5/ Hauser, RTA- Frequenzanalyse unter
 Dr.- Ing. besonderen Signalbedingun-
 gen
 Seminarvortrag, Goslar 1987
- /6/ Keuper, G. Geräte und Verfahren zur digi-
 talen Signalanalyse
 o+p 31 (1987), Nr. 5

Lebensläufe

Albers, Jürgen: Jahrgang 1959, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal. Seit 01.08.86 wiss. Mitarbeiter am IMW

Barth, Hans- Jörg: Jahrgang 1940, studierte allg. Maschinenbau an den TU München und Darmstadt. Danach Projektingenieur bei Rodberg Industrieanlagen GmbH, Darmstadt und bei der Lurgi Anlagentechnik, Frankfurt. Promotion 1971 an der TU Clausthal bei Prof. Engel über Kolbenverdichterventile. Habilitation 1978 für das Lehrgebiet Pneumatik. Seitdem Akademischer Oberrat und apl.Prof. am IMW.

Deppermann, Georg: Jahrgang 1959, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal. Seit 01.08.86 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.

Ebert, Jörg: Jahrgang 1958, studierte Konstruktionstechnik an der TU Berlin, seit 01.02.85 Projektingenieur H-Bahn bei der DUEWAG, Düsseldorf, seit 01.05.1985 wiss. Mitarbeiter am IMW.

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

Kratzsch, Andreas: Jahrgang 1958, studierte Maschinenbau, Fachrichtung Fördertechnik an der TU Berlin, seit 01.01.86 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Morgenroth, Sebastian: Jahrgang 1962, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.04.86 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Müller, Norbert: Jahrgang 1949, studierte allg. Maschinenbau an der FH Frankfurt und TH Darm-

stadt, Leiter Zentralaufgaben Konstruktion der Pittler Maschinenfabrik AG, Langen, seit 01.09.85 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Quaß, Michael: Jahrgang 1958, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 01.07.85 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Siemieniec, Adam: Jahrgang 1930, Professor für Mechanik und Direktor des Institutes für Grundlagen des Maschinenbaus an der Bergakademie Krakau (Polen). War im Rahmen der Kooperation mehrfach Gast des Institutes für Maschinenwesen.

Tan, Li: Jahrgang 1952, studierte Maschinenbau an der Technischen Hochschule Nanjing, VR China mit dem Abschluß Master Eng.. Von 1984 bis 1986 Assistent an der TH Nanjing, seit 1988 Gastwissenschaftler am IMW.

Wan, Gang: 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 28.03.88 Stipendiat und seit 01.08.87 wiss. Angestellter am IMW.

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

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- Moire zur Untersuchung nichtlinear- elastischer Werkstoffe

Finite Elemente

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

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

Pneumatik und Maschinenakustik

Schall/Leistungsmessungen, Geräuschminderung, Schwingungsprobleme der Druckluft-Antriebstechnik

Maschinenelemente

Konstruktive Optimierung von Maschinenelementen mit Hilfe von theoretischen, experimentellen und numerischen Festigkeitsanalysen, Verschleiß an Verbindungselementen

CAD/CAM; CIM- Schnittstellen

Erstellen von 2- und 3-dimensionalen CAD- Zeichnungen, Variantenprogrammierung, Kurvenauslegung, Programmieren von NC- Maschinen, Werkzeugverwaltung, Entwicklung von CIM-Schnittstellen für

- rechnergestützte Konstruktion NC- gesteuerten Werkzeugmaschinen
- Erstellung und Entwicklung von Norm- und Wiederholteilen in die rechnergestützte Konstruktion
- Planung und Verwaltung der Betriebsmittel (PPS) im Informationsaustausch mit der rechnergestützten Konstruktion

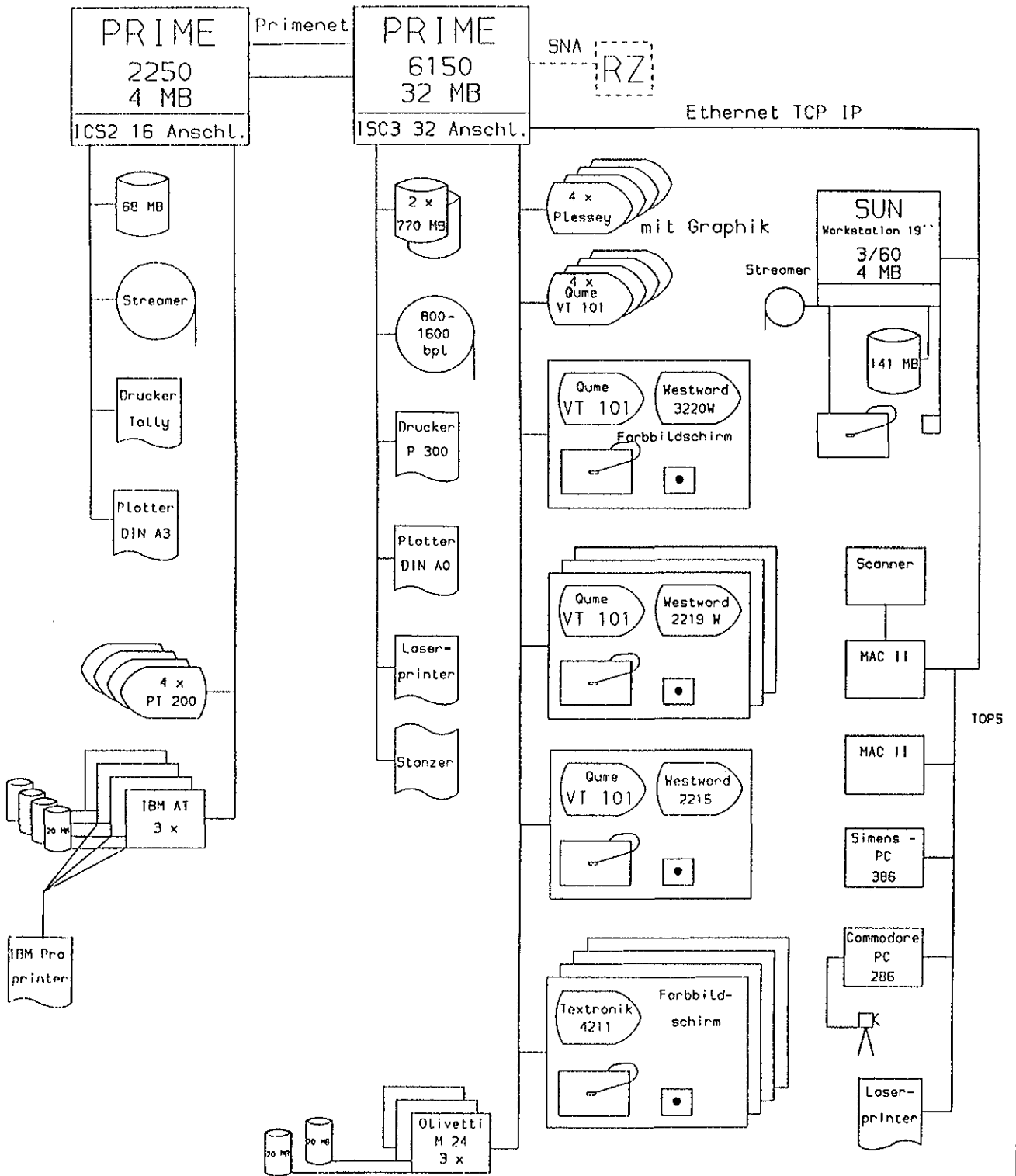
Verfahrenstechnische Maschinen

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

Laufende Forschungsprojekte

- Zahn- und Keilwellenverbindungen, Beanspruchungen und Verschleiß
- Seiltrommeln (ein- und mehrlagig bewickelt)
- Konstruktionssystematik an Maschinen der Verfahrenstechnik
- Projekte aus dem Sonderforschungsbereich Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen (Windsichter, Mühlen, Heißgasventilatoren, heterogen-gaskatalytische Festbettreaktoren)
- Entwicklung von Hochleistungs- Ofenbrennern
- systematisches Konstruieren lärmarmen Maschinen
- Modelluntersuchungen zur elasto-plastischen Beanspruchung von Maschinenelementen
- Dynamische Spannungsoptik
- Spannungsoptische Auswerteverfahren (mittels elektronischer Bildverarbeitung)
- Schallemission, Schallanalyse im schallarmen Raum
- 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-Betriebsmittelmodell)
- Optimierung von Zuggliedern mit teilplastischer Verformung

Rechnerkonfiguration Inst. für Maschinenwesen



Rechner-Standardsoftware

Prime 6150/2250

1. Betriebssystem und Programmiersprachen
 PRIMOS Rev. 21
 FORTRAN 4
 FORTAN 77
 BASIC und BASIC VM
 PASCAL
 PL 1
 COBOL
 C
 PRIMELINK - PC/MAC
 PRIFORMA
2. CAD
 MEDUSA 2D/3D
 PARAMETRIC
 Menü's für Elek., Hydr., Bau und Masch.
 Blechabw.
 Zeichnungsverwaltung
 Modellanalyse
 Schnittstellen FTN, IGES, VDA, VDAPS, FEMGEN und CADPIT
3. FEM
 FEMGEN 3.5
 ASKA 8.5
 FEMVIEW
4. CAM
 AUTOPIT
5. Expertensystem
 KES
6. Datenbank
 ORACLE
 SQL

PC's

Betriebssystem: MS-DOS
 FTN
 BASIC
 C
 KERMIT
 PRIMELINK
 CLAGS
 Bildverarbeitung: AURORA
 GEM
 TOPS

SUN

Betriebssystem: UNIX BSD 4.3
 MEDUSA 2D/3D
 Expertensystem KES

MAC

RAG-TIME
 PRIMELINK
 VERSATERM-PRO
 TOPS