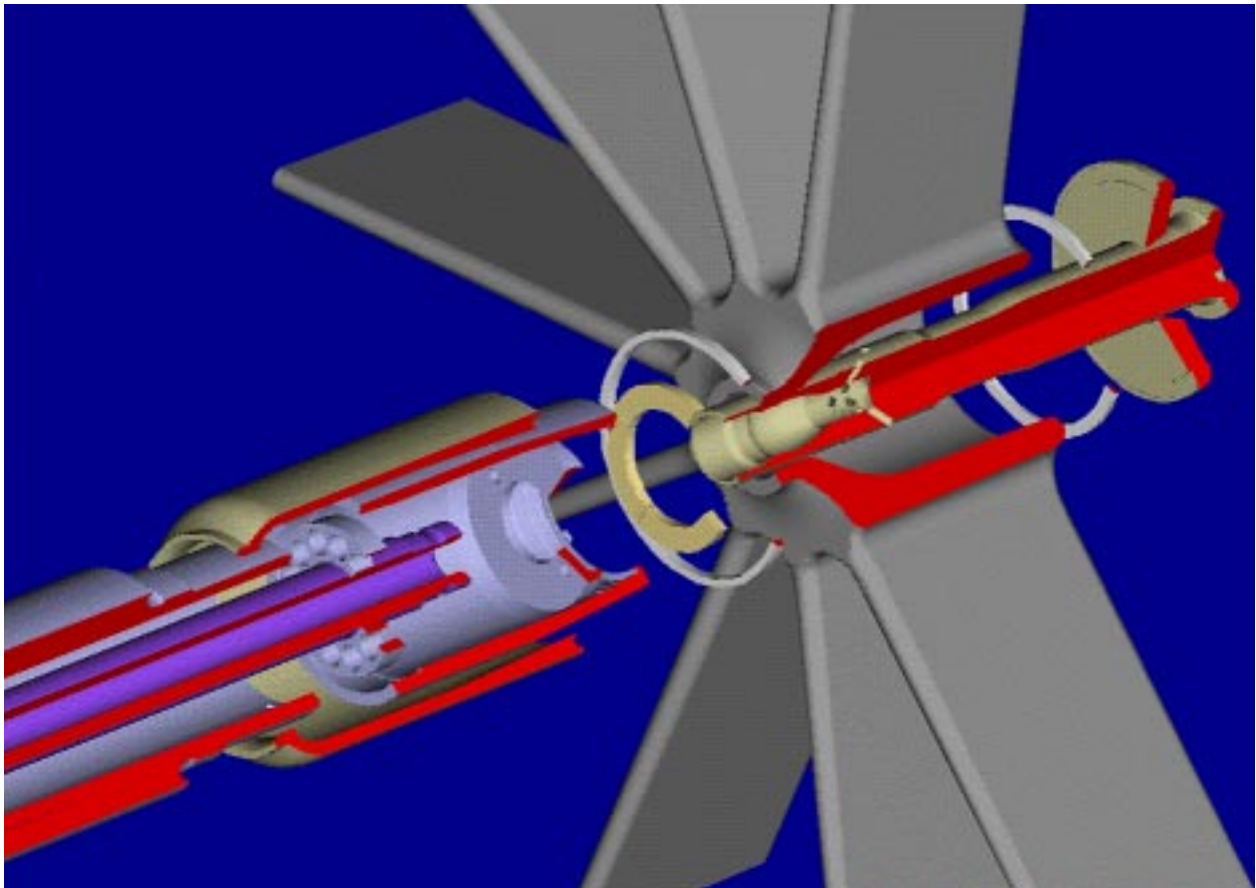


Institut für Maschinenwesen

Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz

Mitteilung Nr. 19 (1994)



**Mitteilungen aus dem
Institut für Maschinenwesen
der
Technischen Universität Clausthal
Nr. 19
(November 1994)**

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz

Redaktion und Layout: Norbert Schiedeck
Umschlaggestaltung: Jürgen Henschel

Anschrift: Institut für Maschinenwesen
Technische Universität Clausthal
Robert-Koch-Str. 32
D-38678 Clausthal-Zellerfeld

Tel: (0 53 23) 72-22 70
Fax: (0 53 23) 72-35 01
Email: dietz@imw.tu-Clausthal.de

ISSN 0947-2274

Titelbild: Explosionsdarstellung der Welle-Nabe-Verbindung eines Heißgasventilators für Temperaturen über 1300 °C. Diese Konstruktion ermöglicht die Befestigung eines vollkeramischen Laufrades geringer Wärmedehnung an einer Stahlwelle. Die Verbindung wurde im Sonderforschungsbereich 180 „Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen“ entwickelt, in dem das IMW mit mehreren Projekten beteiligt ist.

gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

Inhaltsverzeichnis

Dietz, P.:	Vorwort	3
------------	---------	---

Aufsätze

Konstruktion und Berechnung von Maschinenteilen

Dietz, P.; Rothe, F.:	Berechnung und Optimierung von Bolzen-Lasche-Verbindungen	5
Wesolowski, K.:	Ausnutzung von Symmetrieebenen zur Berechnung drehmomentbeanspruchter Bauteile	27
Burgtorf, U.:	Berechnung von Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz unter Verwendung des Finite-Elemente-Programmsystems MARC/MENTAT	35
Schäfer, G.:	Reformation der Zahnwellen-Verbindung	41
Tan, L.:	Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit der geschwächten Welle-Nabe-Preßverbindungen	45
Jakel, R.:	Programm WEIBULL – ein Subprocessor zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit keramischer Bauteile mittels FEM-Unterstützung	49

Konstruktionssystematik und Informationstechnik

Haje, D.; Gummersbach, F.:	EQUIP – Wissensbasiertes System zur Entwicklung lärmarmen Produkte	57
Heinen, F.; Kalwa, R.:	PICASSO - Eine wissensbasierte Konstruktionsumgebung	63
Kruse, P. J.:	Anforderungen: Erfassung, Aufbereitung und Bereitstellung für den Produktentwicklungsprozeß	67
Ort, A., Bugow, R.:	Die Schaffung eines offenen Teilebibliothekskonzeptes	73
Penschke, St.:	Konstruktionssystematische Grundlagen für funktions- und produktionsgerechte Feinblechstrukturen	79
Pregemann, U.:	Informationssysteme im Konstruktionsprozeß	83
Schiedeck, N.:	Fertigungsinformationen für die Fertigungsplanung	87
Schmitt, R.:	Sammlung und Aufbereitung von Fertigungserfahrungen für die Konstruktion	91

Verfahrenstechnische Maschinen

Neumann U.:	Untersuchungen zum Abbauverhalten von Kunststoffen durch den Einsatz von überkritischem Wasser als Reaktionsmedium im Batch-Betrieb	95
Romann, M.:	SIMDES: Ein neues Konzept zur Steuerung und Regelung verfahrenstechnischer Anlagen	99

Maschinenakustik und Pneumatik

Barth, H.-J.; Jeschke, D.:

Trägheitslose Messung von Temperatur, Massen- und Volumenfluß in Gasen durch
Ultraschall 103

Engel, K.; Schmidt, A.:

Maschinenakustische Maßnahmen zur Reduktion der Körperschallübertragung 107

Experimentelle Festigkeitsermittlung

Gieleßen, H.: Anisotropie des photoelastischen Effektes in gewalztem Silberchlorid 115

Henschel, J., Romann, M.:

Erfassung von mechanischen Beanspruchungen an bewegten Maschinenteilen
und deren drahtlose Übertragung 125

Wissenschaftliche Kooperationen

mit der Georgischen Technischen Universität, Tbilissi

Betaneli, A. J.: Die Expreßmethode für die Bestimmung der Sprödfestigkeit des Schneidkeils 127

mit der Tsinhua-Universität, Peking

Xie Huimin; Dai Fulong:

Herstellung eines holographischen Gitters für hohe Temperaturen 131

Das Institut: Ausstattung und Aktivitäten

Dietz, P.; Prengemann, U.:

Craft: Europäisches Geld für kleinere und mittlere Unternehmen 135

Heinen, F.: ERASMUS - Europaweite Hochschulkooperation 139

Schmitt, R.: Informationen über das IMW weltweit verfügbar 141

Forschungsaktivitäten des Instituts für Maschinenwesen 147

Leistungsangebote 149

Prüfstände, Laboratorien und Rechnerausstattung des Institutes 150

Veröffentlichungen des IMW seit dem 1.1.1991 151

Autoren und Mitarbeiter des Institutes 153

Vorwort

Ganz offensichtlich werden die Mitteilungen aus unserem Institut mit jedem Jahr umfangreicher und schöner. Darüberhinaus müssen wir aber auch fast in jedem Jahr die Auflage vergrößern, damit wir nicht zur kommenden Jahreshälfte am Kopierer stehen und Ergänzungsexemplare erzeugen. Dies hängt nicht nur mit der Vergrößerung unseres Bekanntenkreises zusammen, wir werden auch von immer mehr Bibliotheken und Forschungsstellen um Exemplare angeschrieben. Das hat uns bewogen, mit dieser Ausgabe erstmals eine Schriftenreihennummer des Nationalen ISSN-Zentrums der Deutschen Bibliothek zu beantragen. Damit sind die Institutsmittellungen in Zukunft auch zitierfähig.

Was uns in diesen Zeiten in Clausthal vor allem bewegt, ist der drastische Rückgang der Studentenzahlen. Dabei stehen wir aufgrund unserer exzellenten Studienbedingungen im Vergleich zu anderen deutschen Universitäten nicht einmal so schlecht da. Wegen der im Vergleich zu den Massenuniversitäten aber insgesamt kleinen Studentenzahlen und wegen der großen wirtschaftlichen Bedeutung der Universität für die Stadt Clausthal-Zellerfeld lassen jedoch bereits geringfügige Schwankungen der Studentenzahlen die gesamte Struktur von Hochschule und Bergstadt erzittern. Hinzu kommt, daß im Bergbau und Hüttenwesen der Studentenrückgang voraussichtlich nachhaltiger sein wird als im Maschinenbau. Vorschläge zur Strukturänderung des gesamten Ingenieurbereiches der TU Clausthal werden derzeit ausführlich und kontrovers diskutiert.

Die Niedersächsische Regierung verhält sich angesichts dieser Situation und angesichts ihrer eigenen Finanzmisere zur Zeit wenig kooperativ: Die Drohungen reichen vom Schließen ganzer Fachbereiche bis zum Sperren von Stellen bei deren Wiederbesetzung nach formalen Vorgehensweisen. Wahr ist sicherlich, daß die Umstrukturierung unserer Universität dringend ansteht, zu hoffen ist, daß wir neu gestärkt und mit weiterhin großer Attraktivität für unsere Studenten diese Situation überstehen. Der Qualität unserer

Lehr- und Forschungsaktivitäten hat diese Situation bisher in keiner Weise geschadet.

Als eine der letzten Fördermaßnahmen konnten wir unseren CAD-Pool erweitern und verfügen damit neben zusätzlichen Workstations über einen Hochleistungsrechner, der mit Finite-Elemente-Rechnungen voll ausgelastet sind.

Das CIM-Labor wird bis Ende des Jahres durch eine NC-gesteuerte Erodiermaschine bereichert, so daß wir die wichtigsten Fertigungstechnologien und ihre Informationssysteme in Lehre und Forschung des Institutes einbinden können.

Die Umstellung des Datennetzwerkes hat uns zwar in den letzten Monaten einige Nachtstunden gekostet (Dank gebührt besonders dem "Oberrechenknecht" Kalwa), jetzt können aber wieder alle per Bildschirm und mit noch größerer Datenflut miteinander kommunizieren ohne sich vom Arbeitsplatz zu erheben.

Trotzdem ist die Kommunikation nicht nur auf den Rechenbetrieb beschränkt, Dreh- und Angelpunkt ist seit ihrer Fertigstellung die neue Cafeteria, die nicht nur Austragungsort aller offiziellen und inoffiziellen Institutsbesprechungen ist, sondern auch vielen Jungmitgliedern Gelegenheit gibt, unter der behutsamen Aufsicht von Martina Wächter hausfrauliche Fähigkeiten zu entwickeln. Die zahlreichen Promotionsfeiern des vergangenen Jahres boten hierzu hinreichende Möglichkeiten.

An der Front des Institutsumbaus gibt es wenig Neues zu berichten. Immerhin sind wir schon froh, daß die verfaulenden Dachgauben saniert wurden und die Mitarbeiter nicht mehr bei jedem größeren Regen unter Wasser stehen. Dank der Bearbeitungsgeschwindigkeit aller niedersächsischen Verwaltungen sieht der Hörsaal aber immer noch "historisch" aus und auch die Meßmaschine ist immer noch ohne Klimaanlage. Mittlerweile haben wir aber die Freigabe der Mittel und das große Ehrenwort des Landesvaters, daß wir zum Semesterende 1995 den noch verbleibenden Umbau vornehmen können.

Der diesjährige Band der Institutsmitteilungen gibt Ihnen schon in seinem Inhaltsverzeichnis einen Überblick über die Struktur unserer Forschungsarbeiten: Sie reichen nach wie vor von der Maschinenelementeberechnung bis zur Informationstechnik innerhalb der Konstruktion, von der Gestaltung verfahrenstechnischer Maschinen bis zur experimentellen Festigkeitsanalyse.

Wesentlich verstärkt wurden unsere Aktivitäten auf dem Bereich der Einwerbung europäischer Forschungsvorhaben, ein Artikel widmet sich der Forschungsförderung kleiner und mittlerer Unternehmen durch die EU. Durch diese Aktivitäten wird das Leben am Institut internationaler und von manchen sprachlichen Besonderheiten geprägt: Studenten des ERASMUS-Programms aus Spanien unterhalten sich mit mexikanischen Gastwissenschaftlern unter Anwesenheit deutscher Studenten und Mitarbeiter auf englisch. Das Englisch des griechischen BRITE-EURAM-Kollegen wird vom Sekretariat schon einmal als Italienisch interpretiert und unsere zahlreichen Workshops verhelfen dem Oberharz und seinen Kneipen (einschließlich des "Fuxin" im Deutschen Haus) zu europaweitem Bekanntheitsgrad.

Wie immer wollen wir Ihnen auch mit diesem Band der Institutsmitteilungen das breit angelegte Interessensfeld des Institutes darstellen und wünschen Ihnen bei der Lektüre viel Vergnügen. Wie immer möchten wir auch gerne das Gespräch mit den Freunden des Institutes fortsetzen und würden uns natürlich über einen persönlichen Kontakt oder gar einen Besuch im schönen Oberharz ganz besonders freuen.

Clausthal-Zellerfeld, im November 1994

Berechnung und Optimierung von Bolzen-Lasche-Verbindungen

Dietz, P.; Rothe, F.

Der folgende Artikel enthält die wesentlichen, für den Konstrukteur der Praxis direkt anwendbaren Ergebnisse eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter dem Kennzeichen Di 289/8 geförderten Vorhabens. Das Thema wird in der nächsten Zeit in Teilberichten der Fachpresse angeboten, hier haben wir uns für eine geschlossene - wenn auch ungewöhnlich lange - Darstellung entschieden, damit der Anwender alle erforderlichen Angaben in einem Artikel vorfindet.

This paper contains the essential results of the research project (Di 289/8) sponsored by the German Research Community (DFG). These results are directly applicable by the designer for his industrial work.

1. Einleitung, Stand bisheriger Berechnungsverfahren

Laschenverbindungen gehören im Maschinenbau zu den am weitesten verbreiteten Verbindungselementen. Da sie meist die verantwortlich tragenden Elemente beim Halten und Bewegen großer Lasten sind (z.B. Schäkel), als lösbare Verbindungselemente die Kraftübertragung innerhalb der Konstruktion übernehmen (z.B. Bolzengelenke) oder verantwortlich für die Übertragung hoher Leistungen sind (z.B. Gelenkketten), ist mit ihrem Ausfall ein hohes Sicherheitsrisiko für Mensch und Gerät verbunden. Die Tatsache, daß diese Elemente in der überwiegenden Zahl der Fälle ohne Redundanz eingesetzt werden, erfordert eine Auslegung nach dem Prinzip des sicheren Bestehens, wobei für die Bauteilsicherheit auch das Bauteilverhalten nach einmaliger Überlastung mit elasto-plastischer Verformung entscheidend sein kann. Darüber hinaus besteht im allgemeinen Maschinenbau die Forderung nach Formleichtbau dieser überwiegend als Massenartikel hergestellten Elemente.

Die Spannungsverteilung in Zugelementen wird maßgeblich durch das Kontaktverhalten der einzelnen Bauteile bestimmt. Die Verteilung des Kontaktdrucks

hängt dabei von Parametern ab, die sich aus dem gewählten Spiel und dem Verformungsverhalten der an der Verbindung beteiligten Elemente ableiten lassen. Hinzu kommt das Verfestigungsverhalten des Materials, welches bei überelastischer Beanspruchung das Tragvermögen einer solchen Verbindung erheblich steigern kann.

In der im folgenden beschriebenen Arbeit war die Aufgabe gestellt, mit Hilfe grundlegender mechanischer Ansätze und durch ergänzende Finite-Elemente-Rechnungen ein Verfahren zur Berechnung spielbehafteter Laschenverbindungen zu entwickeln, das das Verformungsverhalten der beteiligten Elemente bei der Beanspruchungsermittlung berücksichtigt und teilplastische Verformungen zuläßt. Entsprechend dem gewählten wissenschaftlichen Ansatz ergibt sich damit eine

Aufteilung auch in dieser Veröffentlichung: Die Ermittlung der Kontakt-druckverteilung, die Berechnung der Beanspruchungen und Vorschläge zur Optimierung von Laschenverbindungen. Die Arbeit befaßt

sich mit statischen Lastfällen und enthält die z.B. bei der

Auslegung von Ketten zu berücksichtigenden dynamischen Effekte nicht. Die Veröffentlichung beschreibt nur elastische Beanspruchungsfälle, das Verhalten im teilplastischen Bereich wird gesondert publiziert. Zur Erläuterung der im folgenden verwendeten Begriffe zeigt **Bild 1.1** eine Übersicht.

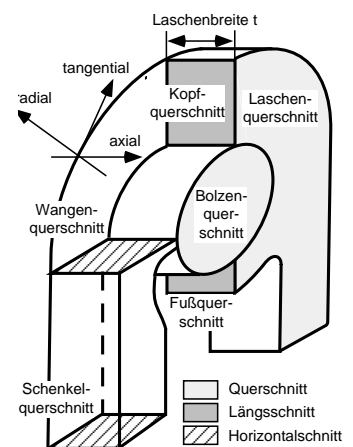
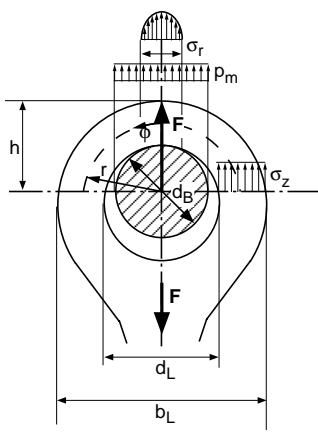


Bild 1.1 Charakteristische Schnitte in einer Bolzen-Lasche-Verbindung

1.1 Elementare Beanspruchungen

Viele Bauarten und Anordnungen von Laschenverbindungen sind mit ihren zu garantierenden Traglasten und erforderlichen Sicherheitsbeiwerten ge-



Beanspruchung	
Lochleibung	$q_m = \frac{F}{t \cdot d_B} \leq q_{m,zul}$
Hertzsche Pressung	$p_{Ht} = \sqrt{\frac{F}{t} \frac{E}{\pi(1-\nu^2)} \left(\frac{1}{d_B} - \frac{1}{d_L} \right)} \leq p_{Ht,zul}$ mit $b_H = \sqrt{\frac{8}{\pi} \frac{F(1-\nu^2)}{tE} \left(\frac{1}{d_B} - \frac{1}{d_L} \right)}$
Laschenzugspannung	$\sigma_z = \frac{F}{2 \cdot A_L} \leq \sigma_{z,zul}$
max. Spannung	$\sigma_{max} = \sigma_n \cdot \alpha_k$ mit $\sigma_n = \frac{F}{t(b_L - d_L)}$ $\alpha_k = \frac{9}{5} + \left(\frac{b_L}{d_L} - \frac{6}{5} \right) \left(\frac{9}{5} - \frac{h}{b_L} \right)$
Scherspannung im Bolzen	$\tau_{sm} = \frac{F}{i \cdot A_B}$ $i = \text{Schnittstellanzahl}$ $A_B = \text{Bolzenquerschnitt}$

Bild 1.2 Elementare Beanspruchungen in Bolzen-Lasche-Verbindungen nach /1 bis 4/

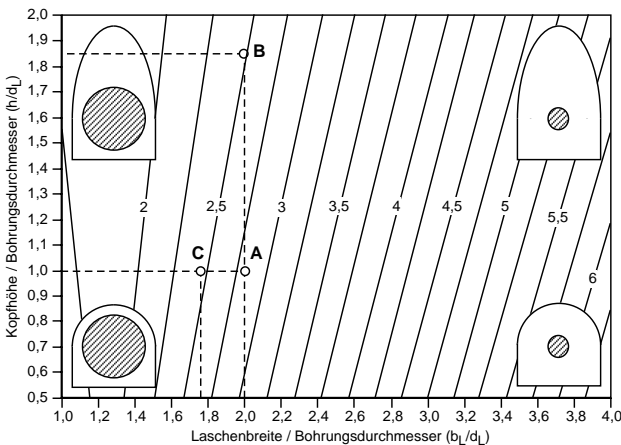


Bild 1.3 Formzahl α_k für spielfreien Bolzen-Lasche-Verbindungen in Abhängigkeit von den Wanken- und Kopfabmessungen. A Standardlasche, B kopfüberhöhte Lasche, C wangenreduzierte Lasche. Eingezeichneter Datenfall: Um α_k von 2,8 auf 2,5 zu erniedrigen, muß man die Kopfhöhe der Standardlasche um 85% erhöhen oder die Laschenbreite um 12% verkleinern.

normt oder in entsprechenden Empfehlungen der Hersteller festgelegt. Die allgemeine Maschinenelementeliteratur /1 bis 4/ geht davon aus, daß in der Kontaktzone je nach Verbindungstyp Lochleibung oder Hertzsche Pressung und in der Lasche eine Kombination von Zug-, Scher- und Biegespannungen auftreten. Bild 1.2 zeigt eine Übersicht über diese elementaren Beanspruchungen und ihre Berechnung. Lochleibung wie Hertzsche Pressung sind dabei die Grenzfälle einer Berechnung mit unendlich starren Bauelementen, wobei die Hertzsche Pressung lediglich Nachgiebigkeit in der Kontaktzone voraussetzt, aber den Schmiegeprozeß zwischen Bolzen und Lasche unter Spiel nicht richtig wiedergibt. Die Berechnung der maximalen Spannung in der Lasche berücksichtigt sowohl die Wangenbiegung als auch die Kerbwirkung der Lasteinleitung und gilt für kleine Bolzenspiele. Sie kann durch die Wahl der Geometrie,

insbesondere die Wahl der Kopfhöhe h beeinflusst werden (Bild 1.3) /5 bis 7/. Untersuchungen zum Einfluß des Bolzenspiels ergeben folgende zusätzliche Hinweise /8,9/:

- Mit größer werdendem Spiel zwischen Bolzen und Bohrung steigt die Spannungsüberhöhung an, der Kontaktwinkel zwischen Bolzen und Bohrungsrand ist klein.
- Bei spielbehafteten Bolzen

nähern sich die Spannungen mit steigender Last den Spannungen bei anliegenden Bolzen.

Aus dem elastischen Zusammenspiel zwischen Lasche und Bolzen entstehen Verschiebungen im Bohrungsrand. In Abhängigkeit vom Einsatzfall kommen radiale und tangentielle Relativbewegungen hinzu. Häufige Lastwechsel können dabei durch Bildung von Reibkorrosion eine weitere Grenze der Tragfähigkeit bilden. Insbesondere in der Kettenforschung gibt es hierbei Untersuchungen zu Lebensdauer und Verschleiß, die auf der Basis einfachster mechanischer Grundgleichungen empirische Kennwerte verwenden, die aber in der Literatur zum Teil widersprüchlich sind und zusätzliche betriebliche Erfahrungen verlangen.

Die komplexe Geometrie der Laschenquerschnitte und die Kopplung der Lasteinleitung von der Verformung der beteiligten Elemente bei großer Abhängigkeit vom Bolzenspiel lassen die in der Literatur angewendeten Ansätze nur bei sehr großen Vereinfachungen oder in Sonderfällen zu. Für den sehr wichtigen Sonderfall einer schenkellosen Öse unter Punktlast gelang Göldner /10/ ein Ansatz für die vollständige Beschreibung des ebenen Spannungsfeldes in Öse und Querschnitt, der auch nach neueren Forschungen gute Übereinstimmung mit experimentellen Erfahrungen zeigt. Grundlage ist ein durch eine Einzelkraft belasteter Kreisbogenträger konstanten Querschnitts, für den eine Airy'sche Spannungsfunktion angesetzt wird, die bei entsprechend zu wählenden Randbedingungen auch geschlossen lösbar ist. Wesentliches Ergebnis ist eine Dominanz der Tangentialspannungen am Bohrungsinnenrand der Lasche, Radialspannungen und Schubspannungen sind dagegen zumindest am Bohrungsinnenrand vernachlässigbar.

Póczy /11/ liefert hierzu eine Erweiterung, die auch exzentrische Laschenbohrungen und damit eine Berücksichtigung des Einflusses der Kopfhöhe h erlaubt. Der Ansatz gelingt durch Einführung eines vom Laschenwinkel abhängigen Trägheitsmoments des Laschenkopfs und führt zu Lösungen, die sich mit experimentellen Untersuchungen sehr gut decken. Beide Ansätze beruhen auf einer strikten ebenen Betrachtungsweise, auf einer punktförmigen Lasteinleitung und auf dem Prinzip des Kreisbogenträgers.

2. Allgemeiner Berechnungsansatz, Parameterbetrachtung

Eine analytische Lösung des dreidimensionalen Spannungszustandes stößt aufgrund der konstruktiven Bedingungen auf unüberwindliche mathematische Schwierigkeiten. Im folgenden soll daher nach Ansätzen gesucht werden, die unter vertretbaren Vereinfachungen und Annahmen eine für technische Zwecke hinreichend genaue Lösung nach folgender Vorgehensweise ermöglichen:

- Die Konstruktionsteile der Verbindung werden auf die drei idealisierten Tragwerke Balken, Platte und Schale zurückgeführt, deren Deformationszustand hinreichend genau durch das Verhalten einer charakteristischen Fläche im Tragwerk beschrieben werden kann.
- Das Problem wird in die beiden Schnittebenen quer und (je nach Schnittwinkel) längs bzw. horizontal zerlegt und die Einzelergebnisse superponiert. Vereinfachend wirkt die Tatsache, daß durch den symmetrischen Aufbau von Verbindung und Belastung die Verbindung als Ganzes biege- und torsionsfrei belastet ist.
- Das Problem der Koppelung von Verformung und Belastungsfunktion an der Kontaktstelle wird dadurch umgangen, daß der Schmiegeprozeß zwischen Bolzen und Lasche in getrennten Untersuchun-

gen ermittelt wird und daraus Klassen typischer Belastungsfunktionen ermittelt werden.

Zu beachten ist dabei, daß die von der Verformung abhängigen Kontaktverhältnisse Probleme darstellen, die mit linearen Berechnungsansätzen nicht oder nur in engen Bereichen erfaßbar sind.

Die Schlüsselbetrachtung für die Entwicklung eines neuartigen Ansatzes liegt in einer Analyse der das System beeinflussenden Parameter und ihre Wichtigkeit bezüglich des Berechnungsergebnisses in der Kontaktzone ("Kontaktproblem") und bezüglich der Beanspruchungen und Verformungen der Lasche ("Laschenproblem"). **Bild 2.1** zeigt in einer qualitativen Betrachtung die zu untersuchenden Parameter und ihre Zuordnung zu den Problembereichen eines mechanischen Ansatzes. So ist beispielsweise die Festlegung der Randbedingungen für die Berechnung der Beanspruchungen und Verformungen in der Lasche in erster Linie abhängig von den als Primärparameter bezeichneten Bedingungen Last und Verbindungsgeometrie, daneben spielen die aus einer Betrachtung des Kontaktbereiches zu ermittelnden Belastungsfunktionen und die das Verformungsverhalten der Elemente selbst beschreibenden Parameter (Fesselung und Schenkellänge) eine Rolle. Dagegen ist zu erwarten, daß zur Bestimmung der Kontaktdruckverteilung Fragen der Beanspruchun-

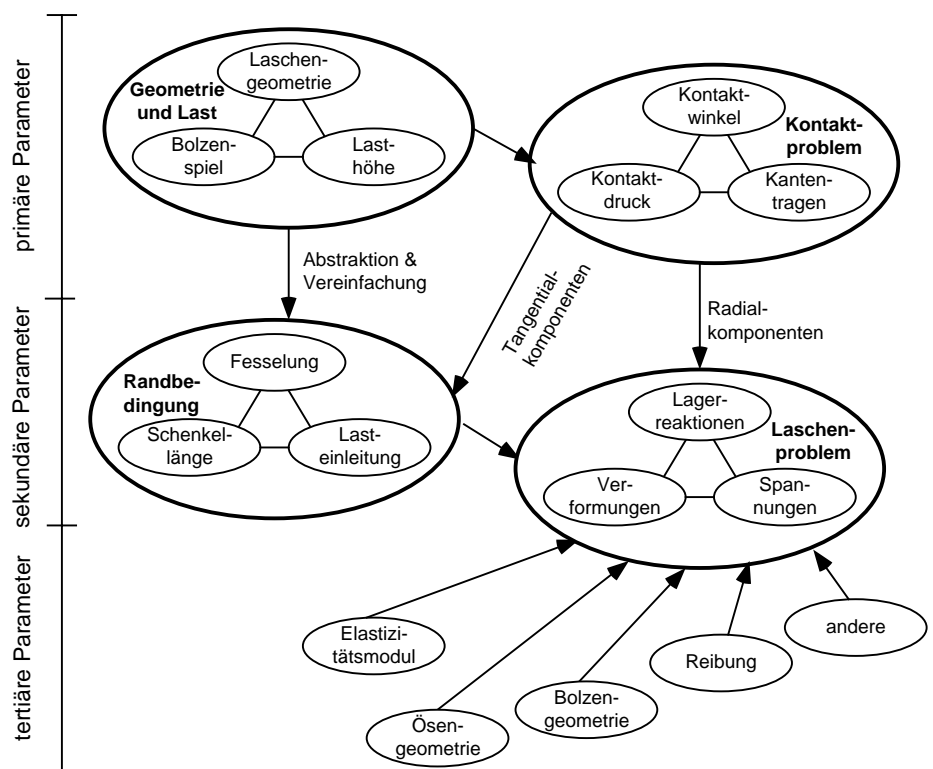


Bild 2.1 Struktur der Parameter zur Berechnung von Bolzen-Lasche-Verbindungen

gen und der örtlichen Verformungen in den Laschen eine weniger bedeutende Rolle einnehmen.

Die Analyse der Parameter wurde in einer aufwendigen Untersuchung mit Hilfe des FE-System MARC durchgeführt, das die Modellierung des Kontaktbereiches mit lastabhängiger Kontaktfläche unterstützt. Auf diese Weise gelingt zunächst eine Klassierung der Parameter hinsichtlich ihrer Bedeutung auf das Ergebnis unabhängig oder in Verbindung mit anderen Parametern. In **Tab. 2.1** werden die Einflußgrößen einer Laschenverbindung für 3 Kategorien bewertet. Jeder Parameter beeinflusst nicht nur unmittelbar die Beanspruchungen im Bauteil (Bedeutung), sondern wiederum andere Einflußgrößen (Verknüpfung). Hinzu kommt die Komplexität der Einflußgröße. So wird z.B. die Bedeutung der Fesselung von der Schenkellänge beeinflusst, die Schenkellänge wiederum ist leichter zu beschreiben als die Laschenform. Die in Tab. 2.1 dargestellte Beurteilung der Parameter stellt das Ergebnis aus ca. 3000 FEM-Rechenläufen dar. Die hohe Zahl dieser Rechenläufe ergibt sich nicht zuletzt aus der Tatsache, daß eine unabhängige Betrachtung der Parameter mit anschließender Superposition der Einzelergebnisse aufgrund des komplexen Parameterverhaltens nicht möglich sind. Die Ergebnisse der Tabelle sollen kurz kommentiert werden:

Primär beeinflussende Parameter: Die in dieser Kategorie erfaßten Größen sind für die Beanspruchung im Kontaktbereich und in der Verbindung von großer Bedeutung und weisen zusätzlich eine hohe Verknüpfung auf, die die Superposition der einzelnen Einflußgrößen nicht erlaubt. Zu ihnen gehören die Laschengeometrie, das Bolzenspiel und die Lasthöhe. Beispielsweise läßt sich bei zunehmender Last eine spielbehaftete Schenkellasche leichter als der steife-

re Augenstab an den Bolzen anschmiegen. Daraus folgt, daß eine für die Auslegung zu formulierende Beziehung zwischen Lasthöhe, Bolzenspiel und Kontaktbreite nicht auf andere Laschenformen übertragen werden kann. Die genannten drei Parameter dienen unmittelbar zur Lösung des Kontaktproblems (Berechnung von Kontaktwinkel, Kontaktdruck, Kantentragen) und beeinflussen erheblich die Randbedingungen, die bei der Bildung des mechanischen Ersatzmodelles zur Berechnung von Spannungen und Verformungen in der Lasche benötigt werden.

Sekundär beeinflussende Parameter: Hierunter sind im wesentlichen die Angaben zu verstehen, die als Eingangsgrößen für die Beanspruchungsanalyse dienen. Obgleich sie die Höhe der berechneten Beanspruchungen entscheidend mitbestimmen, besitzen sie gegenüber den primär beeinflussenden Parametern eine verminderte Verknüpfung. Damit ist eine Superposition dieser Parametereinflüsse eher möglich als bei den primär beeinflussenden Parametern.

Tertiär beeinflussende Parameter: Der Einfluß dieser Parameter ist zwar nicht zu vernachlässigen, die gegenüber den anderen Einflußgrößen wesentlich niedrigere Komplexität erlaubt jedoch oft eine Superposition ihrer Einflüsse ähnlich den bekannten Korrekturfaktoren bei der Auslegung von Maschinenelementen. Typische Beispiele hierfür sind die Elastizitätsmodule von Bolzen und Lasche, die Bolzengeometrie und die Reibung.

3. Berechnung der Kontaktdruckverteilung in spielbehafteten Bolzenverbindungen

3.1 Kontaktwinkel

Die Bestimmung des Kontaktwinkels für eine belastete Laschenverbindung ist die Voraussetzung zur Bestimmung der in ihr herrschenden Beanspruchungen

sowohl im Quer- als auch im Längsschnitt der Verbindung. Der Kontaktwinkel stellt sich unter Last in Abhängigkeit von Kontaktdruck und Biegemoment ein. Der Kontaktdruck führt zu einer Abplattung des Bolzens und zu seiner Verformung in eine unrunde Kontur (**Bild 3.1**).

Das Biegemoment in der

Parameter	Einflußgröße	Verknüpfung	Komplexität	Bedeutung	Summe
primär	Laschenform	2	2	1	5
	Bolzenspiel	2	0	2	4
	Lasthöhe	2	0	2	4
sekundär	Lasteinleitung	1	2	1	4
	Fesselung	1	1	2	4
	Schenkellänge	1	0	2	3
tertiär	Bolzenform	0	1	1	2
	Ösenform	0	1	1	2
	Reibung	0	2	0	2
	Elastizitätsmodul	0	0	1	1

Table 2.1 Beurteilung der die Berechnung beeinflussenden Parameter nach Komplexität, Verknüpfung mit anderen Einflußgrößen und Bedeutung für die Ergebnisgüte. Bewertung: 0 klein oder nicht vorhanden, 1 mittel, 2 groß

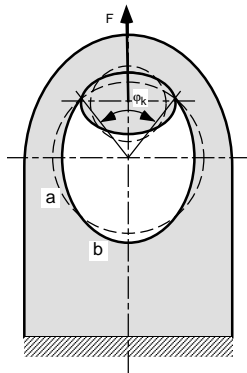


Bild 3.1 Bolzen- und Laschenverformung unter Last in einer spielbehaftetem Verbindung.
a unverformt,
b verformt

Wange bestimmt die Verformung der Lasche, wobei die Bohrung sich längt und schmaler wird. Damit ist die Ausbildung der Kontaktzone auch im linear-elastischen Verformungsbereich eine nichtlineare Beziehung in Abhängigkeit von der Lastgröße, der Geometrie und der Verformungsfähigkeit von Bolzen und Lasche. Die komplexen Verknüpfungen der Parameter lassen nur eine experimentelle oder iterative Lösungsfindung bei der Berechnung der Schmiegunz zu. Die folgenden Ergebnisse beruhen auf einer semiempirischen Auswertung zahlreicher Berechnungen mit Hilfe der FE-Methode. Die Verifizierung dieser Rechenergebnisse wurde durch Zugversuche an ausgeführten Aluminiumlaschen unternommen, wobei neben der Überprüfung der Last-Verformungs-Beziehung ein Vergleich der Spannungen mittels DMS-Meßtechnik vorgenommen wurde. Die Auswertung der Parameterrechnungen führt zu folgenden Rechenregeln und Konstruktionshinweisen:

In erster Näherung läßt sich der maximale Kontaktwinkel $\varphi_{k,max}$ durch die Projektion des Bolzens auf die Lasche abschätzen. Er beträgt

$$\varphi_{k,max} = 2 \cdot \arcsin(1-s) \quad \text{mit} \quad s = \frac{d_L - d_B}{d_L} \quad (3-1)$$

Gegen diesen Wert konvergiert der Kontaktwinkel $\varphi_k(q,s)$ mit zunehmender Last nach folgendem semiempirischen Ansatz

$$\varphi_k(q,s) = \varphi_{k,max} \left[1 - e^{-\frac{c \cdot q}{s}} \right] \quad \text{mit der Lochleibung} \quad q = \frac{F}{t \cdot d_L} \quad (3-2)$$

Die mit Hilfe umfangreicher Parameterstudien und Regressionsverfahren ermittelte Konstante c ist für alle Bolzenspiele $s \leq 10\%$ und Lasten $q \leq 500 \text{ N/mm}^2$ mit hinreichender Genauigkeit ausschließlich von der

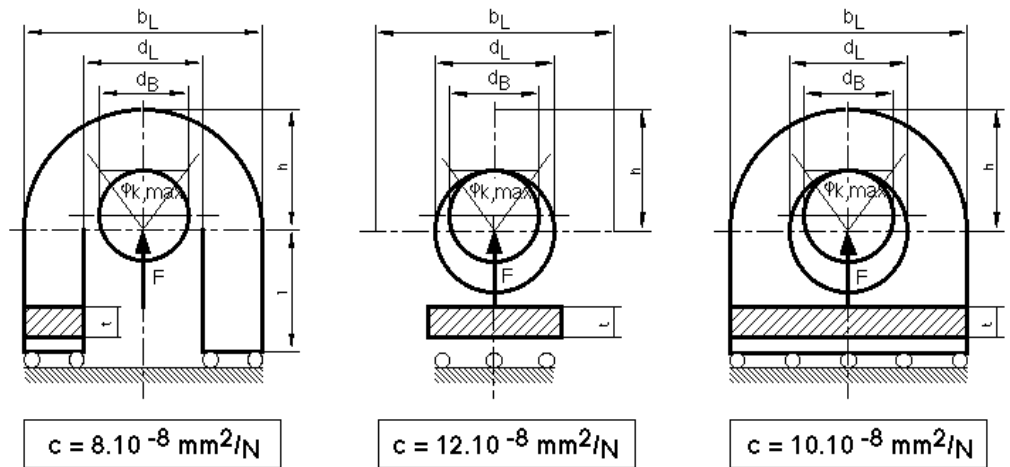


Bild 3.2 Drei typische Formen von Bolzen-Lasche-Verbindungen mit spielbehafteten Bolzen und ihre Steifigkeiten. Links: Lasche. Mittig: Augenring. Rechts: Augenstab

Steifigkeit der Lasche abhängig. Je biegeweicher die Öse und der Schenkel sind, desto kleiner ist c . Für typische Bauformen enthält **Bild 3.2** hierzu Angaben. Der Vergleich der obigen Näherungsformel mit FE-Rechnungen weist eine befriedigende Übereinstimmung auf, selbst bei sehr kleinem Spiel und bei starker Abweichung der Laschengometrie von den in Bild 3.2 beschriebenen Verhältnissen übersteigt die Differenz nicht mehr als 10 %.

Die Auswertung der Gleichungen für unterschiedliche Lochleibungen und Bolzenspiele bei Laschen zeigt **Bild 3.3**. Parameterrechnungen ergeben bei Abweichung von den dort definierten geometrischen Beziehungen folgende Tendenzen:

- Kopfüberhöhung und Wangenverbreiterungen erhöhen den Steifigkeitsfaktor und verkleinern damit den Kontaktwinkel. Bei großem Bolzenspiel nähern sich die Verhältnisse dem der Hertzchen Pressung im Kopfbereich.
- Kopfkürzung und Wangenschwächung führen zu

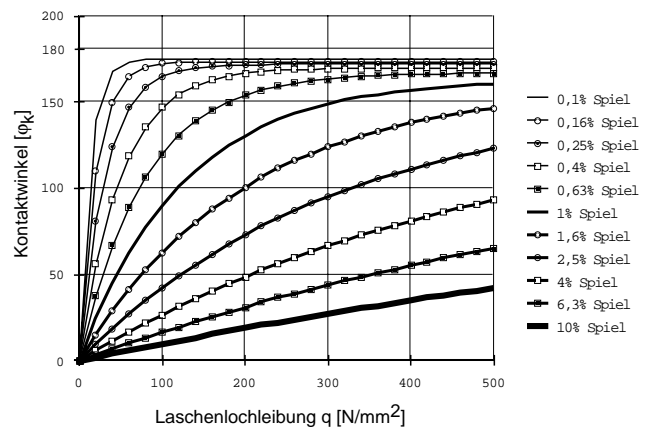


Bild 3.3 Kontaktwinkel φ_k für Laschen nach Bild 3.2 links mit $b_L/d_L = 2$ und $l/d_L > 0,5$ in Abhängigkeit von Belastung und Bolzenspiel

einer Kontaktwinkelzunahme, da sich die Lasche um den Bolzen "wickeln" kann. Die Kontaktdruckverringung wird aber durch die Querschnittschwächung meist überkompensiert.

3.2 Kontaktdruckverteilung im Querschnitt der Verbindung

Der im Querschnitt wirkende und sich mit dem Ösenwinkel φ ändernde Druck $p(\varphi)$ liegt bis zum Kontaktwinkel φ_k an. Die sich in der Kontaktzone einstellende Druckverteilung $p(\varphi)$ kann nach **Bild 3.4** wie folgt beschrieben werden:

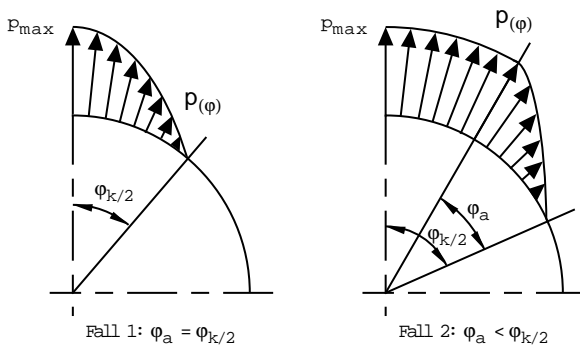


Bild 3.4 Rechnerischer Ansatz des Kontaktdruckverlaufs im Laschenquerschnitt

Der Maximaldruck p_{max} konvergiert mit zunehmendem Kontaktwinkel φ_k und abnehmendem Abklingwinkel φ_a gegen die Lochleibung q (vgl. Bild 1.2). Die Werte für den Kontaktwinkel φ_k und den Abklingwinkel φ_a werden überwiegend über das Bolzenspiel s und die Last F bestimmt, wobei in Abhängigkeit von der Größe eine Fallunterscheidung vorzunehmen ist:

Fall 1: $\varphi_a = \varphi_k/2$: Bei großem Bolzenspiel und relativ steifer Lasche stellt sich auch unter Last nur ein kleiner Kontaktwinkel φ_k ein. Der Maximaldruck p_{max} ist allein vom Kontaktwinkel φ_k abhängig und zeigt mit guter Näherung einen cosinusförmigen Verlauf.

$$\text{für } \varphi_k < \frac{\pi}{2}: p_{max}(\varphi_k) = q \frac{1 - \left(\frac{2\varphi_k}{\pi}\right)^2}{2\varphi_k \cos \varphi_k} = \frac{q}{\cos \varphi_k} \left(\frac{\pi}{2\varphi_k} - \frac{2\varphi_k}{\pi}\right)$$

$$\text{für } \varphi_k = \frac{\pi}{2}: p_{max}(\varphi_k) = \frac{4}{\pi} q \tag{3-3}$$

$$p(\varphi) = p_{max}(\varphi_k) \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\varphi}{\varphi_k}\right) \tag{3-4}$$

Fall 2: $\varphi_a < \varphi_k/2$: Bei kleinen Bolzenspielen, hohen Belastungen und verhältnismäßig nachgiebigen Laschen kommt es zu einer komplexeren Druckverteilung $p(\varphi)$. An einen Sektor mit nahezu konstantem Druck p_{max} schließt sich ein zweiter an, dessen Breite durch den Abklingwinkel φ_a definiert wird und in dem der Druck bis zum Kontaktwinkel $\varphi_k/2$ auf Null abfällt. Für diesen Fall ergibt sich der Maximaldruck p_{max} in Abhängigkeit vom Kontaktwinkel φ_k und vom Abklingwinkel φ_a zu

$$p_{max}(\varphi_k, \varphi_a) = q \frac{1 - \left(\frac{2\varphi_a}{\pi}\right)^2}{2\varphi_a \cos \varphi_k + \sin(\varphi_k - \varphi_a)} \tag{3-5}$$

Bei der Berechnung der Druckverteilung $p(\varphi)$ muß in Abhängigkeit vom Abklingwinkel für die beiden Sektoren unterschieden werden.

$$\text{für } \varphi \leq \varphi_k - \varphi_a: p_a(\varphi) = p_{max}(\varphi_k, \varphi_a) \tag{3-6}$$

$$\text{für } \varphi > \varphi_k - \varphi_a: p_b(\varphi) = p_{max}(\varphi_k, \varphi_a) \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\varphi + \varphi_a - \varphi_k}{\varphi_a}\right)$$

Die Auswertung dieser Gleichungen ergibt eine erhebliche Abhängigkeit der Druckverteilung vom Spiel. Während große Spiele eng begrenzte Kon-

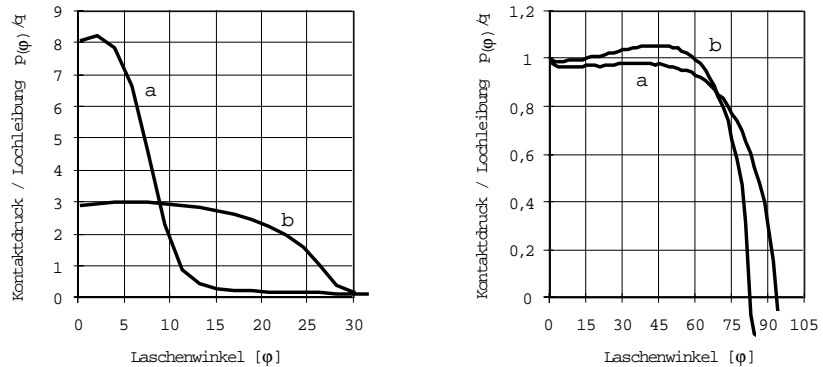


Bild 3.5 Kontaktdruckverteilung in Bolzen-Lasche-Verbindungen, ermittelt mit FEM. Links: Großes Spiel, a = 10%, b = 2%. Rechts: Kleines Spiel, a = 0%, b = 0,2%

taktbreiten und Lastüberhöhungen bis zum Achtfachen des Lochleibungsdrucks verursachen (**Bild 3.5 links**), nähert sich bei Spielen, wie sie im Bereich von Bolzengelenken und -ketten zu finden sind, die Lastverteilung im Idealfall der Lochleibung (**Bild 3.5 rechts**).

3.3 Kontaktdruckverteilung im Längsschnitt

Die durch starke Überhöhungen am Laschenrand gekennzeichnete Kontaktdruckverteilung über der Laschenbreite wurde bereits von /10/ analytisch untersucht, wobei als mechanisches Modell ein starrer

Stempel diente, der in eine elastische Halbebene gedrückt wird. Die dabei entwickelte Gleichung wurde einem Vergleich mit FE-Rechnungen unterzogen und dabei festgestellt, daß die Annahme eines starren Stempels dem Verformungsverhalten der an der Verbindung beteiligten Elemente nicht gerecht wird und zu rechnerischen Überhöhungen der Kantenpressungen führt. Als recht gute Näherungslösung für Bolzengelenke und -ketten hat sich im Vergleich mit zahlreichen FEM-Rechnungen eine semiempirische Erweiterung der von /10/ entwickelten Gleichung erwiesen.

(3-7)

$$p(\varphi, x) = p(\varphi) \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{p \sqrt{1 - 4(x/t)^2}} \{1 - 2(x/t)^2\} \quad \text{mit} \quad -\frac{t}{2} \leq x \leq \frac{t}{2}$$

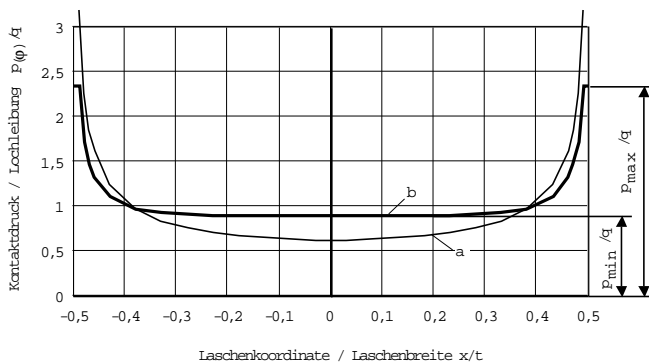


Bild 3.6 Druckverteilung in Längsrichtung einer Lasche mit Rechteckprofil. a Lösung nach /10/, b Lösung nach Glg. 3-7

Das Druckminimum liegt bei etwa 90% des mittleren Wertes. Auch bei dieser Formel ergeben sich wie bei der Originalgleichung am Laschenrand unendlich hohe Spannungen. Da die sich hier einstellenden plastischen Zonen meist nur eine kleine Breite haben, ist es zulässig, sie in Höhe der Fließgrenze R_{eH} zu kappen. **Bild 3.6** zeigt die Kontaktdruckverteilung bei einem Verhältnis $R_{eH}/q = 2,35$.

4. Berechnung der Beanspruchungen in der Lasche

4.1 Lasteinleitung unter Berücksichtigung der Elastizität von Bolzen und Lasche

Eines der Kernprobleme bei der Aufstellung des mechanischen Modells ist die Berücksichtigung der Elastizität von Bolzen und Laschen. Parameterrechnungen mit der Methode der Finiten Elemente ergaben, daß eine falsche Einschätzung der Bolzenelastizität zu unrealistischen Kontaktzonen führt, daß diese Fehleinschätzungen in der Lasteinleitung jedoch die von der

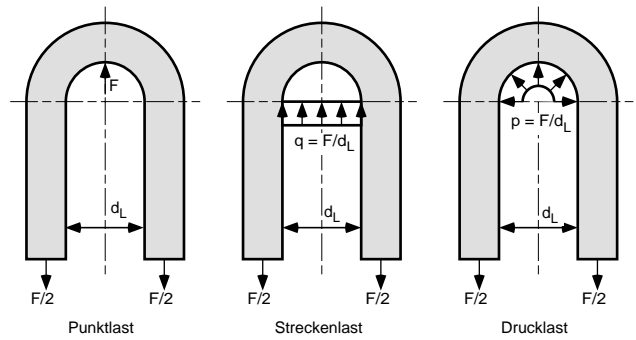


Bild 4.1 Varianten der Lasteinleitung bei der Laschenberechnung

Lasteinleitungszone weiter entfernten Bereiche nicht sehr stark beeinflussen. Zur Berechnung des Laschenverhaltens können folgende Lasteinleitungsvarianten gewählt werden (**Bild 4.1**):

- Punktförmige Lasteinleitung für Laschen mit großem Bolzenspiel.
- Streckenförmige Lasteinleitung für Laschen mit kleinem Bolzenspiel.
- Druckförmige Lasteinleitung für Laschen mit keinem oder kleinstem Bolzenspiel.

Bei Laschen mit großem Bolzenspiel führt die Annahme der punktförmigen Last bei der analytischen Rechnung zu einer Singularität. Bei kleinem Bolzenspiel liegt die Streckenlast (Lochleibung) auf der sicheren Seite der Rechnung, die druckförmige Belastung wird den numerisch und experimentell ermittelten Werten eher gerecht.

Die für die Festlegung der Randbedingungen im mechanischen Ansatz wichtigsten Fesselungsfälle sind in **Bild 4.2** dargestellt. Zur Beeinflussung des Kontaktverhaltens durch die Fesselung der Lasche (und damit zur Wahl des Lasteinleitungsfalles für die Be-

Nummer Randbedingung	Fesselungsfall			
	1 Enden frei	2 Enden verdrehbar	3 Enden verschiebbar	4 Enden eingespannt
Öse				
Lasche				
Translation Rotation	gegeben: F_q gesucht: δ gegeben: M_b gesucht: β	gegeben: δ gesucht: F_q gegeben: M_b gesucht: β	gegeben: F_q gesucht: δ gegeben: β gesucht: M_b	gegeben: δ gesucht: F_q gegeben: β gesucht: M_b

Bild 4.2 Wahl der Randbedingungen bei der Laschenberechnung

rechnung) konnte anhand vergleichender FEM-Rechnungen festgestellt werden:

- Je größer das Bolzenspiel ist, desto geringeren Einfluß hat die Fesselungsvariante auf den Kontaktwinkel.
- Je kleiner das Bolzenspiel ist, desto größeren Einfluß hat die Fesselungsvariante auf den Kontaktwinkel.
- Je härter die Einspannbedingung ist, desto kleiner ist der Kontaktwinkel. Die in Bild 4.2 gezeigten Fesselungsfälle zeigen mit aufsteigender Nummer eine größere "Härte" der Einspannbedingung.

Bild 4.3 zeigt aus einer Reihe von FE-Rechnungen die Kontaktwinkel bei unterschiedlicher Fesselung über das Bolzenspiel aufgetragen. Von wesentlich geringerem Einfluß auf die Kontaktzone und damit auch auf die Beanspruchungen im Laschenkopf ergab sich nach FEM-Parameterrechnungen der Einfluß der Schenkellänge. Lediglich sehr kurze Schenkellängen zeigten Ergebnisse, die den Bedingungen harter Einspannung vergleichbar sind.

Bild 4.4 bis 4.6 stellen die Ergebnisse der durchgeführten numerischen Berechnungen und den Vergleich mit den Ansätzen nach Bild 4.1 in übersichtlicher Form dar. Aufgetragen ist die maximale Tangentialspannung im Wangenquerschnitt. "Punkt-

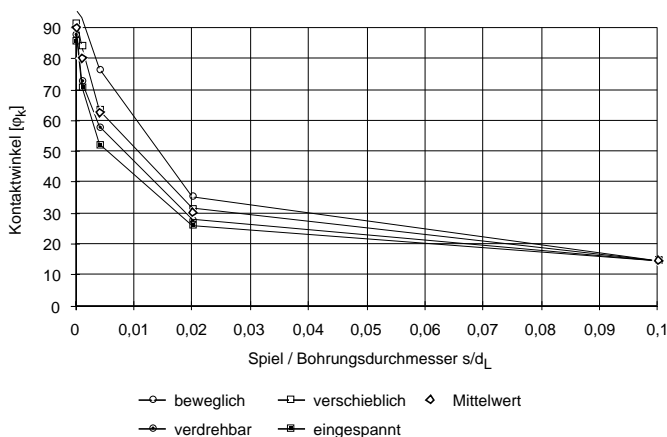


Bild 4.3 Kontaktwinkel bei unterschiedlicher Fesselung und Bolzenspiel

last, Streckenlast und Drucklast" bezeichnen Ergebnisse aus den im folgenden vorgestellten analytisch berechneten Modellen, die mit Spielangaben versehenen Darstellungen sind Ergebnisse von FEM-Rechnungen. Die Darstellungen sollen eine Hilfe für die Wahl des entsprechenden Ansatzes bei analytischer Berechnung geben.

Variationen der Bolzen- und Ösenform haben gegenüber den bisher genannten Parametern einen wesentlich geringeren Einfluß. Die Erhöhung der Nachgiebigkeit dieser Elemente bewirkt grundsätzlich bei geringen Bolzenspielen eine Erhöhung der Kontaktwinkel, was sich aber in der Ausbildung der Beanspruchungen nicht sonderlich bemerkbar macht. Auch die Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe (z.B. Aluminiumlasche und Stahlbolzen) führt zwar zu einer Veränderung der Kontaktwinkel, die aber nicht wesentlich für das Beanspruchungs- und Verformungsverhalten ist. Da der Kontaktwinkel bei weicherem Material größer wird, nimmt die Biegespannung in der Wange ab, so daß eine Berechnung für Stahl bei den Spannungen zu höheren Werten führt und damit auf der sicheren Seite liegt.

4.2 Mechanischer Berechnungsansatz

Die durchgeführten parametrischen Untersuchungen erlauben Vereinfachungen, die es gestatten, das Gesamtproblem der dreidimensional gestalteten und beanspruchten Verbindung in Teilprobleme aufzuteilen und ohne große Fehler zur Gesamtlösung zu superpositionieren:

- Aufteilung des dreidimensionalen Bauteils in den Querschnitt und in den Längsschnitt. Unter dem Querschnitt wird die Ansicht senkrecht, unter dem Längsschnitt wird die Ansicht parallel zur Bolzenachse verstanden (vergl. Bild 1.1).
- Im Querschnitt liegt in der Kontaktzone in erster Näherung ein Normalspannungszustand vor. Dadurch lassen sich die beiden Hauptspannungen getrennt als Radial- und Tangentialspannung berechnen.
- Die für den Querschnitt ermittelten Radialspannungen werden im Längsschnitt durch den Effekt des Kantentragens bzw. der Bolzenbiegung überlagert.

Während der Erprobungsphase der analytischen Berechnungen zeigte sich, daß die Annahme und Abschätzung der zu treffenden Randbedingungen eine dominierende Bedeutung für die Ergebnistüte haben. Die Fehler, die durch eine Reihe mechanischer Vereinfachungen gemacht werden, sind wesentlich geringer als die Fehler, die durch eine falsche Lagerung verursacht werden.

Als Ansatz zur Bauteilbeschreibung wird für den gebogenen Teil der Lasche (im folgenden Öse genannt), das mechanische Modell eines stark ge-

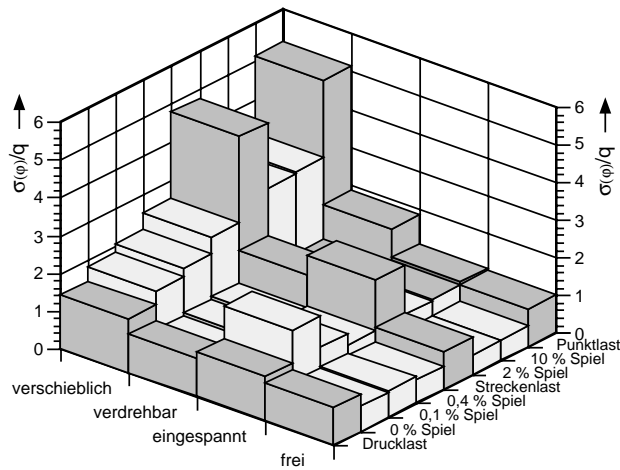


Bild 4.4 Vergleich der maximalen Tangentialspannung im Wangenquerschnitt für eine Lasche mit dem Schenkelverhältnis $l/r = 0$

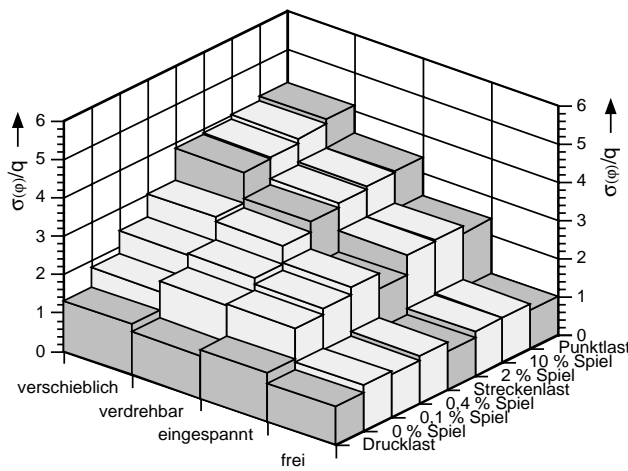


Bild 4.5 Vergleich der maximalen Tangentialspannung im Wangenquerschnitt für eine Lasche mit dem Schenkelverhältnis $l/r = 1$

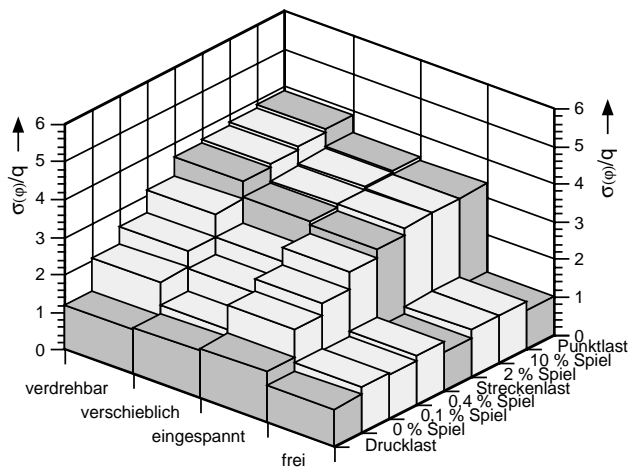


Bild 4.6 Vergleich der maximalen Tangentialspannung im Wangenquerschnitt für eine Lasche mit dem Schenkelverhältnis $l/r = 2$

krümmten Balkens gewählt (**Bild 4.7**). An diesen schließt sich optional ein Schenkel an. Die Querschnitte sind zur Biegungsebene symmetrisch (ge-

rade Biegung), die Querschnitte stehen vor und nach der Belastung senkrecht zur neutralen Faser (Bernoulli-Hypothese).

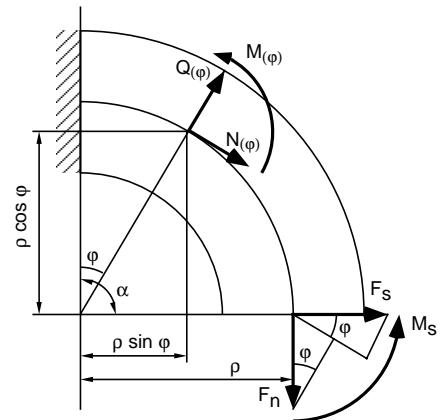


Bild 4.7 Mechanisches Ersatzbild einer punktförmig belasteten Öse

Nach den Grundgleichungen für den Balken /12,13/ läßt sich die im Balkenquerschnitt herrschende Spannung beschreiben durch

$$\sigma = \sigma_z + \sigma_b$$

mit $\sigma_z = \frac{F_n}{A_L}$ (4-1)

und $\sigma_b = \frac{M_b}{A_L \rho} \left(1 + \frac{A_L \rho^2}{J} \frac{\eta}{\rho + \eta} \right)$

Die für die Berechnung der Querschnittsfläche A und das Trägheitsmoment J für gekrümmte Stäbe geltenden Formeln für einige wichtige Querschnitte enthält **Bild 4.8**. Im folgenden soll das Berechnungsverfahren am Beispiel der punktförmigen Lasteinleitung vorgestellt werden, die anderen Lastmodelle berechnen sich analog und sind im Anschluß an die Entwicklung in ihren Ergebnissen tabellarisch aufgeführt.

Für die punktförmig belastete Öse nach Bild 4.7 lassen sich unabhängig von der Fesselung die Schnittgrößen ermitteln zu

$$N(\varphi) = F_n \sin \varphi + F_s \cos \varphi$$

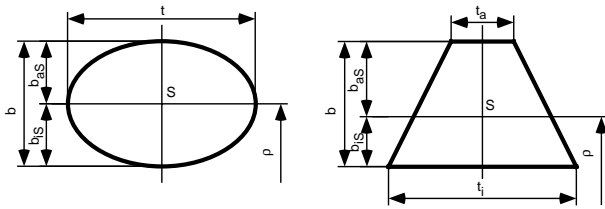
$$M(\varphi) = F_n \rho (1 - \sin \varphi) - F_s \rho \cos \varphi - M_s \quad (4-2)$$

Die Verzerrung an einem beliebigen Ort der Öse ergibt sich nach /13/ zu

$$\gamma_o = \frac{N(\varphi) + \frac{M(\varphi) \kappa + 1}{\rho \kappa}}{A_L E}$$

$$= \frac{F_n \rho (1 + \kappa - \sin \varphi) - F_s \rho \cos \varphi - M_s (1 + \kappa)}{A_L E \kappa \rho} \quad (4-3)$$

mit $\kappa = \frac{J}{A_L \rho^2}$



Form	Querschnitt	Trägheitsmoment
allgemein	$A_L = \int_{b_1}^{b_2} t(\eta) d\eta$	$J_L = \int_{b_1}^{b_2} t(\eta) \frac{\eta^2}{1 + \frac{\eta}{\rho}} d\eta$
Ellipse	$A_E = \pi r t$ mit $r = \frac{b}{2}$	$J_E = \pi r t \rho^2 \left\{ 2 \frac{\rho}{r} \left[\frac{\rho}{r} - \sqrt{\left(\frac{\rho}{r}\right)^2 - 1} \right] - 1 \right\}$
Kreis	$A_K = \pi r^2$ mit $r = \frac{b}{2}$	$J_K = \pi r^2 \rho^2 \left\{ 2 \frac{\rho}{r} \left[\frac{\rho}{r} - \sqrt{\left(\frac{\rho}{r}\right)^2 - 1} \right] - 1 \right\}$
Trapez	$A_T = b \frac{t_i + t_a}{2}$	$J_T = \frac{\rho^5}{b} \left\{ \frac{t_a - t_i}{\rho} \left(\frac{b}{\rho} - \frac{b_{as}^2 - b_{is}^2}{2\rho^2} + \frac{b_{as}^3 - b_{is}^3}{3\rho^3} \right) + \frac{t_{sr}}{\rho} \frac{b}{\rho} \left(\frac{b}{\rho} - \frac{b_{as}^2 - b_{is}^2}{2\rho^2} \right) + \left(\frac{t_a - t_i}{\rho} - \frac{b t_{sr}}{\rho} \right) \ln \frac{1 + \frac{b_{1r}}{\rho}}{1 + \frac{b_{2r}}{\rho}} \right\}$ <p>mit</p> $t_{sr} = \frac{2 t_i^2 + t_i t_a + t_a^2}{3(t_i + t_a)}$ $b_{1r} = -b \frac{t_i + 2t_a}{3(t_i + t_a)}$ $b_{2r} = b \frac{2t_i + t_a}{3(t_i + t_a)}$
Rechteck	$A_R = b t$	$J_R = \rho^4 \frac{t}{\rho} \left\{ \ln \frac{1 + \frac{b}{2\rho}}{1 - \frac{b}{2\rho}} - \frac{b}{\rho} \right\}$
Dreieck	$A_D = b \frac{t}{2}$	$J_R = \rho^4 \frac{t}{\rho} \left\{ \ln \frac{1 + \frac{b}{2\rho}}{1 - \frac{b}{2\rho}} - \frac{b}{\rho} \right\}$

Bild 4.8 Formeln zur Berechnung der Querschnittsfläche A und des Trägheitsmoments J für gekrümmte Stäbe

Der Verdrehungswinkel der Ösenenden β_0 ergibt sich durch Integration der Ösenverzerrung γ_0 über den gesamten Ösenwinkel α . Da der Ösenwinkel in Bild 4.7 im Uhrzeigersinn verläuft (mathematisch negativ) muß eine Vorzeichenkorrektur vorgenommen werden.

$$\beta_0 = - \int_0^\alpha \gamma_0 d\varphi \tag{4-4}$$

$$= \frac{F_n \rho [1 - \alpha (1 + \kappa) - \cos \alpha] + F_s \rho \sin \alpha + M_s \alpha (1 + \kappa)}{A_L E \kappa \rho}$$

Die Verschiebung der Ösenenden δ_0 addiert sich aus zwei Komponenten δ_{01} und δ_{02} (Bild 4.9). Die

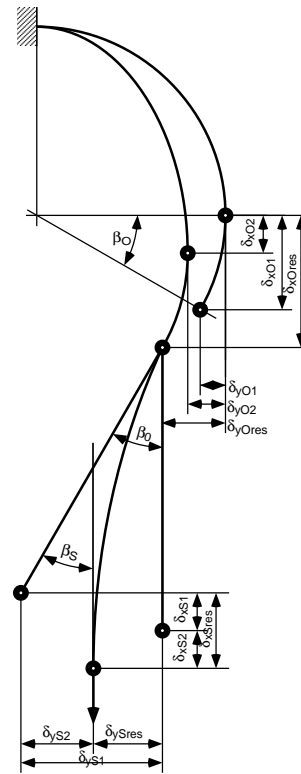


Bild 4.9 Mechanisches Rsatzbild einer Lasche mit punktförmiger Lastenleitung zur Berechnung der Verformungen

erste berücksichtigt die Verdrehung der Ösenenden

$$\delta_{01} = \beta_0 \rho \cos \alpha \tag{4-5}$$

$$= \frac{\cos \alpha}{A_L E \kappa} \{ F_n \rho [1 - \alpha (1 + \kappa) - \cos \alpha] + F_s \rho \sin \alpha + M_s \alpha (1 + \kappa) \}$$

Die zweite Komponente erfaßt den Einfluß des in der Öse wirkenden Biegemomentes M_0 .

$$\delta_{02} = - \frac{1}{E A \kappa} \int_0^\alpha M(\varphi) \cos \varphi d\varphi \tag{4-6}$$

$$= \frac{F_n r (1 - 2 \sin \alpha - \cos^2 \alpha) + F_s r (\alpha + \sin \alpha \cos \alpha) + 2 M_s \sin \alpha}{2 A_L E \kappa}$$

Hieraus ergibt sich die resultierende Ösenverschiebung:

$$\delta_0 = \delta_{01} = \delta_{02} \tag{4-7}$$

Schließt sich an die Öse ein Schenkel der Länge l an, so werden die Belastungen F_s und M_s zu den Schnittgrößen zwischen Öse und Schenkel. Dabei muß beachtet werden, daß sich das Moment M_s aus den am Schenkelende angreifenden Lasten F_q und M_b errechnet zu

$$F_s = F_q \tag{4-8}$$

$$M_s = M_b + F_q l$$

Die Verdrehung der Lasche läßt sich aus der bekannten Balkenbiegungsformel berechnen

$$\beta_s = \frac{l}{2EJ} (F_q l + 2M_b) \quad (4-9)$$

Die resultierende Verdrehung der Laschenenden ergibt sich aus der Addition der Einzelverdrehungen von Öse und Schenkel. Unter Berücksichtigung der Übergangsbedingungen für F_s und M_s gilt

$$\beta_L = \beta_o + \beta_s \quad (4-10)$$

Fesselungsfall Bild 4.2	Laschenende	Lagerreaktionen
1	frei beweglich	$F_q = 0$ $M_b = 0$
2	verdrehbar nicht verschiebar	$F_{q,90^\circ} = 6F_n J \rho \frac{\rho + l [\pi(1+\kappa) - 2]}{3J [\pi\rho^2 + 8\rho l + 2l^2 \pi(1+\kappa)] + 4A_L \kappa \rho l^3}$ $M_b = 0$
3	verschiebar nicht verdrehbar	$F_{q,90^\circ} = 0$ $M_{b,90^\circ} = F_n J \rho \frac{\pi(1+\kappa) - 2}{J \pi(1+\kappa) + 2A_L \kappa \rho l}$
4	eingespannt	$F_{q,90^\circ} = 6F_n J \rho l \frac{J \left\langle 2 - \frac{\pi}{2}(1+\kappa) \right\rangle + A_L l \kappa \left\langle l \left[\frac{\pi}{2}(1+\kappa) - 1 \right] + \rho \right\rangle}{6J^2 \rho \left[\frac{\pi^2}{4}(1+\kappa) - 2 \right] + 2A_L J \kappa l \left[\pi^2(1+\kappa) + 6l\rho + \frac{3\pi}{2}\rho^2 \right] + A_L^2 \kappa^2 l^4 \rho}$ $M_{b,90^\circ} = F_n J \rho l \frac{6J \left\langle l \left[2 - \frac{\pi}{2}(1+\kappa) \right] + \rho \left\langle \frac{\pi}{2} \left[1 - \frac{\pi}{2}(1+\kappa) \right] + 1 \right\rangle \right\rangle + A_L l^2 \left\langle 2\kappa l \left[\frac{\pi}{2}(1+\kappa) - 1 \right] + 3\kappa\rho \right\rangle}{6J^2 \rho \left[\frac{\pi^2}{4}(1+\kappa) - 2 \right] + 2J A_L \kappa l \left[\pi^2(1+\kappa) + 6l\rho + \frac{3\pi}{2}\rho^2 \right] + A_L^2 \kappa^2 l^4 \rho}$

Die Verschiebung der Laschenenden setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Die erste berücksichtigt die Verschiebung, die sich durch die Verdrehung der Ösenenden ergibt

$$\delta_{s1} = l \beta_o = \frac{l}{A_L E \kappa r} \left\{ \begin{array}{l} F_n r [1 - \alpha(1+\kappa) - \cos \alpha] \\ + F_s r \sin \phi + M_s \alpha(1+\kappa) \end{array} \right\} \quad (4-11)$$

Die andere Komponente ist durch die Balkenbiegungsformel unter Einzellast und Biegemoment bekannt.

$$\delta_{s2} = \frac{l^2}{6EJ} (2F_q l + 3M_b) \quad (4-12)$$

Daraus ergibt sich durch Addition

$$\delta_s = \delta_{s1} + \delta_{s2} \quad (4-13)$$

Und die resultierende Verschiebung entsteht durch Superposition der einzelnen Einflüsse.

$$\delta_L = \delta_o + \delta_s \quad (4-14)$$

Die diesem Lastfall zugeordneten Lagerreaktionen gemäß Bild 4.2 sind in **Tab. 4.1** aufgeführt. Die Formeln darin gelten für Laschen, deren Schenkel parallel verlaufen und bei denen sich infolge des mathematisch einfach zu handhabenden Ösenwinkels $\alpha = \pi/2$ vereinfachte Gleichungen ergeben.

Die Gleichungssätze zur Berechnung aller Lastfälle gemäß Bild 4.1 und aller Fesselungsfälle gemäß Bild 4.2 sind als **Anhang** zusammenfassend tabellarisch aufgeführt.

Als Ergebnis zu diesen Berechnungen zeigt **Bild**

4.10 die Verformungen der Schwerpunktlinie für eine Rechteck-Profillasche bei unterschiedlichen Lagerbedingungen und punktförmiger Lasteinleitung am Ösenkopf. Man erkennt beispielsweise, daß die Unterdrückung des Rotationsfreiheitsgrades im gesamten Bauteil zu wesentlich kleineren Verformungen führt, diese Verformungsbehinderung jedoch größere Spannungen erwarten läßt. Die fest eingespannte Lasche besitzt zwei Wendepunkte, an denen der Verformungsgradient sein Vorzeichen ändert. Die verdrehbare und verschiebliche Lasche weisen nur einen, die frei bewegliche keinen Wendepunkt auf.

4.2.3 Beanspruchungsanalyse

Als Auswertung der oben beschriebenen Gleichungen zeigt **Bild 4.11** die Spannungsfelder unterschiedlich gefesselter Laschen mit Rechteckquerschnitt. Dargestellt sind die Linien gleicher Normalspannung σ_n normiert auf die Zugspannung σ_z .

Die Laschen, deren Rotationsfreiheitsgrad eingeschränkt sind, weisen im Schenkel die typische Spannungsverteilung eines Biegebalkens auf, während sich in den Laschen, die sich verdrehen dürfen, im Schenkel die Spannungsverteilung eines Zugstabes einstellt. Das Spannungsminimum liegt immer innen, das Spannungsmaximum immer außen am Ösenkopf, dies ist im wesentlichen durch die singuläre Lasteinleitung bedingt. Mit Ausnahme der frei beweglichen Lasche kommt es im Wangenquerschnitt zu einer zweiten Spannungsspitze an der La-

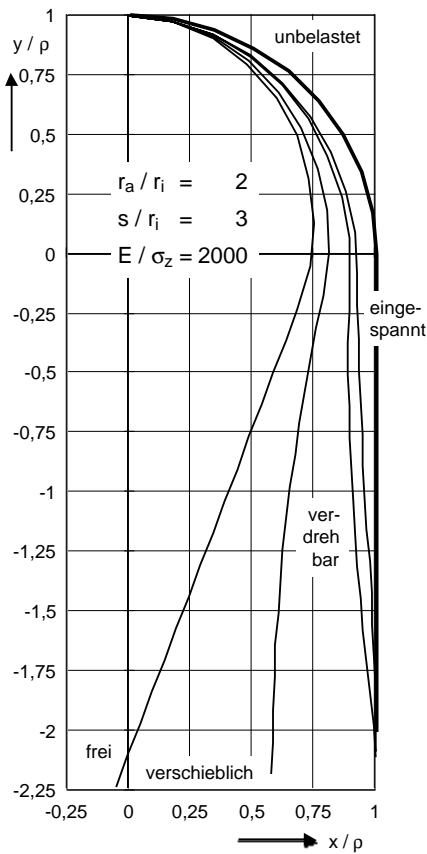


Bild 4.10 Verformungsverhalten identischer Laschen bei unterschiedlicher Einspannung (Verformungen um den Faktor 50 übertrieben dargestellt)

schenbohrung, die bei den verschiebungsbehinderten Schenkeln (Enden verdrehbar bzw. eingespannt) rund doppelt so groß ausfällt wie bei der verdrehbehinderten Geometrie (Enden verschieblich).

Der Vergleich dieser analytisch ermittelten Ergebnisse mit numerischen Berechnungen und DMS-Messungen zeigt trotz der vorgenommenen Reihe von Vereinfachungen eine erstaunlich gute Übereinstimmung. **Tabelle 4.2** und **Tabelle 4.3** beweisen anhand eines Berechnungsfalls, daß sowohl die Schnittgrößen wie auch die kritischen Tangentialspannungen an der Wangeninnenseite hinreichend genau mit dem beschriebenen Verfahren ermittelt werden können. FE-Reihenuntersuchungen zeigen ferner, daß auch Verbindungen mit wenig Spiel und dadurch überwiegend rotationssymmetrischem Spannungszustand

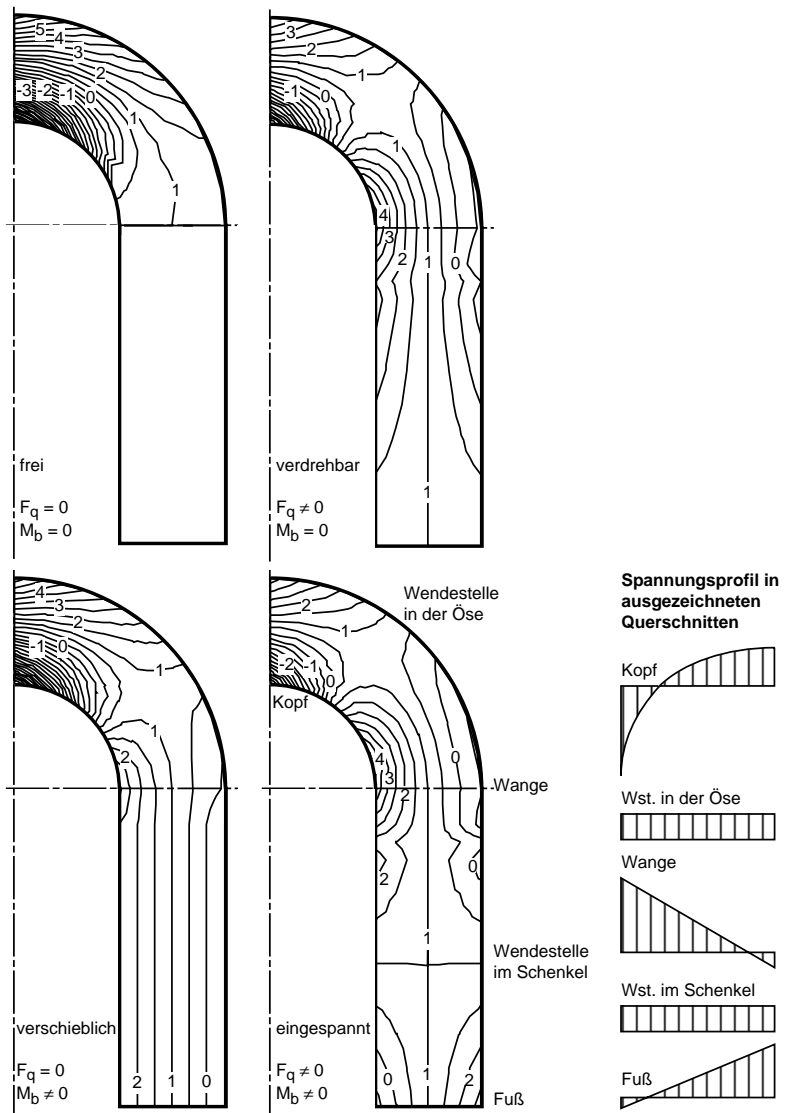


Bild 4.11 Linien gleicher Normalspannungen für unterschiedlich eingespannte Laschen

im Auge Tangentialspannungen aufweisen, die von den hier berechneten Beanspruchungsgrößen nur geringfügig abweichen. Zur Berechnung der Tangentialspannung in der Wange ist also die hier vorgestellte vereinfachte Berechnung der Lasche mit Belastung durch Einzelkraft mit ingenieurmäßiger Genauigkeit gültig und praktisch unabhängig vom Bolzenspiel.

Fessel-fall	F _q [N]		M _b [Nm]		β _L [rad]		d _L [mm]	
	analy-tisch	nume-risch	analy-tisch	nume-risch	analy-tisch	nume-risch	analy-tisch	nume-risch
1	0	0	0	0	-0,01	-0,01	-1,59	-1,58
2	623	599	0	0	0,002	0,002	0	0
3	0	0	63	60	0	0	-0,62	-0,64
4	1049	1040	-71	-74	0	0	0	0

Tabelle 4.2 Ergebnisvergleich der Lagerreaktionen für Punktlast bei unterschiedlicher Fesselung (Die FEM-Rechnungen wurden mit dem Programm ASKA durchgeführt)

Fessel-fall	σ_{Wi} [N/mm ²]		σ_{Wa} [N/mm ²]	
	analy-tisch	nume-risch	analy-tisch	nume-risch
1	100	112	100	92
2	414	381	-57	-90
3	311	295	-6	-40
4	391	362	-46	-90

Tabelle 4.3 Ergebnisvergleich der Tangentialspannungen im Wangeninnen- (σ_{Wi}) und -außenquerschnitt (σ_{Wa}) für Punktlast bei unterschiedlicher Fesselung. (Die FEM-Rechnungen wurden mit dem Programm MARC durchgeführt.)

Unterschiede sind dagegen bezüglich der Radialspannung zu erwarten in Laschen, bei denen der Bolzen eine flächige Auflage nach Bild 4.1 mitte und rechts hat. Der hier am besten übereinstimmende Ansatz mit vergleichenden FEM-Untersuchungen ist praktisch für den gesamten Bereich der Kontaktzone der Ansatz der Spannung in einem Rohr unter Innendruck:

$$\sigma(r, \varphi) = p \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_a^2}{r^2} \right) \quad \text{für } \varphi < \frac{\varphi_k}{2} \quad (4-15)$$

Bild 4.12 zeigt den Radialspannungsverlauf für eine Lasche, deren Außendurchmesser dem doppelten Bohrungsdurchmesser entspricht. **Bild 4.13** stellt dies noch einmal sehr deutlich an der Auswertung einer numerischen Rechnung eines Augenstabes mit kleinem Spiel dar: Auf der linken Seite ist die Verteilung der Radialspannung unabhängig vom Laschenwinkel in der typischen Verteilung des Rohres unter Innendruck. Die auf der rechten Seite gezeigte Schubspannung kann in weiten Bereichen der Lasche vernachlässigt werden, da sowohl im Kontaktbereich als auch im Bereich der Laschenenden die Radial- und Tangentialspannungen Hauptspannungen darstellen. Lediglich in einem kleinen Sektor um das Kontaktende bildet sich ein komplexer Spannungszustand aus, der Schubspannungen etwa in Höhe von 25 % der Radialspannungen aufweist.

4.2.4 Überlagerung zum mehrdimensionalen Beanspruchungszustand

Im folgenden soll versucht werden aus den

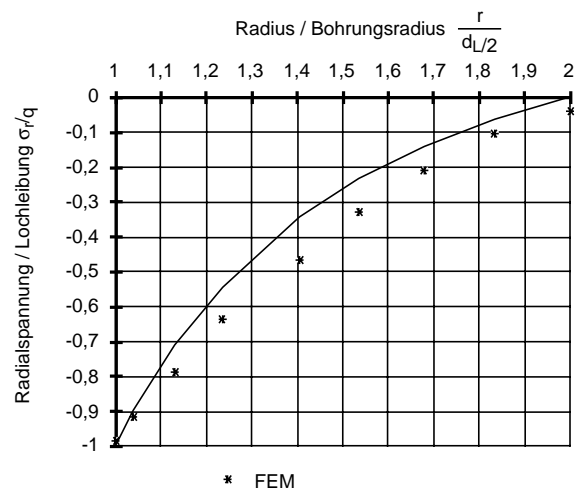


Bild 4.12 Radialspannungsverlauf für Bolzen-Lasche-Verbindung mit geringem Spiel, Ergebnisse nach FEM und Glg. 4-15

in den vorhergehenden Abschnitten ermittelten Beanspruchungen der ebenen Belastungsfälle durch geeignete Superposition eine Beurteilung der Beanspruchung des dreidimensionalen Bauteils zu erhalten. Da in den am höchsten belasteten Bereichen die Schubspannungen eine untergeordnete Rolle spielen und man daher zumindestens näherungsweise von einem Hauptspannungszustand sprechen kann, könnte ein Ansatz zur Überlagerung der Beanspruchungskomponenten wie folgt lauten

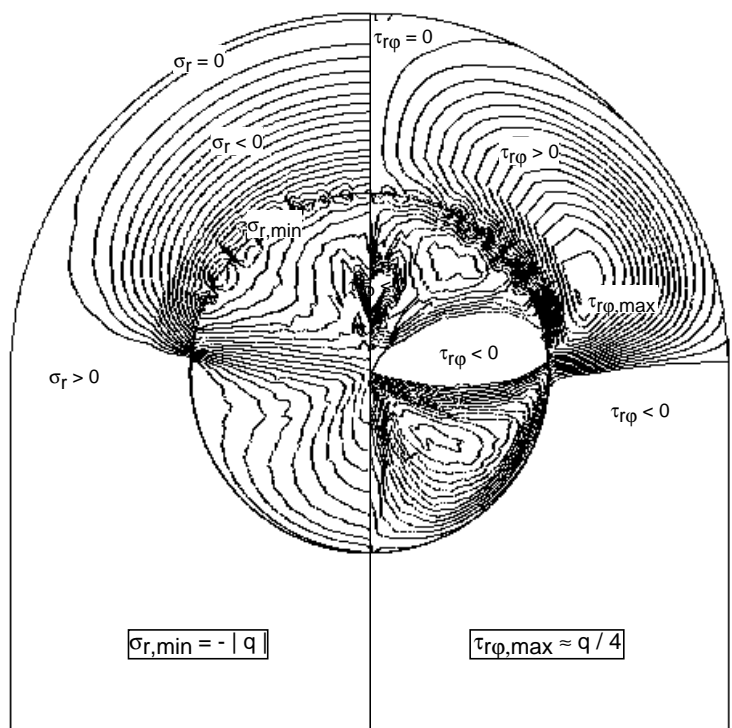


Bild 4.13 Linien gleicher Spannung in einem Augenstab mit einem Spiel von 0,1%, ermittelt mit FEM. Links: Radialspannung σ_r . Rechts: Schubspannung $\tau_{r\phi}$

$$\varphi = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} \sigma_1 &\approx \sigma_r(r, \varphi) \\ \sigma_2 &\approx \sigma_t(r, \varphi) \\ \sigma_3 &\approx \sigma_a \end{aligned} \quad (4-16)$$

Dabei treten Spannungen in Bolzenaxialrichtung σ_a und ihre zugeordneten Schubspannungen in symmetrisch belasteten Verbindungen praktisch nicht auf.

Der kritische Ort einer Bolzenverbindung ist der Wangenquerschnitt. Hier erreicht die Tangentialspannung ihren Maximalwert. Nur bei sehr kleinen Bolzenspielen tritt hier zusätzlich eine Radialspannung auf. Auf jeden Fall ist zu prüfen, ob die Vergleichsspannung die Fließgrenze überschreitet.

Von meist geringerem Interesse ist die Kenntnis der Radialspannung an jedem Ort der Öse. Nach Ermittlung des mittleren Radialdrucks über den Kontaktwinkel und des Kontaktdruckverlaufes über die Kontaktbreite lassen sich diese nach ihrer Normierung (z.B. auf die Lochleibung) miteinander multiplizieren. Damit ist an jedem Ort der Kontaktzone der Kontaktdruck bekannt. Mit Hilfe der Formel für ein durch Innendruck belastetes Rohr kann mit diesem Wert in Abhängigkeit von der Ösengeometrie die Radialspannung im Bauteil ermittelt werden.

5. Optimierte Bolzen-Laschenverbindungen

Ausgehend vom klassischen Augenstab mit rechteckigem Laschenprofil und breitem Schenkel bieten sich sowohl der Quer- als auch der Längsschnitt zur Optimierung an, denn beide Ansichten zeichnen sich durch Verformungsbehinderungen aus, die unmittelbar zu Spannungsüberhöhungen führen. Durch geometrische Optimierung können auch Trägheitsmomente an unkritischen Querschnitten gezielt verringert werden. Wie die Ableitungen zur Kontaktdruckverteilung gezeigt haben, können schon kleine Deformationen erhebliche Spannungsminderungen bewirken.

Das eleganteste und am leichtesten in ein bestehendes FEM-Programmpaket zu integrierende Verfahren ist die von Mattheck /14/ propagierte CAO. Die hier gemachten Erfahrungen lassen jedoch erkennen, daß sich die Natur leider nicht uneingeschränkt kopieren läßt, da sie sowohl in den Ansätzen als auch in fertigungsbedingten Randbedingungen auf Schwierigkeiten stoßen. Die dabei gefundenen Bauteilformen sind prinzipiell nicht neu. Opti-

mierte Laschenprofile findet man seit vielen Jahren im Kraftfahrzeugpleuel. Bei der Entwicklung von Leichtbaukonstruktionen wurde von Hertel /8/ bereits eine Kontur vorgeschlagen, die der hier ermittelten stark ähnelt.

5.1 Optimierung der Laschenkontur

Ausgehend vom klassischen Augenstab wurden mit den ordnenden Gesichtspunkten Form, Anzahl und Orientierung örtlicher Materialeinsparungen Varianten diskutiert und kombiniert. Eine zusammenfassende Darstellung der untersuchten Laschengemetrien enthält **Bild 5.1**. Ausgehend von einer gewählten Geometrie wurden dabei mit Hilfe der CAO Optimierungen vorgenommen.

Als optimale Geometrie einer Lasche ergab sich die Form nach **Bild 5.2**. Sie hat gegenüber der Vollasche eine um 20% geringere Masse. Die biegegewiche Gestalt erlaubt den Abbau von Spannungsspitzen durch Vermeidung unnötiger Verformungsbehinderungen. Die maximalen Spannungen verringern sich im Kopfquerschnitt um 25 % und an der Einspannstelle um 21 % gegenüber der Vollasche. Diese Lasche erlaubt auch die Aufnahme hoher Druckbeanspruchungen durch die Ausbildung des parallelen Steges zwischen Aussparung und Bohrung - unter Druck versagt die Lasche bei etwa 76 % der zulässigen Zugkraft.

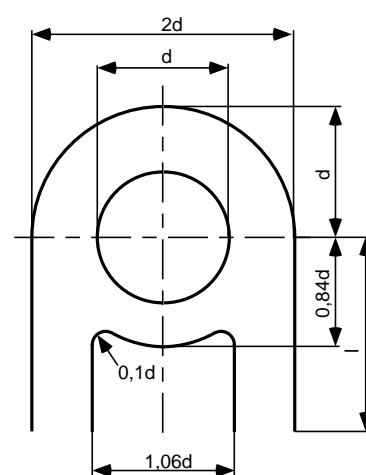


Bild 5.2 Optimierte Laschenform

Zur Verifizierung der numerischen Rechnungen wurden Bauteilzugversuche an Laschen vorgenommen, die aus Aluminium angefertigt wurden. Der Werkstoff Aluminium ermöglicht die Erreichung von großen Dehnungen bei kleinen

Zugkräften und somit eine bessere Meßbasis. **Bild 5.3** zeigt die Anordnung der Dehnmeßstreifen an einer optimierten Laschengemetrie. Zusätzlich zu den Messungen über Dehnmeßstreifen wurden an einer 3D-Meßmaschine die Verformungen auch bei überelastischer Beanspruchung gemessen. Als Auszug aus den Meßwerten zeigt **Bild 5.4** den Ver-

Geometrie	Bezeichnung	Volumen [%]	Bemerkung und Besonderheiten
	Grundlasche	100	voluminöse und steife Konstruktion, Verformungsbehinderung, große Spannungsüberhöhung
	eine mittige Bohrung	85,2	Durchmesser der Entlastungsbohrung muß größer als Hauptbohrung sein, Versagen an der Entlastungsbohrung
	zwei mittige Bohrungen in Längsachse	83,1	bei 90 mm Entlastungsbohrung wird Grenzspannung gleichzeitig an Entlastungs- u. Hauptbohrung erreicht
	ein mittiges Quadrat	84,1	Kantenlänge muß länger als Bohrungsdurchmesser sein, Verrundungsradius mindestens $R = 10 \text{ mm}$
	vier mittige Bohrungen	85,2	weit außen liegende Entlastungsbohrungen stören den Kraftfluß
	zwei mittige Bohrungen in Querachse	92,6	weit außen liegende Entlastungsbohrungen stören den Kraftfluß
	seitlich eingezogene Lasche	85,2	Störung des Kraftflusses durch außen geschwächte Geometrie
	Kettenglied	70,9	optimale Führung des Kraftflusses, biegeweiche Konstruktion, aber keine Druckkraftübertragung möglich!
	ein mittiges Langloch	81,5	Weiterentwicklung einer mittigen Bohrung, Spannungsverlauf an der Hauptbohrung wird verbessert
	ein mittiges Rechteck	79,4	weitere Verbesserung der Spannungsverläufe gegenüber Langloch, Stegeometrie für Druckbelastung noch verbesserungswürdig
	verrundeter Rechteckausbruch	80,4	optimale Geometrie bei einer Aussparungsbreite von 106% des Bohrungsdurchmessers
	verrundeter Rechteckausbruch und runde Bohrung im	79,4	Verbesserung der Spannungsverläufe im Schenkel neben der Aussparung, aber Spannungsüberhöhung durch Kerbwirkung an den zusätzlichen
	verrundeter Rechteckausbruch und ovale Bohrung im	78,8	weitere Umlagerung von Spannungen in weniger beanspruchte Bereiche möglich, Ausführung kann je nach Anwendungsfall sinnvoll sein

Bild 5.1 Untersuchte Geometrien zur Optimierung der Laschenform

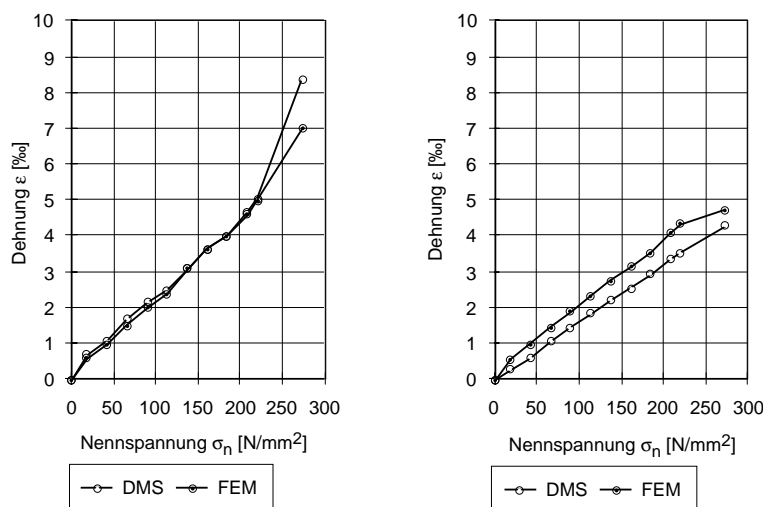


Bild 5.4 Vergleich der Dehnungen aus Versuchen und FEM-Berechnung. Links: Wange innen (Meßstelle 3, Bild 5.3). Rechts: Schenkel innen (Meßstelle 6, Bild 5.3)

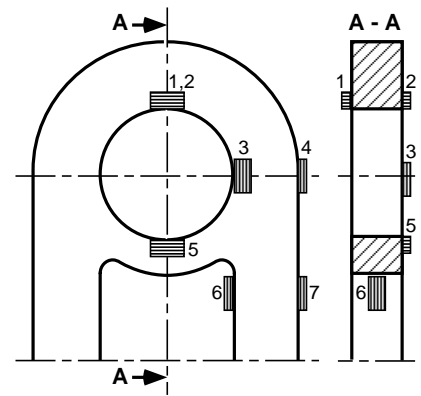


Bild 5.3 Anordnung der Dehnmeßstreifen auf der Versuchslasche mit optimierter Form

gleich der gemessenen und unter Berücksichtigung der Verfestigungen im Werkstoff berechneten Dehnungswerte. Dieser Vergleich zeigt, daß die Voraussagen über die FEM-Rechnungen bis weit in den teilplastischen Bereich hinein gelten.

5.2 Optimierung der Laschenprofile

Die Optimierung der Laschenprofile geschieht aus Gründen der Angleichung des Querschnitts-Widerstandsmomentes, aber auch insbesondere zur Optimierung der Kanten geometrie mit dem Zweck, durch Anfasen oder Abrunden das Kantentragen zu vermindern. Eine alleinige Veränderung der Bohrungsgeometrie führt dabei nicht zum Optimum, weil die Ausbildung der Flächenpressung über der Bohrungslänge dann von der Höhe der Belastung abhängt. Eine sinnvolle Maßnahme dagegen ist eine biegeweiche Gestaltung der Laschenkanten, wie sie in den in Bild 5.5 gezeigten Profilen dargestellt ist. Bezüglich dieser Profilformen ergeben vergleichende Berechnungen die folgenden Ergebnisse.

5.2.1 Trapezprofilaschen

Zwischen den beiden Extremfällen eines Trapezes (Rechteck und Dreieck) wurde die Laschenaußentiefe t_a variiert. Die Laschenbreite b entspricht jeweils der Laschentiefe t . Die in **Bild 5.6** dargestell-

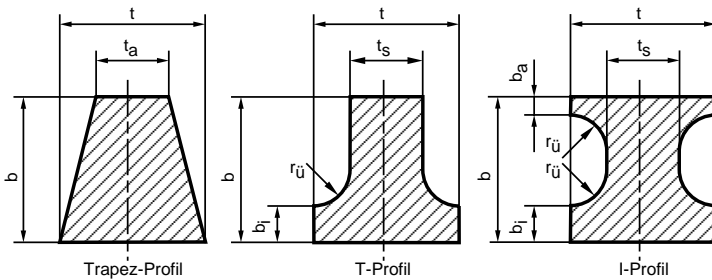


Bild 5.5 Typische Laschenprofile zur Spannungsminderung

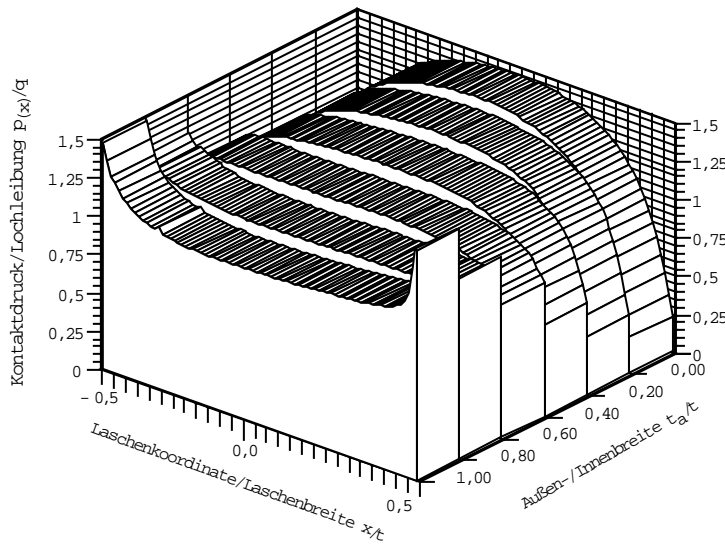


Bild 5.6 Kontaktdruckverteilung für Trapezprofile mit unterschiedlichen Breitenverhältnissen. Die Trapezhöhe entspricht der Innenbreite t

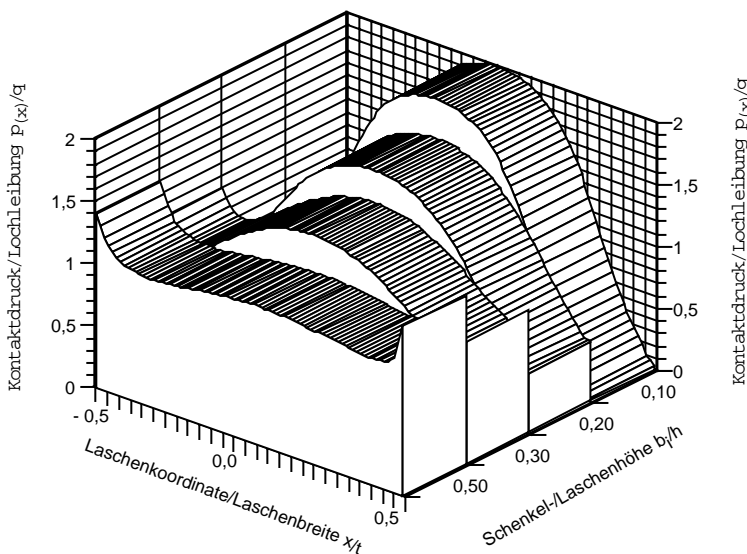


Bild 5.7 Kontaktdruckverteilung für T-Profile mit unterschiedlichem Verhältnis von Schenkelstärke zu Profilhöhe.

ten gefundenen grundsätzlichen Lastverteilungen über der Länge lassen erkennen, daß für ein Breitenverhältnis $t_a/t \approx 0,75$ sich eine nahezu konstante Druckspannungsverteilung einstellt. Die gleichmäßige Ausnutzung des Querschnittes ist unabhängig

von der Lasthöhe, da sich sowohl im elastischen auch im plastischen Bereich Spannungen und Verformungen im gleichen Betrag ändern.

5.2.2 T-Profillaschen

Die Hauptparameter einer Variation sind bei diesen Profilen die Schenkelstärke b_i und die Stegdicke t_s . Zwischen Schenkel und Steg wurde der maximal mögliche Verrundungsradius ausgenutzt.

Vergleiche in **Bild 5.7** zeigen, daß die Schenkelstärke b_i einen wesentlich größeren Einfluß auf die Kontaktdruckverteilung nimmt als die Stegdicke t_s : Hohe Schenkel verursachen Kantentragen und kleine Schenkel Mittentragen. Ein optimales Profil hat eine Schenkelstärke von $b_i/b \approx 0,4$. Dagegen haben Stegbreitenänderungen nur einen relativ kleinen Einfluß auf das Tragverhalten.

5.2.3 I-Profillaschen

Bei der Untersuchung dieser Profile wurde die Geometrie der unteren Laschenhälfte vom T-Profil übernommen ($b_i/b = 0,2$, $t_s/t = 0,4$) und der äußere Schenkel in seiner Höhe variiert. Im Kontaktbereich entsprechen die Ergebnisse denen des T-Profils. Der gegenüber dem T-Profil zusätzlich vorhandene Außenschenkel bewirkt zwar eine Versteifung der Lasche und damit eine geringfügige Verringerung des Kontaktwinkels, hat jedoch auf das Kantentragen keinen Einfluß.

6.

Zusammenfassung

Bei Bolzen-Lasche-Verbindungen treten drei nichtlineare Problemgebiete auf, die sich einer elementaren Berechnung entziehen: Die Ausbildung des Kontaktes zwischen Bolzen und Lasche unterteilt sich in die Bestimmung des Kontaktwinkels, die

Berechnung der Kontaktdruckverteilung und den Einfluß des Kantentragens. Ein weiterer nichtlinearer Einfluß ist das elastoplastische Materialverhalten.

Für die Beanspruchung in der Lasche ist die Verteilung des Kontaktdruckes über einen Kontaktwinkel entscheidend, da diese das in der Lasche wirkende Biegemoment beeinflußt. Je nach Bolzenspiel stellt sich eine unterschiedliche Verteilung ein, wobei man grundsätzlich die drei Fälle der rotationssymmetrischen Lasteinleitung über einen Winkel von 180° , den Lochleibungsdruck oder einen kosinusähnlichen Verlauf bei großen Bolzenspielen unterscheidet. Im Axialschnitt kommt es zu einem Kantentragen der Lasche, wobei linearelastische Ansätze meist eine Überbewertung der Beanspruchungen an der Laschenkante ergeben.

Um dieses nichtlineare und dreidimensionale Problem auf eine mit Ingenieurgenauigkeit arbeitende vereinfachende Berechnung zurückzuführen, wurden mit Hilfe umfangreicher FEM-Rechnungen der Einfluß typischer Parameter auf die Beanspruchung in der Lasche untersucht, beispielsweise die Lasteinleitung, die Schenkellänge, das Bolzenspiel usw. Diese systematische Variation der Einflüsse führt zu Abschätzungen über die gegenseitigen Abhängigkeiten, so daß man verschiedene Klassen von Einflüssen herausarbeiten kann, die dann in vereinfachten Berechnungssätzen eine Trennung der Problematik erlauben.

Als Ansatz für eine analytische Berechnung dient die Theorie des stark gekrümmten Balkens mit unterschiedlichen Lasteinleitungsklassen und Randbedingungen bezüglich der Schenkelfesselung. Ergebnisse dieser analytischen Ansätze und ihr Vergleich mit numerischen Berechnungen wie auch mit DMS-Messungen an Originalbauteilen zeigen eine für die Auslegungsrechnung solcher Verbindungselemente hinreichende Genauigkeit, wenn man die in den Laschen herrschenden Tangentialspannungen über den Sonderfall der punktförmigen Lasteinleitung berechnet und die Radialspannungen mit der Theorie des dickwandigen Rohres. Die Verteilung der Beanspruchungen über der Bohrungslänge kann getrennt durch eine überlagerte Abschätzung angegeben werden. Diese Ansätze und die FEM-Rechnung wurden genutzt zur Optimierung von Laschenformen mit dem Ziel einer gleichmäßigeren Werkstoffausnutzung. Allein durch Materialentnah-

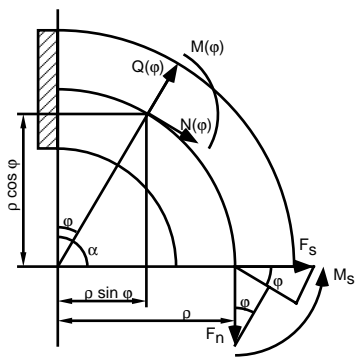
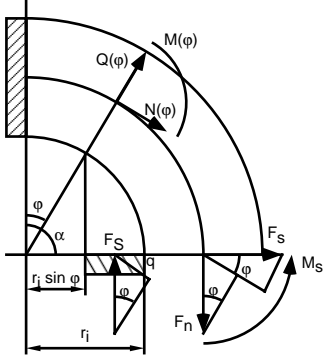
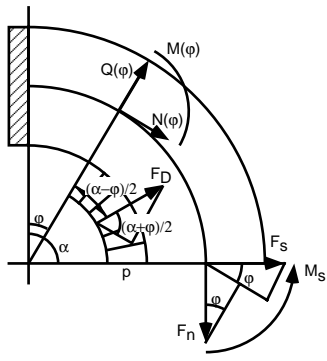
me gelingt es, den Kraftfluß so umzuleiten, daß das Kantentragen im Längsschnitt und die Biegespannung in den kritischen Querschnitten minimiert werden, begleitet von einer Gewichtseinsparung von bis zu 20 %.

Literatur

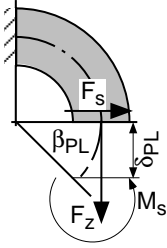
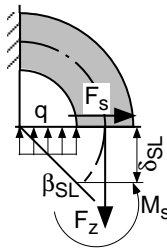
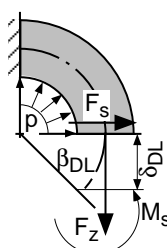
- /1/ Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau. 14. Auflage. Springer Verlag 1981
- /2/ Niemann, G. und Winter, H.: Maschinenelemente. 2. Auflage. Band 1 bis 3. Springer Verlag 1983
- /3/ Steinhilper, W. und Röper, R.: Maschinen- und Konstruktionselemente. Band 1 und 2. Springer Verlag 1985
- /4/ Göldner, H. und Holzweißig, F.: Leitfaden der Technischen Mechanik. 5. Auflage. Steinkopff-Verlag Darmstadt 1976
- /5/ Rucizka, M. und Joensson, D.: Ergebnisse zu Spannungs- und Verformungsanalysen an Augenstäben. Maschinenbautechnik 35 (9), 1986. S. 409 - 413
- /6/ Theocaris, S.S.: The Stress Distribution in a Strip Loaded in Tension by Means of a Central Pin. Journ. Appl. Mech. 23 (3), 1956. S. 85 - 90
- /7/ Frocht, M.M. und Hill, H.N.: Stress Concentration Factors Around a Central Circular Hole in a Plate Loaded Through Pin in the Hole. Journ. Appl. Mech. 7 (3), 1940. S. 5 - 7
- /8/ Hertel, H.: Ermüdungsfestigkeit der Konstruktionen. Springer Verlag 1969
- /9/ Schijve, J., Broek, D. und Jacobs, F.A.: Fatigue Tests on Aluminium Alloy with Special Reference to Fretting. Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, Amsterdam
- /10/ Göldner, H. u.a.: Lehrbuch Höhere Festigkeitslehre 1. 3. Auflage, Band 1, Springer Verlag 1991
- /11/ Poócza, A.: Berechnung von scheibenförmigen Kettengliedern. Konstruktion 28 (5), 1976. S. 190 - 192
- /12/ Bantlin, A.: Beitrag zur Bestimmung der Biegespannung in gekrümmten stabförmigen Körpern. Z-VDI 45, 1901. S. 164 - 168
- /13/ Baumann, A.: Berechnung von gekrümmten Stäben Z-VDI 52, 1908. Teil 1: S. 337 - 345, Teil 2: S. 376 - 382
- /14/ Mattheck, C.: Design in der Natur - Der Baum als Lehrmeister. 2. Ausg. Rombach Verlag Freiburg 1993

Anhang: Formelsammlung zur Berechnung von Bolzen-Lasche-Verbindungen bei elastischen Beanspruchungen

A1 Schnittgrößen für die unterschiedlichen Belastungstypen

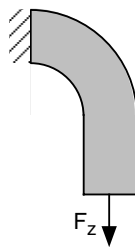
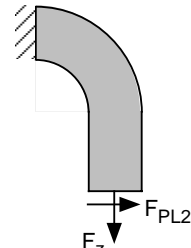
Lastfall	Schnittgrößen
	<p>Punktlast</p> $N_{PL}(\varphi) = F_n \sin \varphi + F_q \cos \varphi$ $Q_{PL}(\varphi) = F_q \sin \varphi - F_n \cos \varphi$ $M_{PL}(\varphi) = F_n \rho (1 - \sin \varphi) - F_q (l + \rho \cos \varphi) - M_b$
	<p>Streckenlast</p> $N_{SL}(\varphi) = F_n \sin^2 \varphi + F_q \cos \varphi$ $Q_{SL}(\varphi) = (F_q - F_n \cos \varphi) \sin \varphi$ $M_{SL}(\varphi) = \left(1 - \frac{r_i}{2\rho}\right) F_n \rho \cos^2 \varphi - F_q (l + \rho \cos \varphi) - M_b$
	<p>Drucklast</p> $N_{DL}(\varphi) = F_n \left(\frac{2 \sin^2 \frac{\alpha - \varphi}{2}}{\sin \alpha} - \sin \varphi \right) + F_q \cos \varphi$ $Q_{DL}(\varphi) = F_n \left(\frac{2 \sin \frac{\alpha - \varphi}{2} \cos \frac{\alpha - \varphi}{2}}{\sin \alpha} - \cos \varphi \right) + F_q \sin \varphi$ $M_{DL}(\varphi) = F_n \rho \left(1 - \frac{2 \sin^2 \frac{\alpha - \varphi}{2}}{\sin \alpha} - \sin \varphi \right) - F_q (l + \rho \cos \varphi) - M_b$

A2 Verformungsgleichungen für die unterschiedlichen Lastfälle nach Bild 4.1

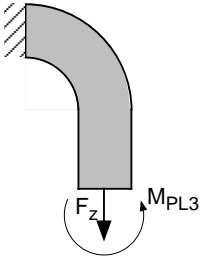
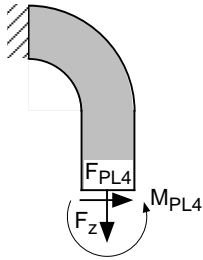
Lastfall	Verformungen
<p>Punktlast</p> 	$\beta_{PL}(\varphi) = \frac{F_z \rho [1 - \varphi(1 + \kappa) - \cos \varphi] + F_s \rho \sin \varphi + M_s \varphi(1 + \kappa)}{A_L E \kappa r}$ $\delta_{PL}(\varphi) = \beta_{PL}(\varphi) \rho \cos \varphi + \frac{F_z \rho(1 - 2 \sin \alpha - \cos^2 \alpha) + F_s \rho(\alpha + \sin \alpha \cos \alpha) + 2M_s \sin \alpha}{2A_L E \kappa}$
<p>Streckenlast</p> 	$\beta_{SL}(\varphi) = F_n \frac{r_i(\varphi + \cos \varphi \sin \varphi)(1 + \kappa) - 2\rho[\varphi(1 + 2\kappa) + \cos \varphi \sin \varphi]}{4A_L E \kappa \rho} + F_s \frac{\rho \sin \varphi}{A_L E \kappa \rho} + M_s \frac{\varphi(1 + \kappa)}{A_L E \kappa \rho}$ $\delta_{SL}(\varphi) = \beta_{SL}(\varphi) \rho \cos \varphi + F_n \frac{\sin \varphi(r_i - 2\rho)(2 + \cos^2 \varphi)}{6A_L E \kappa} + F_s \frac{\rho(\varphi + \cos \varphi \sin \varphi)}{2A_L E \kappa} + M_s \frac{\sin \varphi}{A_L E \kappa}$
<p>Drucklast</p> 	$\beta_{DL}(\varphi) = \frac{F_n \rho(\varphi - \sin \varphi \varphi(1 + \kappa) - \cos \varphi \sin \varphi) + F_s \rho \sin^2 \varphi + M_s \varphi \sin \varphi}{A_L E \kappa \rho \sin \varphi}$ $\delta_{DL}(\varphi) = \beta_{DL}(\varphi) \rho \cos \varphi + F_n \rho \frac{4(1 - \cos \varphi)(1 - \sin \varphi) - \sin \varphi \sin 2\varphi}{4A_L E \kappa \sin \varphi} + F_s \rho \frac{\sin \varphi(1 - \cos 2\varphi)}{4A_L E \kappa \sin \varphi} + M_s \frac{\sin \varphi(1 - \cos 2\varphi)}{A_L E \kappa \sin \varphi}$

A3 Lagerreaktionen für unterschiedliche Fesselung nach Bild 4.2

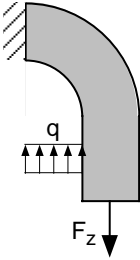
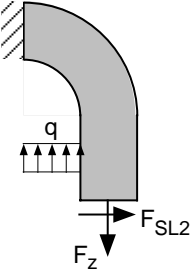
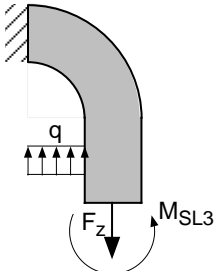
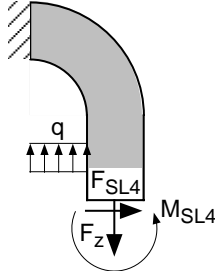
A 3.1 Punktlast nach Bild 4.1 und unterschiedliche Lagerung nach Bild 4.2

Skizze	Fesselungsbezeichnung und Schnittgrößen
	<p><i>Typ 1: Enden frei beweglich</i></p> $F_{PL1} = 0$ $M_{PL1} = 0$
	<p><i>Typ 2: Enden verdrehbar, nicht verschieblich</i></p> $F_{PL2} = 3F_z J \rho \frac{\rho\{2 \cos \alpha[\alpha(1 + \kappa) - 1] + 3 \cos^2 \alpha + 2 \sin \alpha - 1\} + 2l[\alpha(1 + \kappa) + \cos \alpha - 1]}{3J \left[\rho^2(\alpha + 3 \cos \alpha \sin \alpha) + 2\rho l[\alpha(1 + \kappa) \cos \alpha + 2 \sin \alpha] + 2l^2 \alpha(1 + \kappa) \right]} + 2A_L \kappa \rho l^3$ $M_{PL2} = 0$

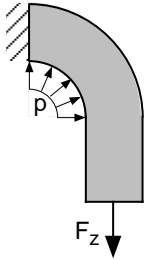
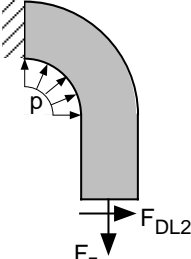
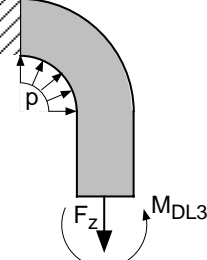
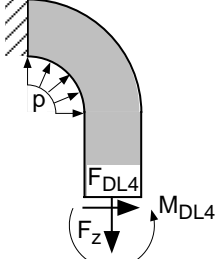
A3.1 Punktlast nach Bild 4.1 und unterschiedliche Lagerung nach Bild 4.2 (Fortsetzung)

Skizze	Fesselungsbezeichnung und Schnittgrößen
	<p><i>Typ 3: Enden verschieblich, nicht verdrehbar</i></p> $F_{PL3} = 0$ $M_{PL3} = F_z J \rho \frac{\alpha(1+\kappa) + \cos \alpha - 1}{J \alpha(1+\kappa) + A_L \kappa \rho l}$
	<p><i>Typ 4: Enden eingespannt</i></p> $F_{PL4} = 6F_n J r \frac{J\{\alpha(1+\kappa)(\cos^2 \alpha - 1) + 2\sin(1 - \cos \alpha)\} + A_L l \kappa \left\{ l[\alpha(1+\kappa) + \cos \alpha - 1] + \rho \left[\begin{array}{l} 2\cos \alpha [\alpha(1+\kappa) - 1] + \\ +3\cos^2 \alpha + 2\sin \alpha - 1 \end{array} \right] \right\}}{6J^2 \rho [\alpha(\alpha + \cos \alpha \sin \alpha)(1+\kappa) - 2\sin^2 \alpha] + 2A_L J \kappa l \left\{ \begin{array}{l} 2\alpha^2(1+\kappa) + 3l\rho[\alpha \cos \alpha(1+\kappa) + 2\sin \alpha] + \\ +3\rho^2(\alpha + 3\cos \alpha \sin \alpha) \end{array} \right\} + A_L^2 \kappa^2 l^4 \rho}$ $M_{PL3} = F_z J \rho \frac{6J \left\{ \begin{array}{l} l[\alpha(\cos^2 \alpha - 1)(1+\kappa) + 2\sin \alpha(1 - \cos \alpha)] + \\ + \rho \left[\begin{array}{l} \alpha[1 - (1+\kappa)(\alpha + \cos \alpha \sin \alpha) - \cos \alpha] - \\ -\sin \alpha(1 - \cos \alpha - 2\sin \alpha) \end{array} \right] \end{array} \right\} + A_L l^2 \left\{ \begin{array}{l} 2\kappa l[\alpha(1+\kappa) + \cos \alpha - 1] + \\ +3\kappa \rho \left[\begin{array}{l} 2\cos \alpha [\alpha(1+\kappa) - 1] + \\ +3\cos^2 \alpha + 2\sin \alpha - 1 \end{array} \right] \end{array} \right\}}{6J^2 \rho [\alpha(\alpha + \cos \alpha \sin \alpha)(1+\kappa) - 2\sin^2 \alpha] + 2J A_L \kappa l \left\{ \begin{array}{l} 2\alpha^2(1+\kappa) + 3l\rho[\alpha \cos \alpha(1+\kappa) + 2\sin \alpha] + \\ +3\rho^2(\alpha + 3\cos \alpha \sin \alpha) \end{array} \right\} + A_L^2 \kappa^2 l^4 \rho}$

A 3.2: Streckenlast nach Bild 4.1 und unterschiedliche Lagerung nach Bild 4.2

Skizze	Fesselungsbezeichnung und Schnittgrößen
	<p><i>Typ 1: Enden frei</i></p> $F_{SL1} = 0$ $M_{SL1} = 0$
	<p><i>Typ 2: Enden verdrehbar, nicht verschieblich</i></p> $6\rho l[\alpha(1+2\kappa) + \cos\alpha \sin\alpha] -$ $-3r_i(\alpha + \cos\alpha \sin\alpha)(1+\kappa) +$ $+2\rho^2[3\alpha \cos\alpha(1+2\kappa) + \sin\alpha(4+5\cos^2\alpha)] -$ $F_{SL2} = F_n I_y \frac{-\rho r_i \{3\alpha \cos\alpha(1+\kappa) + \sin\alpha[4 + \cos^2\alpha(5+3\kappa)]\}}{6I_y \left\{ 2\alpha^2(1+\kappa) + 2\rho l[\cos\alpha(1+\kappa) + 2\sin\alpha] + \right.}$ $\left. + \rho^2(\alpha + 3\cos\alpha \sin\alpha) \right\} +$ $+4A_L \kappa l^3 \rho$ $M_{SL2} = 0$
	<p><i>Typ 3: Enden verschieblich, nicht verdrehbar</i></p> $F_{SL3} = 0$ $M_{SL3} = F_n I_y \frac{2\rho[\alpha(1+2\kappa) + \cos\alpha \sin\alpha] - r_i(\alpha + \cos\alpha \sin\alpha)(1+\kappa)}{4[I_y \alpha(1+\kappa) + A_L \kappa l \rho]}$
	<p><i>Typ 34: Enden eingespannt</i></p> <p>keine geschlossene Lösung</p>

A 3.3: Drucklast nach Bild 4.1 und unterschiedliche Lagerung nach Bild 4.2

Skizze	Fesselungsbezeichnung und Schnittgrößen
	<p><i>Typ 1: Enden frei</i></p> $F_{DL1} = 0$ $M_{DL1} = 0$
	<p><i>Typ 2: Enden verdrehbar, nicht verschieblich</i></p> $F_{DL2} = \frac{3F_z J \rho}{\sin \alpha} \frac{4l[\sin \alpha \alpha(1+\kappa) + \cos \alpha \sin \alpha - \alpha] + \rho \left[4\cos \alpha \sin \alpha \alpha(1+\kappa) - 2\alpha \cos \alpha + \sin \alpha (\cos 2\alpha + 4 - 3) \right]}{J \left[12l^2 \alpha(1+\kappa) + 12\rho l[\alpha(1+\kappa) \cos \alpha + 2\sin \alpha] + \rho^2(6\alpha + 12\cos \alpha \sin \alpha + 3\sin 2\alpha) \right] + 4A_L \kappa \rho l^3}$ $M_{DL2} = 0$
	<p><i>Typ 3: Enden verschieblich, nicht verdrehbar</i></p> $F_{DL3} = 0$ $M_{DL3} = \frac{F_z J \rho \sin \alpha [\alpha(1+\kappa) + \cos \alpha] - \alpha}{\sin \alpha J \alpha(1+\kappa) + A \kappa \rho s}$
	<p><i>Typ 34: Enden eingespannt</i></p> <p>keine geschlossene Lösung</p>

Ausnutzung von Symmetrieebenen zur Berechnung drehmomentbeanspruchter Bauteile

Wesolowski, K.

Die Berechnung tordierter Bauteile erfordert handhabbare Ersatzmodelle, die das tatsächliche Spannungs- und Verformungsverhalten des realen Bauteils ausreichend genau beschreiben. Mit der Finite Elemente Methode steht dem Konstrukteur ein brauchbares Werkzeug zur Lösung solcher Probleme zur Verfügung. Die Abbildung des kompletten dreidimensionalen Bauteils sprengt jedoch oft die vorhandene Speicherkapazität. In diesem Artikel wird aus dem grundsätzlichen Spannungs- und Verformungsverhalten prismatischer Stäbe abgeleitet, wie vorhandene Symmetrien des tordierten Bauteils genutzt werden können, um mit der Abbildung sektorförmiger Teilmodelle die benötigte Speicherkapazität und Rechenzeit zu reduzieren.

For the design of machine components under torsional strain it's necessary to find usefull models for calculation, which correctly represent the behaviour of stress and deformation. The Finite Element Method is a efficient tool for the solution of such problems. A complete three dimensional model of the real machine component often needs to much storing capacity. In this article the general behaviour of stress and deformation of prismatic rods is used to define planes of symmetry to reduce the complete machine component to a sector model. By using sector models the required storing capacity and the computing time can be reduced.

1. Theorie der Torsion prismatischer Stäbe

In diesem Abschnitt wird das grundsätzliche Verformungs- und Spannungsverhalten prismatischer Stäbe beschrieben, die durch ein Drehmoment um die Stabachse (Torsion) belastet werden.

1.1 Stäbe mit Kreis- und Kreisringquerschnitt

Bei der Torsion von Stäben mit Kreis- und Kreisringquerschnitten tritt grundsätzlich keine Querschnittsverwölbung auf, die Querschnitte bleiben eben. Im

unbelasteten Zustand radial verlaufende Linien bleiben bei Belastung geradlinig, d.h., die Querschnittsfläche verdreht sich als starres Ganzes. Axial verlaufende, geradlinige Mantellinien auf der Oberfläche werden zu Schraubenlinien, **Bild 1.1**.

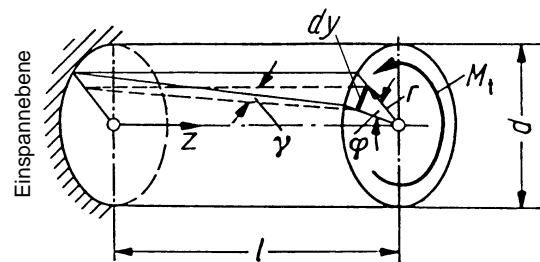


Bild 1.1 Verformungen eines tordierten Stabes mit Kreisquerschnitt /1/

Die Verdrehung dy ist proportional zum Radius:

$$dy = r \cdot \sin \varphi \tag{1.1}$$

Die Schubspannungen τ nehmen ebenfalls linear mit dem Radius r zu, **Bild 1.2**

$$\tau(r) = \frac{2r}{d_a} \cdot \tau_{\max} \tag{1.2}$$

Die maximale Schubspannung kann aus dem Drehmoment T und dem polaren Widerstandsmoment W_t berechnet werden.

$$\tau_{\max} = \frac{T}{W_t} \tag{1.3}$$

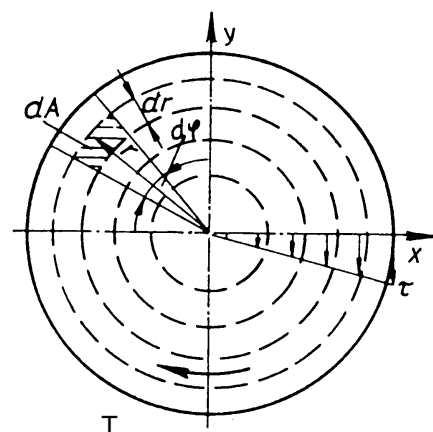


Bild 1.2 Schubspannungsverteilung im Querschnitt eines tordierten Zylinders /2/

Für die Hauptspannungen gilt an jeder Stelle des Stabs:

$$\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau(r) \quad \text{und} \quad \sigma_2 = 0 \quad (1.4)$$

Die Darstellung der Spannungen im Spannungstensor bei Festlegung der Koordinatenachsen wie in Bild 1.2 dargestellt (X- und Y-Achse in der Ebene der Querschnittsfläche, Z-Achse = Zylinderachse), hat folgende Form:

$$S_T = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \tau_{xz} \\ 0 & 0 & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & 0 \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

Die Darstellung des ebenen Torsionsspannungszustands im MOHRschen Kreis zeigt **Bild 1.3**.

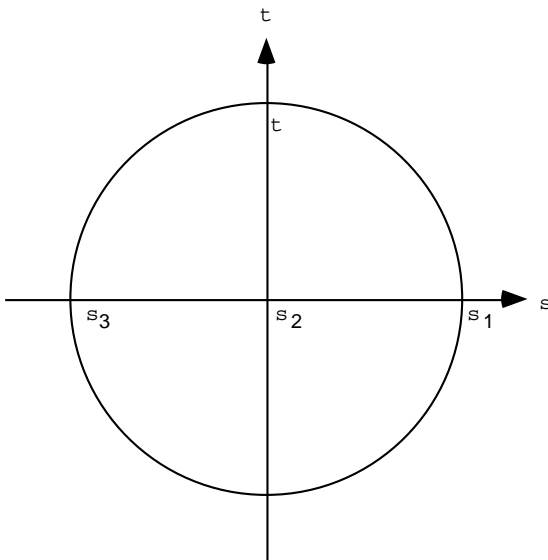


Bild 1.3 MOHRscher Spannungskreis für reine Torsion

1.2 Stäbe mit beliebigem Querschnitt

Bei Stäben mit beliebigem Querschnitt treten bei Verdrehung im allgemeinen Querschnittsverwölbungen auf. Im Fall unbehinderter Verwölbung gilt die Theorie von SAINT-VENANT /3/. Die Lösung des Problems kann auf eine Verwölbungs- oder Spannungsfunktion zurückgeführt werden, bei der für die Potential- bzw. Poissonsche Gleichung bestimmte Randbedingungen erfüllt werden müssen. Analytisch geschlossene Lösungen liegen nur für wenige Querschnitte (z.B. Ellipse, Dreieck, Rechteck) vor /1/. Prinzipiell gelten auch hier die Beziehungen (1.1) und (1.3). Polare Torsionsflächenmomente I_t und -widerstandsmomente W_t ausgewählter Querschnitte finden sich u.a. in /1/.

Der Spannungstensor hat bei ungehinderter Querschnittsverwölbung die gleichen Komponenten wie der Tensor von Stäben mit Kreis- bzw. Kreisringquerschnitt, Gleichung (1.5).

Wird die Ausbildung der Verwölbung z.B. durch eine feste Einspannung verhindert, so treten Normalspannungen in Stabachsrichtung auf. Damit verbunden sind zusätzliche Schubspannungen. Der Verdrehwinkel φ wird kleiner als bei wölbunbehinderter Torsion. Für Vollquerschnitte liegen nur in einzelnen Fällen Näherungslösungen vor /1/. Der allgemeine Spannungstensor für Stäbe, bei denen die Verwölbung behindert wird, hat folgende Komponenten:

$$S_{T,Wölb} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \tau_{xz} \\ 0 & 0 & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

2. Rechenmodell für Bauteile unter Torsionsbeanspruchung

2.1 Definition eines Sektormodells

Die Beanspruchung durch Torsion erzeugt einen ebenen Hauptspannungszustand, wenn eine eventuell vorhandene Querschnittsverwölbung nicht unterdrückt wird. Die Hauptspannungen liegen jedoch nicht in einer der Hauptrichtungen (radial, axial, tangential) des tordierten Bauteils, sondern liegen um 45° gegenüber der Längsachse verdreht. Daher kann die Torsion trotz des ebenen Spannungszustands nicht durch ein zweidimensionales ebenes Modell abgebildet werden, sondern nur durch ein räumliches Modell.

Die Abbildung eines kompletten dreidimensionalen Bauteils ist jedoch sehr speicherintensiv. Durch die Abbildung eines Teilmodells kann der Speicherbedarf erheblich reduziert werden – vorausgesetzt, das Teilmodell beschreibt das Spannungs- und Verformungsverhalten des gesamten Bauteils ausreichend genau.

Viele in der Praxis eingesetzte Bauteile besitzen gleiche Formelemente der Anzahl n , die sich bei Rotation um die Bauteilachse um den Winkel $\alpha_n = 360^\circ/n$ wiederholen.

Beispiele: Flanschverbindung mit gleichmäßigem Lochkreis (n = Anzahl der Löcher), Profile von Trägern (Doppel-T Träger hat zweimal das Form-

element "T", $n = 2$), Profilwellen, Zahn- und Keilwellen ($n = \text{Anzahl der Zähne}$) usw. Treten sich wiederholende Formelemente auf, so kann das Spannungs- und Verformungsverhalten des tordierten Bauteils durch ein Teilmodell in Sektorform beschrieben werden¹. Die seitliche Begrenzung der Sektormodelle erfolgt durch Symmetrieebenen, die vor der Festlegung der Randbedingungen definiert werden müssen.

Lassen sich an einem Bauteil keine solchen Formelemente finden, so muß zur Berechnung das komplette Bauteil abgebildet werden.

Definition von Symmetrieebenen in Bauteilen mit sich wiederholenden Formelementen

Wiederholt sich das Spannungs- und Verformungsverhalten eines Sektors mit dem Öffnungswinkel α_{sek} , der durch die Schnittebenen S_A und S_B begrenzt wird, nach beliebig oft durchgeführter Rotation um den Winkel α_{sek} und weisen die Schnittebenen keine Verwölbung in axialer Richtung auf, so sind die Schnittebenen S_A und S_B Symmetrieebenen. Gibt es in der Winkelhalbierenden des Sektors zwischen S_A und S_B eine Schnittebene S_M ohne axiale Verschiebung, an der sich die Spannungen zwischen S_A und S_M spiegeln, so wird durch S_M eine weitere Symmetrieebene gekennzeichnet.

Aus dieser Definition und den Beziehungen unter Abschnitt 1 läßt sich das Spannungs- und Verformungsverhalten eines Sektormodells bzw. eines Bauteils mit Symmetrieebenen beschreiben.

Verformungs- und Spannungsverhalten tordierter Bauteile mit Symmetrieebenen

- In axialer Richtung treten keine Normalspannungen auf.
- Der Verdrehwinkel φ nimmt in axialer Richtung linear zu.
- Punkte auf den Symmetrieebenen verschieben sich nicht in axialer Richtung.
- Der Verdrehwinkel φ an den Symmetrieebenen ist unabhängig vom Radius.
- Die Schubspannungen sind unabhängig von der Längenkoordinate.

¹ bei Vernachlässigung fertigungsbedingter Formabweichungen

Beispiel 1: Symmetrieebenen eines Stabes mit Kreis- bzw. Kreisringquerschnitt

Bei Stäben mit Kreis- oder Kreisringquerschnitt unter Torsion sind auf den ersten Blick keine signifikanten Formelemente oder Symmetrieebenen zu finden. Bei genauer Betrachtung der Definition stellt man jedoch fest, daß Stäbe mit Kreis- oder Kreisringquerschnitt unendlich viele Symmetrieebenen bzw. Formelemente besitzen. Formelement eines solchen Stabes ist ein Kreis- bzw. Kreisringsektor beliebigen Öffnungswinkels.

Beispiel 2: Symmetrieebenen einer Zahnwelle

Eine Zahnwelle ist ein Bauteil mit ausgeprägten Formelementen, deren Anzahl mit der Zähnezahl übereinstimmt. Die Symmetrieebenen einer Zahnwelle werden in **Bild 2.1** dargestellt.

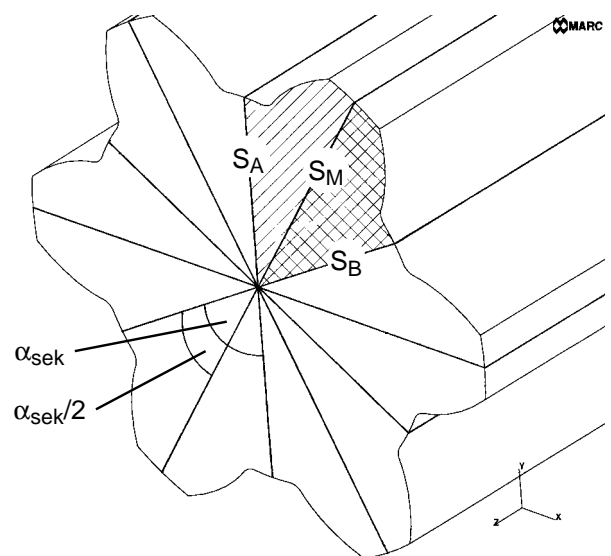


Bild 2.1 Darstellung der Symmetrieebenen bezüglich Torsion um die z-Achse an einer Zahnwelle /4/

Aus Gründen des stetigen Übergangs von einem Zahnsektor auf den nächsten muß die Verformung und die Krümmung der Oberfläche auf den Schnittebenen S_A und S_B übereinstimmen, da die Ebene S_B gleichzeitig rechter Rand des gekennzeichneten Sektors und linker Rand und damit Ebene " S_A " des darauffolgenden Zahnsektors ist. Da das Formelement "Zahnsektor" spiegelsymmetrisch bezüglich der Ebene S_M ist, muß bei Torsion auch die axiale Verschiebung und die Verdrehung φ innerhalb der Schnittebene S_M mit der der Ebenen S_A und S_B übereinstimmen.

Aus dem Spannungs- und Verformungsverhalten bezüglich der Symmetrieebene S_M kann auf die Anzahl der Symmetrieebenen eines Bauteils mit n Formelementen geschlossen werden:

Ist ein Formelement spiegelsymmetrisch zu einer Ebene, die die Bauteilachse enthält, besitzt das Bauteil unter reiner Torsionsbeanspruchung $2 \cdot n$ Symmetrieebenen.

2.2 Randbedingungen bei der Berechnung tordierter Sektormodelle

Für das Sektormodell eines Bauteils mit sich wiederholenden Formelementen können folgende Randbedingungen bezüglich der Modelleinspannung abgeleitet werden:

Randbedingungen zur Berechnung tordierter Bauteile mit Symmetrieebenen

- Punkte auf den Symmetrieebenen müssen in axialer und radialer Richtung zur Simulation der Verdrehung festgelegt werden.
- Punkte auf der Einspannebene (Bild 1.1) müssen in tangentialer Richtung eingespannt werden.
- Die Punkte auf der Mittelachse, soweit vorhanden, können in allen Koordinatenrichtungen festgelegt werden, da die Position der Mittelachse erhalten bleiben muß.

Beispiel 1: Berechnungsmodell eines Stabes mit Kreis- bzw. Kreisringquerschnitt

Mit diesen Bedingungen wurden Sektormodelle eines Stabes mit Kreis- bzw. Kreisringquerschnitt abgebildet und mit der Methode der Finiten Elemente berechnet /5, 6/. Der Sektoröffnungswinkel wurde willkürlich mit $\alpha_{\text{sek}} = 45^\circ$ gewählt.

Randbedingungen des Modells:

tangente Fesselung:	Punkte auf Einspannebene
radiale Fesselung:	Punkte auf Sektorrändern
axiale Fesselung:	Punkte auf Sektorrändern
Momenteinleitung:	tangente Last auf Punkte des freien Endes

Streng genommen genügen die gewählten Fesselungen nicht der Anforderung (a), da auch im Sektormodell unendlich viele Symmetrieebenen existieren. Exakt wäre eine axiale Fesselung aller Punkte des Modells, da bei Stäben mit kreisförmigem Querschnitt keine Verwölbung auftritt. Der Vergleich der FEM-Ergebnisse mit den Ergebnissen der Analytik zeigt dennoch eine hervorragende Übereinstimmung. Bei genügendem Abstand von der Lasteinleitung sind Abweichungen bei den Spannungen und beim Verdrehwinkel φ praktisch nicht feststellbar ($<1\%$), obwohl der 45° -Kreisbogen nur durch vier Geradenstücke angenähert wurde. Der Spannungszustand entspricht dem der Torsion, **Bild 2.2**. Obwohl die Punkte zwischen den Sektorrändern im axialen Freiheitsgrad nicht unterdrückt wurden, tritt eine Querschnittsverwölbung praktisch nicht auf.

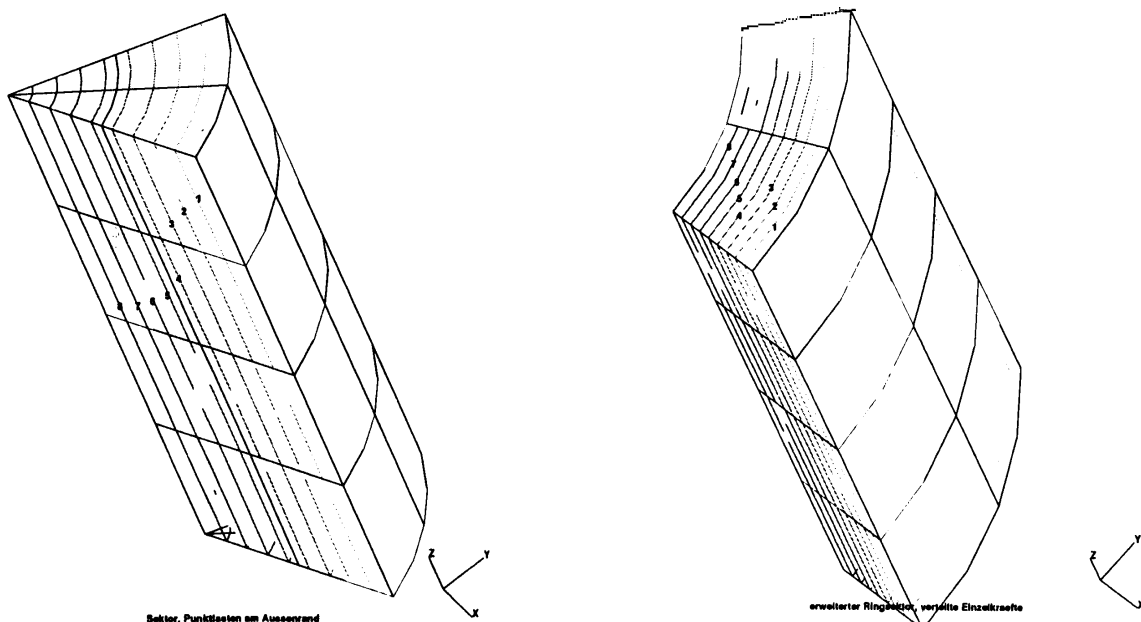


Bild 2.2 Verlauf der ersten Hauptspannung in Sektormodellen einer zylindrischen Voll- und Hohlwelle unter Torsion /4/

Beispiel 2: Berechnungsmodell einer Zahnwelle unter Torsionsbeanspruchung

Unter Verwendung obiger Randbedingungen wurde eine Zahnwelle mit 6 Zähnen unter Torsionsbeanspruchung als Sektormodell mit dem kleinsten möglichen Öffnungswinkel $= 360^\circ/(2 \cdot n) = 30^\circ$, siehe Bild 2.1, abgebildet und mit der FEM berechnet. Da keine analytische Lösung existiert, wurde zur Überprüfung der Randbedingungen eine komplette Zahnwelle mit 6 Zähnen abgebildet, die lediglich an einem Punkt auf der Mittelachse in axialer Richtung festgelegt wurde.

Randbedingungen des Sektormodells:

tangentiale Fesselung: Punkte auf Einspannebene
 radiale Fesselung: Punkte auf Sektorrändern
 axiale Fesselung: Punkte auf Sektorrändern
 Momenteinleitung: tangentielle Last auf Punkte des freien Endes

Randbedingungen des kompletten Modells:

tangentiale Fesselung: Punkte auf Einspannebene
 radiale Fesselung: keine
 axiale Fesselung: Punkt der Einspannebene auf der Mittelachse
 Momenteinleitung: tangentielle Last auf Punkte des freien Endes

Bild 2.3 zeigt eine dünne Scheibe des Sektor- und des kompletten Modells. Durch einen großen Überhöhungsfaktor in der Verformung wurde die axiale Querschnittsverwölbung zwischen den Symmetrieebenen sichtbar gemacht. Deutlich sind beim Vollmodell die Nulldurchgänge der Verwölbung an den definierten Symmetrieebenen erkennbar, obwohl das Modell nur an einem Punkt auf der Achse festgelegt wurde. Die Abweichungen der Spannungen und Verformungen beider Modelle liegen unter 1%.

Die Rechenzeit und der Speicherbedarf des Sektormodells liegt erheblich unter der des Vollmodells.

Beispiel 3: Berechnungsmodell einer reibschlüssigen Flanschverbindung unter Torsion

Berechnet werden soll ein Flansch (**Bild 2.4**), der das über das freie Ende (Hohlwellenseite) eingeleitete Drehmoment reibschlüssig weiterleitet. Der Flansch wird über acht Schrauben mit dem Gegenstück befestigt. Unter reiner Torsionsbeanspruchung weist ein Flansch $2 \cdot n$ Symmetrieebenen auf, wobei n der Anzahl der Löcher entspricht.

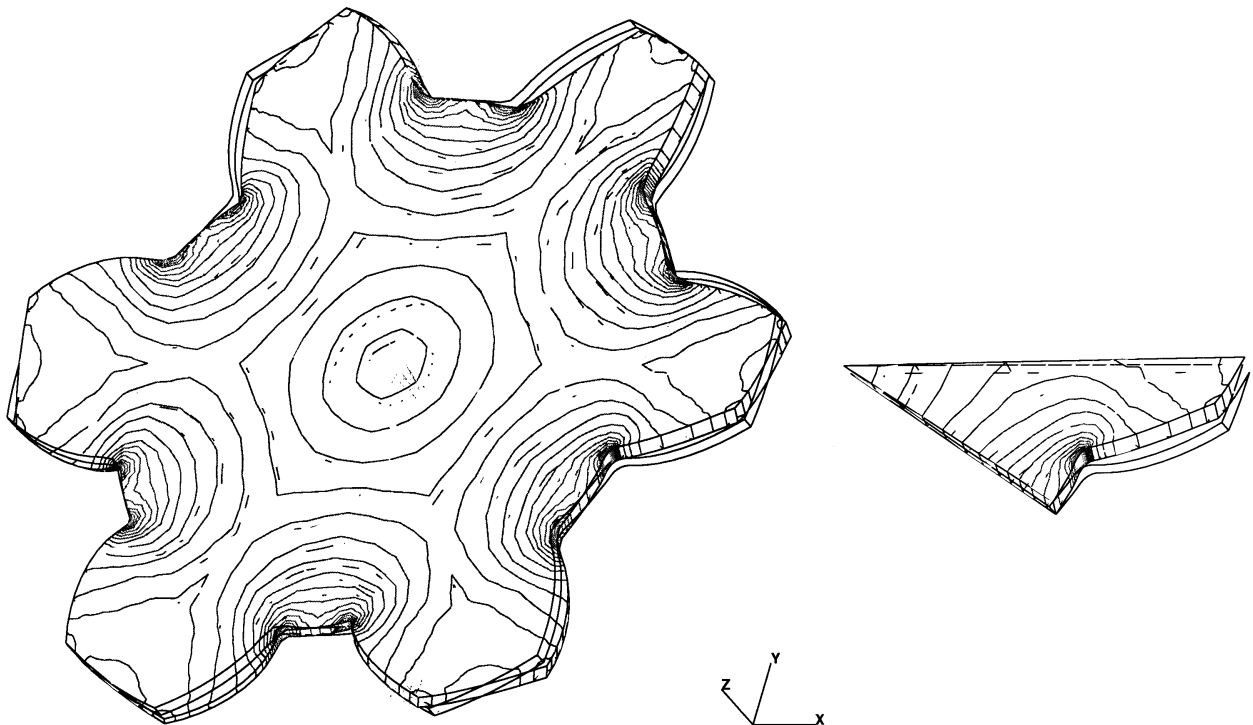


Bild 2.3 Verlauf der ersten Hauptspannung und Darstellung der Verformungen im Vollmodell und im Sektormodell einer Zahnwelle unter Torsion /4/

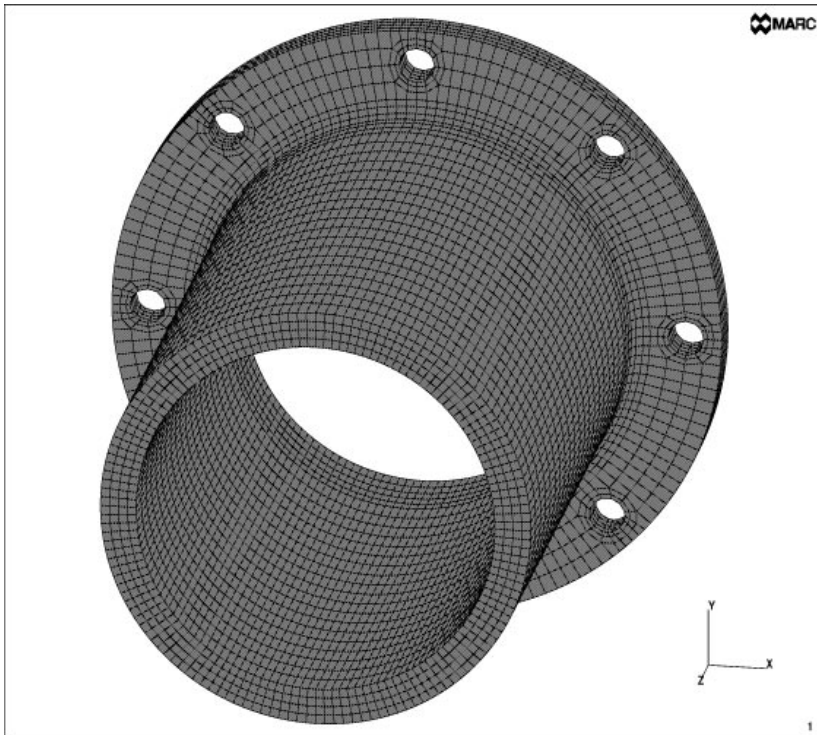


Bild 2.4 Kompletmodell des Flansches mit 8 Löchern

Bild 2.5 zeigt das Ergebnis der FEM-Rechnung am kleinsten möglichen Modell zur Simulation der Torsionsbeanspruchung. Die Einspannungsbedingungen entsprechen exakt denen des Zahnwellensektors.

Da der Flansch im Bereich des Lochkreises von der Kreis- bzw. Kreisringform abweicht, stellt sich unter Torsion eine Querschnittsverwölbung der Einspan-

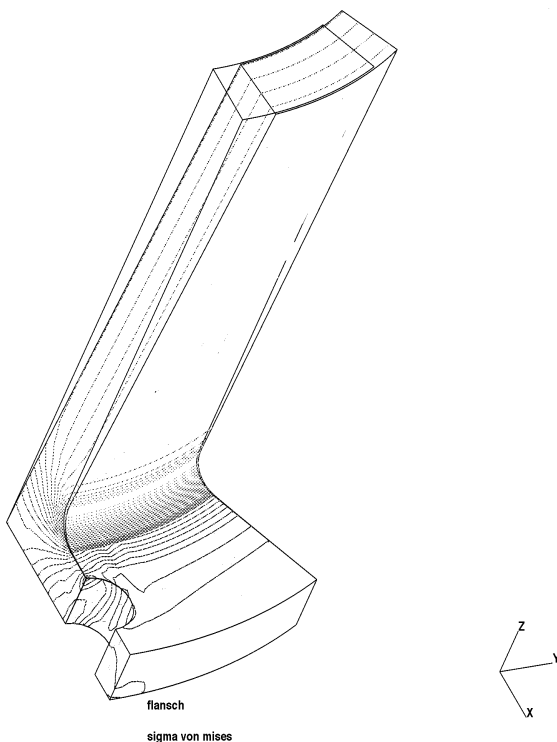


Bild 2.5 Verlauf der Vergleichsspannung nach v. Mises und Darstellung der Verformungen im Sektormodell unter Torsion (1/16 des Flansches).

fläche ein, ähnlich der Verwölbung einer Zahnwelle.

Wenn der Flansch fest (reibschlüssig) mit dem Gegenstück verschraubt wird, wird die Verwölbung in axialer Richtung durch das Anziehen der Schraube und das Anliegen am Gegenstück der Flanschverbindung, je nachdem auf welcher Seite des Loches, unterschiedlich stark behindert. Der Spannungszustand ist daher nicht mehr symmetrisch zur Schnittebene durch die Lochmitte und entspricht nicht mehr dem der Torsion! Dadurch wird die Anzahl der Symmetrieebenen des Flansches auf die Anzahl der Löcher reduziert.

Bild 2.6 zeigt die Ergebnisse einer Rechnung, bei der die angezogene Schraube durch eine axiale Druckbe-

anspruchung um das Schraubenloch simuliert wurde. Die Unterdrückung der Querschnittsverwölbung der Flanschverbindungsfläche wurde durch eine axiale Einspannung aller Punkte dieser Fläche erreicht. Das unsymmetrische Spannungsverhalten bezüglich der Schnittebene durch die Lochmitte ist vor allem in der Umgebung des Schraubenloches zu erkennen.

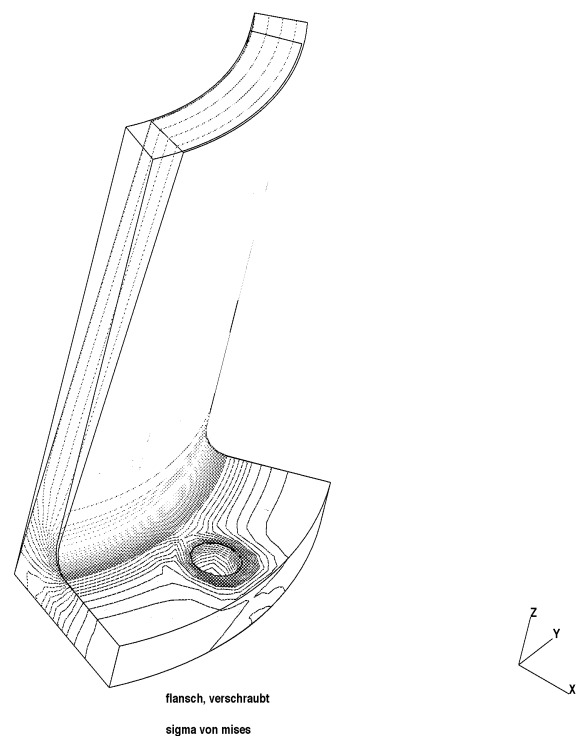


Bild 2.6 Vergleichsspannung und Verformung im Sektormodell bei Verschraubung und Drehmoment (1/8 des Flansches).

3. Rechenmodell für Bauteile, bei denen die Torsion bereichsweise gestört ist

Im Beispiel 3 des vorherigen Abschnitts wurde die Torsion an der Einspannstelle durch die Unterdrückung der Querschnittsverwölbung gestört. Dennoch ließ sich bei der Beachtung der Definition der Symmetrieebenen (Abschnitt 2.1) ein Sektormodell finden, daß den Spannungs- und Verformungszustand des kompletten Bauteils ausreichend genau beschreibt.

In den seltensten Fällen tritt in der Praxis das Problem der reinen Torsion auf. In der Regel weicht das Spannungs- und Verformungsverhalten zumindest in den Bereichen von der Torsion ab, in denen das Drehmoment eingeleitet bzw. abgegriffen wird. Bei Bauteilen mit Formelementen kann jedoch meistens ein Sektormodell gefunden werden, solange keine Momente senkrecht zur Drehmomentenachse wirken. Eine sehr wichtige Randbedingung, die bisher nicht explizit erwähnt wurde, ist die folgende (vergleiche dazu die Definition der Symmetrieebenen):

Randbedingung für die Symmetrieebenen S_A und S_B

- d. Die Verschiebungen von Punkten auf den Symmetrieebenen S_A und S_B gleicher Radius- und Höhenkoordinate müssen in den Freiheitsgraden radial, tangential und axial übereinstimmen.

Durch die Randbedingung 2.2 (a) wurde die Bedingung (d) bei reiner Torsion erfüllt, auch wenn die Verschiebung der Sektorränder in tangentialer Richtung nicht gekoppelt wurde (reine Torsion: Spannungen spiegelsymmetrisch zu S_M , gilt wegen Hook auch für die Dehnungen). Erfüllt die Ebene S_M nicht mehr die Bedingungen einer Symmetrieebene, kann es bei ausschließlicher Festlegung in radialer und axialer Richtung zu unterschiedlichen Verschiebungen in tangentialer Richtung entsprechender Punkte der Ebenen S_A und S_B kommen.

Die Randbedingung (d) ist umfassender als (a). Sie läßt im Gegensatz zu (a) radiale und axiale Verschiebungen zu. Damit werden neben der reinen Torsion Beanspruchungen in radialer und axialer Richtung ermöglicht. Selbstverständlich können alle unter Abschnitt 2 aufgeführten Modelle auch mit Randbedingung (d) statt (a) berechnet werden. Der Vorteil durch die Nutzung der Symmetrieebene S_M bei Modellen

unter reiner Torsionsbeanspruchung geht jedoch verloren (Sektor doppelt so groß wie erforderlich). Desweiteren ist bei den meisten FEM-Systemen eine feste Einspannung von Freiheitsgraden leichter als die Koppelung der Freiheitsgrade zweier Punkte.

An einem Beispiel mit von der reinen Torsion abweichender Beanspruchung werden die Vorzüge der Randbedingung (d) dargestellt.

Beispiel 4 Berechnungsmodell einer Zahnwellenverbindung unter Drehmomentbelastung

Die Einleitung eines Drehmoments in eine Zahnwelle erfolgt über den Zahnflankenkontakt zur Nabe. **Bild 3.1** zeigt vereinfachend die Flankennormalkraft F_N auf den Wellenzahn, die aus dem Flankenkontakt entsteht.

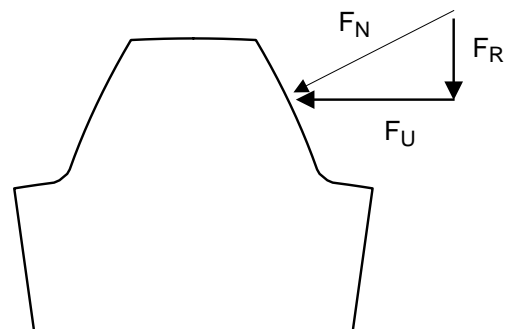


Bild 3.1 Flankennormalkraft und Kraftkomponenten auf der Zahnflanke $/4/$

Die Flankennormalkraft kann in eine Umfangskraft F_U und eine Radialkraft F_R zerlegt werden. Dadurch entsteht im Zahn eine Beanspruchung durch Zahnbiegung, Druck und Schub, die den Zahn verdreht und radial einfedern läßt. Eine feste Einspannung der Sektorränder in radialer Richtung würde das Ergebnis verfälschen. Durch die einseitige Flankenlast ist der Spannungs- und Verformungszustand nicht mehr symmetrisch zur Zahnmitte, d.h., die Anzahl der Symmetrieebenen reduziert gegenüber einer Zahnwelle unter reiner Torsion (Beispiel 2) auf die Anzahl der Zähne. Der kleinste mögliche Sektoröffnungswinkel beträgt $360^\circ/n$ mit den Sektorrandebenen S_A und S_B . Gleiches gilt auch für die verzahnte Nabe.

Zur Überprüfung der Randbedingungen wird ein Sektormodell von Welle und Nabe einer Zahnwellenverbindung mit 6 Zähnen (Öffnungswinkel 60°) und ein Kompletmodell abgebildet und mit der FEM im

Kontaktverfahren berechnet. Ein Vergleich der Ergebnisse beider Modelle (**Bild 3.2**) zeigt eine gute Übereinstimmung und bestätigt die Gültigkeit der Randbedingungen für Bauteile, bei denen die Torsion bereichsweise gestört ist.

Randbedingungen des Sektormodells WELLE

- tangentiale Fesselung: Punkte auf Einspannebene
- Koppelung der Freiheitsgrade in axialer, radialer und tangentialer Richtung von Punkten gleicher (rad, ax)-Koordinate auf den Sektorrändern
- Momenteinleitung durch Flankenkontakt

Randbedingungen des Sektormodells NABE

- Koppelung der Freiheitsgrade in axialer, radialer und tangentialer Richtung von Punkten gleicher (rad, ax)-Koordinate auf den Sektorrändern
- Momenteinleitung durch Tangentialkräfte am Nabenaußendurchmesser

Randbedingungen des Kompletmodells WELLE

- tangentiale Fesselung: Punkte auf Einspannebene
- axiale Festlegung am Punkt der Einspannebene auf der Wellenachse
- Momenteinleitung durch Flankenkontakt

Randbedingungen des Kompletmodells NABE

- Momenteinleitung durch Tangentialkräfte am Nabenaußendurchmesser

4. Zusammenfassung

Durch die Anwendung definierter Symmetrieebenen und Randbedingungen können Bauteile mit Formelementen unter Torsionbeanspruchung anhand von Sektormodellen berechnet werden. Eine Erweiterung der Randbedingungen erlaubt neben der Torsion eine in jedem Formelement wirkende Beanspruchung in radialer, tangentialer und/oder axialer Richtung. Durch die Verwendung von Sektormodellen kann der benötigte Speicherplatz und die Rechenzeit erheblich reduziert werden.

Literatur

- /1/ Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 16. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1987
- /2/ Göldner, H.; Holzweißig, F.: Leitfaden der technischen Mechanik, 7. Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig 1980
- /3/ Szabó, I.: Höhere Technische Mechanik, 5. Aufl., Springer-Verlag Berlin, 1977
- /4/ Wesolowski, K.: Abschlußbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Zahnwellenfestigkeit, Di 289 / 9-1, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, Juli 1994
- /5/ MENTAT II, MARC Analysis Research Corporation, Palo Alto, USA 1993
- /6/ MARC K5.2, MARC Analysis Research Corporation, Palo Alto, USA 1993

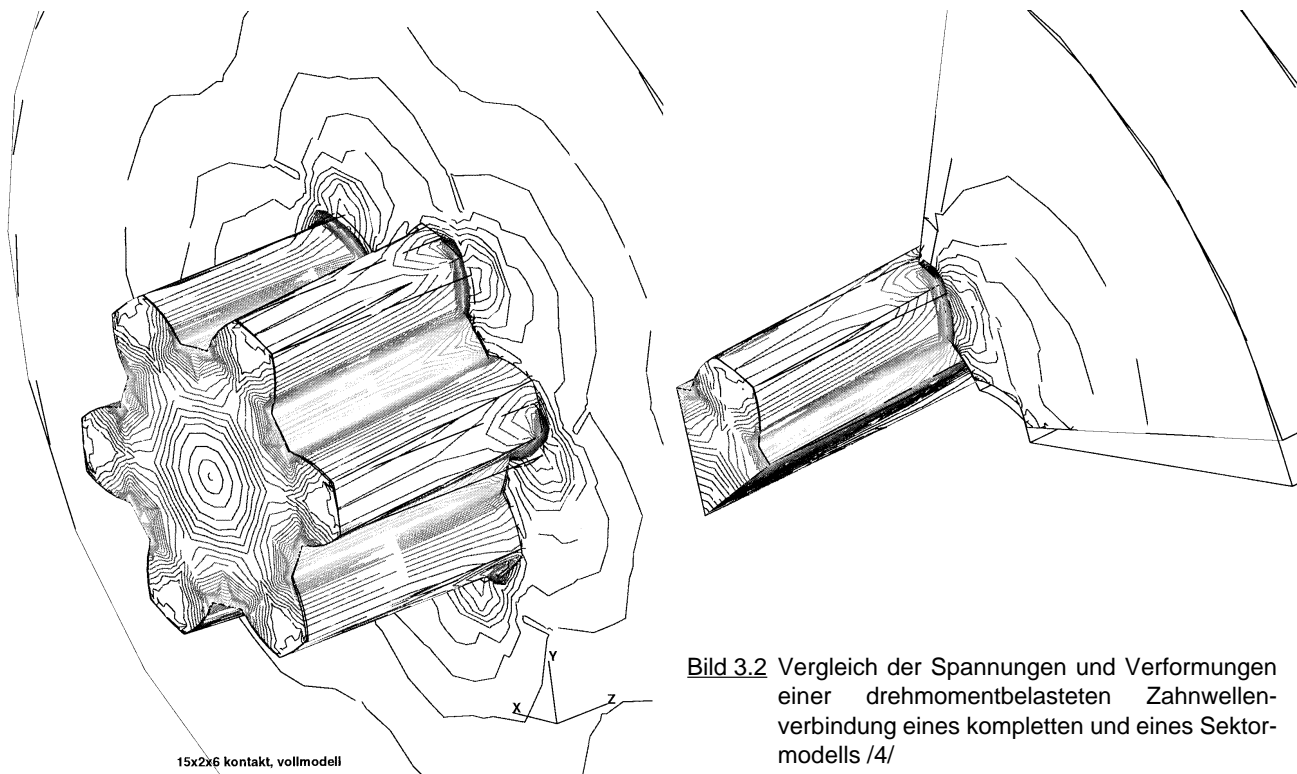


Bild 3.2 Vergleich der Spannungen und Verformungen einer drehmomentbelasteten Zahnwellenverbindung eines kompletten und eines Sektormodells /4/

Berechnung von Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz unter Verwendung des Finite-Elemente-Programmsystems MARC/MENTAT

Burgtorf, U.

Das Beanspruchungsverhalten von Zahnwellenverbindungen mit Preßsitz wird am IMW mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente mit dem Programmsystem MARC/MENTAT untersucht. Dieses FE-Programm bietet eine spezielle Kontakt-Option, mit der die Kontaktvorgänge zwischen den Zahnpaaren ohne GAP-Elemente nachgebildet werden können. Um die Simulation von Zahnwellenverbindungen mit Preßsitz zu ermöglichen, sind sowohl zwei- als auch dreidimensionale FE-Modelle und Berechnungsmethoden entwickelt worden, mit denen sich die Beanspruchungsverläufe über der Flanke und der Verbindungslänge sowie auch der Einfluß von Teilungsabweichungen auf die Lastverteilung über den Verbindungsumfang untersuchen lassen. Die entwickelten Berechnungsmethoden und Modelle werden hier vorgestellt.

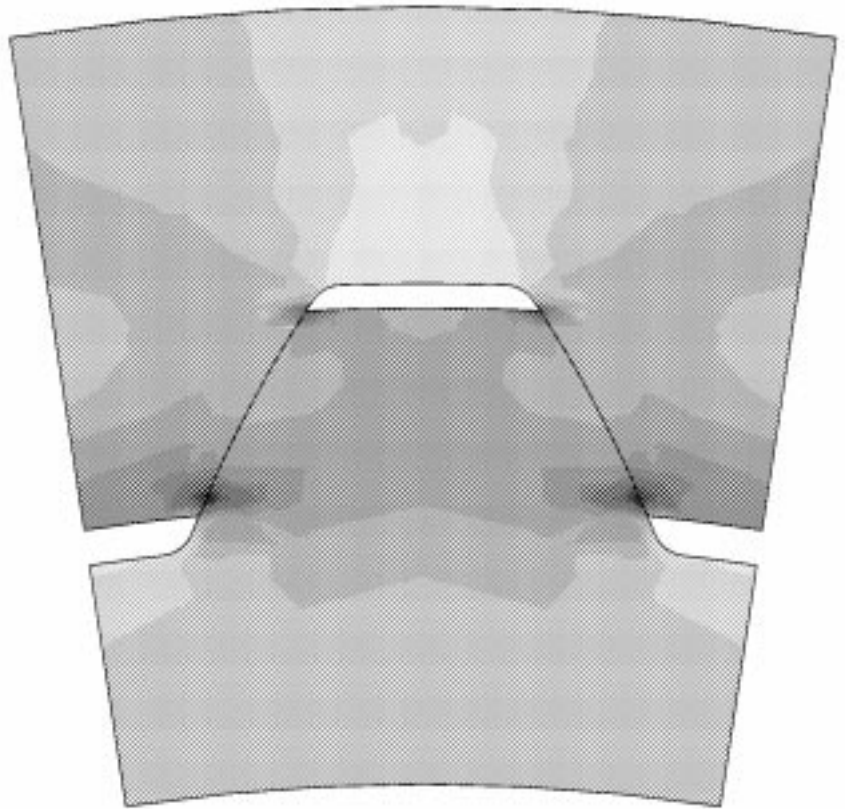


Bild 1.1 Beanspruchungsverläufe in einer Zahnwellenverbindung mit Preßsitz (FEM-Darstellung)

The strain behaviour of involute splines with press fit is investigated at the IMW by using the finite element method and the program system MARC/MENTAT. This program offers a special contact option to simulate the contact between the teeth of hub and shaft without using gap elements. For the simulation of involute splines with press fit two- and three-dimensional finite element models and computation methods are developed. With these methods and models it is possible to investigate the contact stresses on the toothflanks and in axial direction as well as the influence of pitch error on the load distribution along the circumference. The developed finite element methods and computation models are shown in this article.

1 Einleitung

Neben der ursprünglich als formschlüssige Welle-

Nabe-Verbindung entworfenen Zahnwellenverbindung mit Schiebesitz ist als zweite Entwicklung die Zahnwellenverbindung mit Preßsitz entstanden. Durch den Preßsitz werden axiale Relativbewegungen, die als Hauptursache für Verschleißerscheinungen anzusehen sind, verringert und der Verschleiß minimiert. Über die Beanspruchungen in derartigen Zahnwellenverbindung liegen keine Erkenntnisse vor, mit Hilfe von FE-Rechnungen wird der Einfluß verschiedener Geometriefaktoren auf das Beanspruchungsverhalten ermittelt (**Bild 1.1**).

Dazu sind für das Programmsystem MARC/MENTAT Berechnungsmethoden entwickelt worden, die es ermöglichen, an einem ebenen, keilförmigen Modell den Übermaßeinfluß auf die Flankenpressung, an dreidimensionalen Keilmodellen den Übermaßeinfluß auf die Flankenpressung über der Verbindungslänge und an ebenen Nachbildungen einer vollständigen Zahnwellenverbindungen den Einfluß der

Teilungsabweichungen auf die Lastverteilung zu bestimmen.

2 FE-Modelle

Der Anforderung an die zu untersuchenden Beeinflussungsparameter entsprechend, sind verschiedene FE-Modelle entstanden. Die Nachbildungen beschränken sich auf die Wiedergabe eines Ausschnitts (keilförmige Modelle eines Zahnpaars; eben **Bild 2.1** oder räumlich **Bild 2.2**) oder eines ebenen Abschnitts (vollständige Modelle; eben **Bild 2.3**).

Die Beschränkungen auf Modellausschnitte ist notwendig, da brauchbare Ergebnisse ein möglichst fein strukturiertes Modellnetz notwendig machen. Der Modellumfang bei dreidimensionalen vollständigen Zahnwellenverbindungen erfordert jedoch selbst bei grober Elementierung extrem große Rechnerleistungen und führt zu langen Rechenzeiten. Daher wird nur ein Teil einer Zahnwellenverbindung unter Berücksichtigung der Symmetrieeigenschaften abgebildet. Bei der Auswahl der Symmetrieebenen muß darauf geachtet werden, daß nicht nur die geometrischen Eigenschaften, sondern auch das Beanspruchungs-

und Verformungsverhalten des vollständigen Bauteiles wiedergegeben werden. Eine Untersuchung von Zahnwellenverbindungen mit Teilungsabweichungen ist zum Beispiel nur mit einem Vollmodell möglich, da die Teilungsabweichungen zu unsymmetrischen Belastungen führen, die mit einem Keilmodell nicht wiedergegeben werden können.

2.1 Ebenes Keilmodell

Mit dem Modell in Bild 2.1 läßt sich unter Annahme eines ebenen Spannungszustands eine ideale fehlerfreie Zahnwellenverbindung mit Preßsitz nachbilden. Der Einfluß von Übermaß, Verzahnungsgeometrie und Nabenwandstärke auf den Flankenpressungsverlauf läßt sich untersuchen. Die Simulation von Drehmomentbelastungen ist mit entsprechenden Randbedingungen ebenfalls möglich. Hier muß allerdings berücksichtigt werden, daß Drehmomentbeanspruchungen zu keinem ebenen Spannungszustand führen und sich daraus ein Fehler bei der Ermittlung der Flankenpressung ergibt. Dieser ist aber im Vergleich mit den Werten des Berechnungsansatzes nach DIN 5466 E /1/ vernachlässigbar klein.

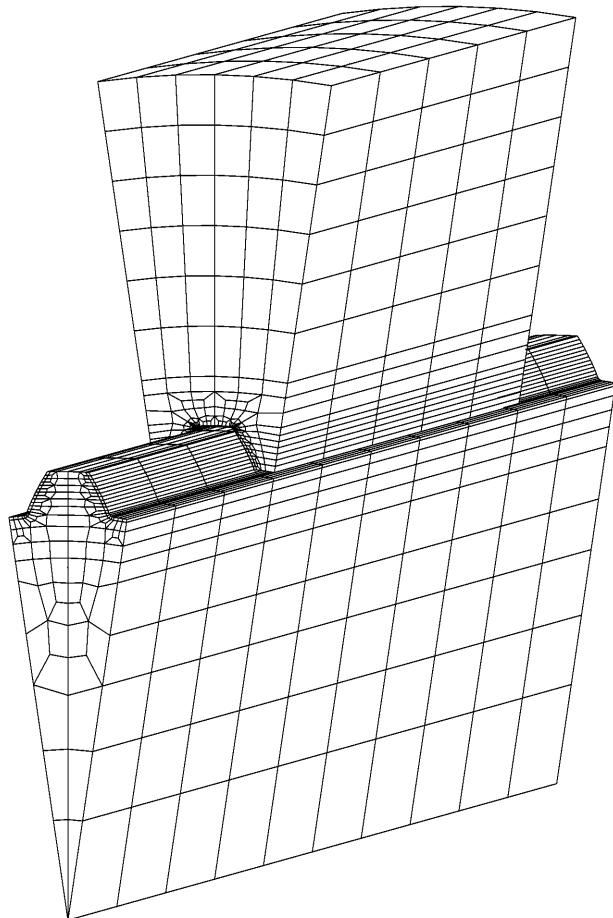
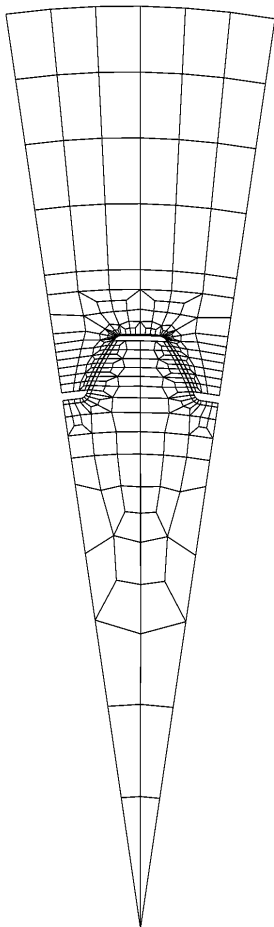


Bild 2.1 Ebenes Keilmodell einer Zahnwellenverbindung

Bild 2.2 Räumliches Vollmodell einer Zahnwellenverbindung

Die Möglichkeit der Drehmomentaufbringung wird hier nicht weiter beschrieben, es sei an dieser Stelle auf den Artikel von K. Wesolowski in dieser Institutsmitteilung verwiesen.

2.2 Räumliches Keilmodell

Das zweite Modell in Bild 2.2 ist wiederum nur für abweichungsfreie (nach DIN) Verzahnungen verwendbar. Außer zu den in Kapitel 2.1 genannten Untersuchungen läßt sich das Modell für Untersuchungen mit zusätzlicher Drehmomentbeanspruchung und zur Ermittlung der Flankenpressungsverteilung über der Verbindungslänge verwenden. Wegen der längeren Rechenzeiten aufgrund eines größeren Modellumfangs wird dieses Modell aber nicht für die mit dem Keilmodell durchführbaren Rechnungen verwendet.

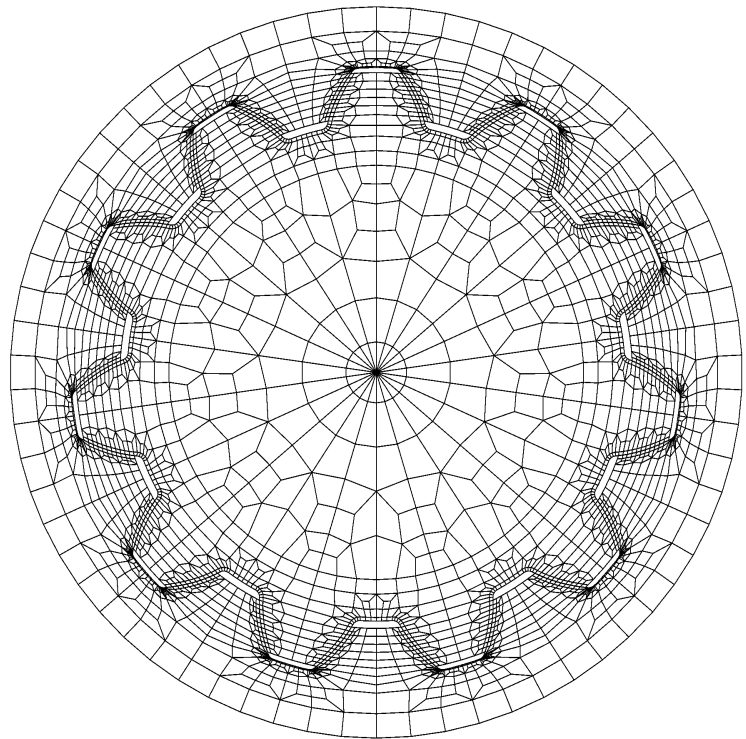


Bild 2.3 Ebenes Vollmodell einer Zahnwellenverbindung
Zahnwellenverbindung 10x0,8x30x11 DIN 5480

2.3 Ebenes Vollmodell

Für die Untersuchung des Einflusses der Teilungsabweichungen auf die Lastverteilung entlang des Verbindungsumfanges sind die Modelle, die nur ein Zahnpaar der Verbindung darstellen, nicht einsetzbar. Zur Bestimmung des Einflusses der Teilungsabweichungen auf benachbarte Zähne muß ein ebenes Vollmodell verwendet werden (Bild 2.3). Durch Verdrehung der Zähne lassen sich beliebige Teilungsfehlergrößen und -verteilungen nachbilden. Dazu werden die Knoten beider Zahnflanken um den Ursprung (Verbindungsachse) gedreht.

3 Modellrandbedingungen

Um mit den beschriebenen Modellen ein Verformungs- und Beanspruchungsverhalten einer vollständigen Zahnwellenverbindung wiedergeben zu können, ist es erforderlich, das Verhalten einer vollständigen Zahnwellenverbindung mit entsprechenden Randbedingungen nachzubilden. Die Verformungen des Teilmodells, bei den in den Berechnungsmethoden verwendeten Schrumpfvorgängen (siehe Kapitel 5) müssen den Verformungen

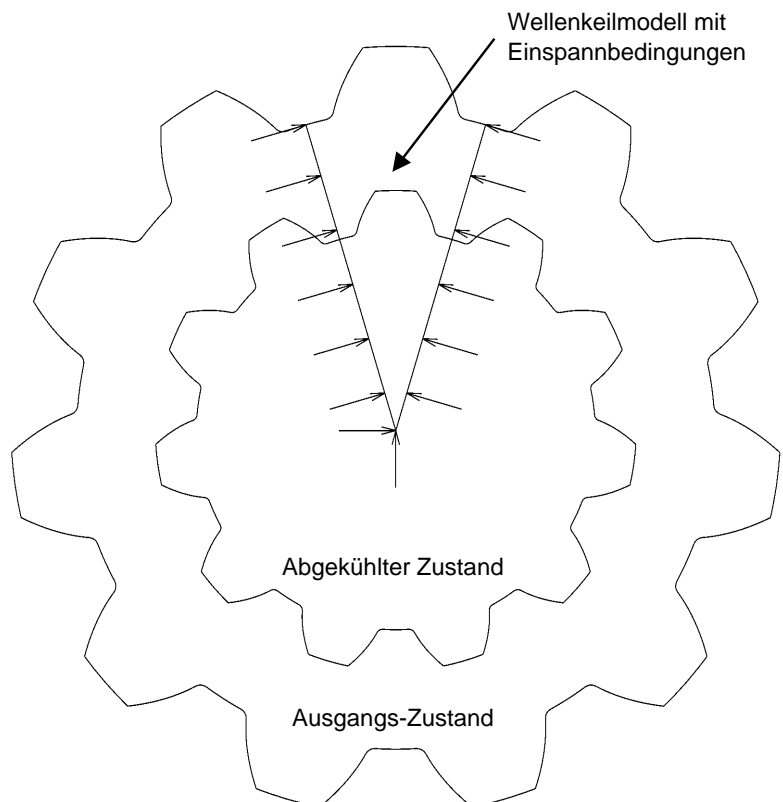


Bild 3.1 Einspannbedingungen der Keilmodelle beim Schrumpfvorgang
(Vergleich Keilmodell - Vollmodell am Beispiel der Welle)

eines Vollmodells entsprechen. Die Modellkanten (Symmetrieebenen der vollständigen Zahnwellenverbindung) verschieben sich bei einem Schrumpfvorgang nur in radialer Richtung; tangential dürfen keine

Verschiebungen auftreten. Dies gilt sowohl für das Wellen- als auch das Nabenmodell (**Bild 3.1**). Zur Festlegung der Knotenfreiheitsgrade in tangentialer Richtung ist eine Transformation der Randknoten in ein lokales zylindrisches Koordinatensystem erforderlich. Die Achsen des lokalen Koordinatensystems befinden sich in diesem Fall auf der Modellkante bzw. senkrecht dazu. Der Wellenmittelpunkt bleibt von dieser Transformation jedoch ausgenommen.

Damit die drei verschiedenen Teilmodelle das Verhalten einer kompletten Zahnwellenverbindung bei Übermaß (kein Drehmoment) wiedergeben, sind die nachfolgend aufgeführten Einspannbedingungen erforderlich:

Randbedingungen für das ebene Keilmodell

- Die Knoten auf den Symmetrieebenen müssen in tangentialer Richtung fixiert werden.
- Der Wellenmittelpunktsknoten wird in allen Koordinatenrichtungen festgelegt, da sich die Lage der Mittelachse nicht verschieben darf.

Randbedingungen für das räumliche Keilmodell

- Die Knoten auf den Symmetrieebenen müssen in tangentialer Richtung fixiert werden.
- Die Knoten auf der Wellenachse werden außer in axialer Richtung in allen anderen Koordinatenrichtungen gefesselt, da sich die Lage der Mittelachse nicht verschieben darf.
- Die Knoten einer beliebigen axialen Modellschicht (des erwärmten oder abgekühlten Modellteils) müssen zusätzlich axial festgelegt werden, die im Kontaktbereich befindlichen Knoten bleiben allerdings davon ausgenommen. Um diese Knotenschicht herum erfolgt die Ausdehnung bzw. Schrumpfung des Modells in axialer Richtung. Die Auswahl der mittleren Modellschicht für die Fesselung führt zu einem vollkommen symmetrischen Schrumpfvorgang.

Randbedingungen für das ebene Vollmodell

- Die Knotenpunkte am Nabenrand werden tangential gegen Verdrehung gefesselt.
- Der Wellenmittelpunktsknoten wird in allen Koordinatenrichtungen festgelegt

- Die erste Knotenschicht um den Wellenmittelpunkt wird zur Verhinderung einer Verdrehung durch die aus den Teilungsabweichungen resultierenden Kräfte tangential gefesselt. Der Radius, auf dem sich die zu fesselnden Knoten befinden, darf jedoch nicht zu klein sein.

4 Die MARC/MENTAT Kontakt-Option

MARC/MENTAT besitzt eine spezielle Kontakt-Option, die eine Kontakt-Simulation zwischen verschiedenen Körpern zulässt. Diese Körper werden aus einer Gruppe von Elementen gebildet, deren Oberflächenkontur zur Überprüfung eines möglichen Kontakts verwendet wird. Dazu wird der Abstand der Oberflächenknoten jedes Körpers gegenüber der Oberflächenstruktur der übrigen Körper überprüft. Sobald der Abstand geringer als die Kontakttoleranz ist, die von MARC aus der Netzgeometrie bestimmt wird oder auch vorgegeben werden kann, liegt ein Kontakt zwischen den Körpern vor. Der Kontakt wird wieder aufgelöst, sobald an den in Kontakt befindlichen Knoten eine Zugkraft festgestellt wird. Weiterhin lässt sich zwischen den Körpern auch Reibung mit verschiedenen Reibungskomponenten simulieren.

5 Simulation eines Übermaßes

Die Simulation eines Preßsitzes erfordert zunächst die Aufbringung eines Übermaßes auf die Zahnflanken der Zahnwellenverbindungen. Diese erfolgt bei der Modellerstellung mit MENTAT durch Verdrehung der Knoten auf den Zahnflanken um einen Winkel bezüglich des Ursprungs; die linken Zahnflanken werden in positiver und die rechten Zahnflanken in negativer Richtung verdreht. Das aufgebrachte Übermaß wird dabei als die Länge des Bogenabschnitts im Teilkreis definiert.

Zu Beginn der Berechnung überschneiden sich zunächst die Modellgeometrien von Welle und Nabe im Zahnflankenbereich (**Bild 5.1**). Die Umwandlung der Überschneidung durch das aufgebrachte Übermaß in eine Pressung lässt sich bei Einhaltung der bereits vorgestellten Einspannbedingungen nur durch die Simulation eines Schrumpfvorgangs realisieren. Für das ebene Modell einer vollständigen Zahnwellenverbindung ist dies aufgrund der Geometriegegebenheiten die einzige Möglichkeit. Es sei hier darauf hingewiesen, daß mit dieser Methode nur Querpreßverbände nachgebildet werden können. An einer Methode zur Simulation von Längspreßverbin-

dung wird im IMW zur Zeit noch gearbeitet.

Entscheidend für die Berechnungsmethodik des Schrumpfvorgangs ist die Kontakt-Option von MARC/MENTAT. Zunächst wird die Kontakttoleranz auf einen so geringen Wert (zum Beispiel $1 \cdot 10^{-7}$ mm) eingestellt, daß aufgrund der vorhandenen Genauigkeit der Knotenkoordinaten kein Kontakt zwischen den Körpern Welle und Nabe festgestellt werden kann. Anschließend kann die Abkühlung der Welle oder Erwärmung der Nabe in einem einzigen Berechnungsschritt erfolgen, da im Prinzip nur eine Abkühlungsrechnung ohne Kontaktermittlung durchgeführt wird. Es handelt sich hier um keine reale Wärmerechnung, sondern nur um eine Vergrößerung bzw. Verringerung der Körperausmaße durch eine gleichmäßige Temperaturerhöhung bzw. -absenkung.

Nach diesem Abschnitt, die Körperkonturen überschneiden sich jetzt nicht mehr, wird die Kontakttoleranz auf einen für die Durchführung der Kontaktermittlung notwendigen Wert eingestellt. Es kann die Wiedererwärmung der Welle bzw. Wiederabkühlung der Nabe in kleinen Temperaturschritten erfolgen. Damit bewegt sich der abgekühlte bzw. erwärmte Körper wieder in Richtung seiner Ausgangsform zurück, mit dem Unterschied, daß jetzt eine Kontaktberechnung erfolgt und der Rückverformungsbereich durch den zweiten vorhanden Körper eingeschränkt wird. Während sich ein Körper zurückverformt tritt er langsam mit dem Zweiten in Kontakt, beide Körper verformen sich im Kontaktbereich auf der Zahnflanke bis schließlich bei der Aus-

gangstemperatur das vorhandene Übermaß in eine Pressung umgewandelt wurde (**Bild 5.2**).

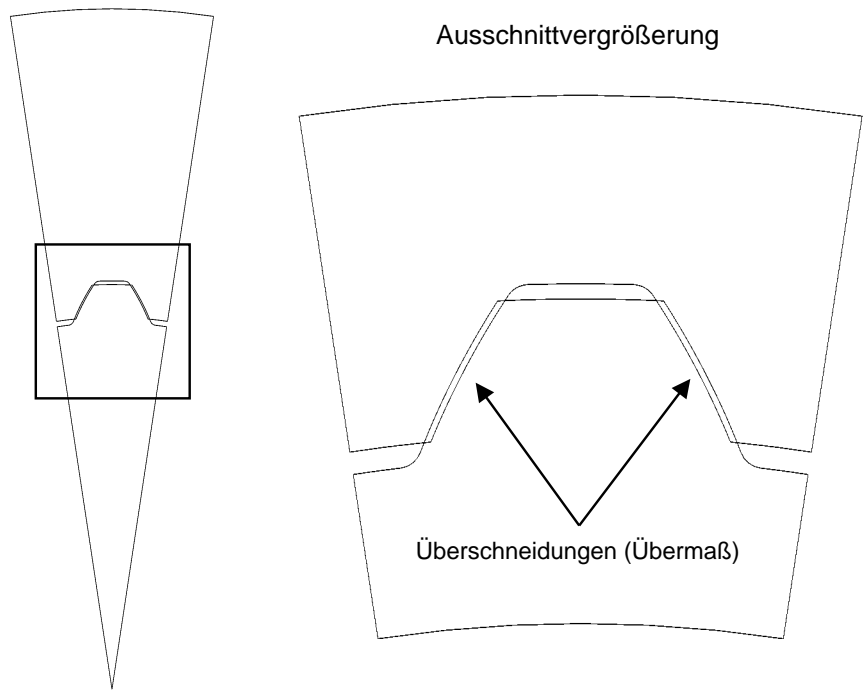


Bild 5.1 Modellüberschneidung im Bereich der Zahnflanken an einem Modell vor der FE-Rechnung (Keilmodell mit Ausschnittvergrößerung)

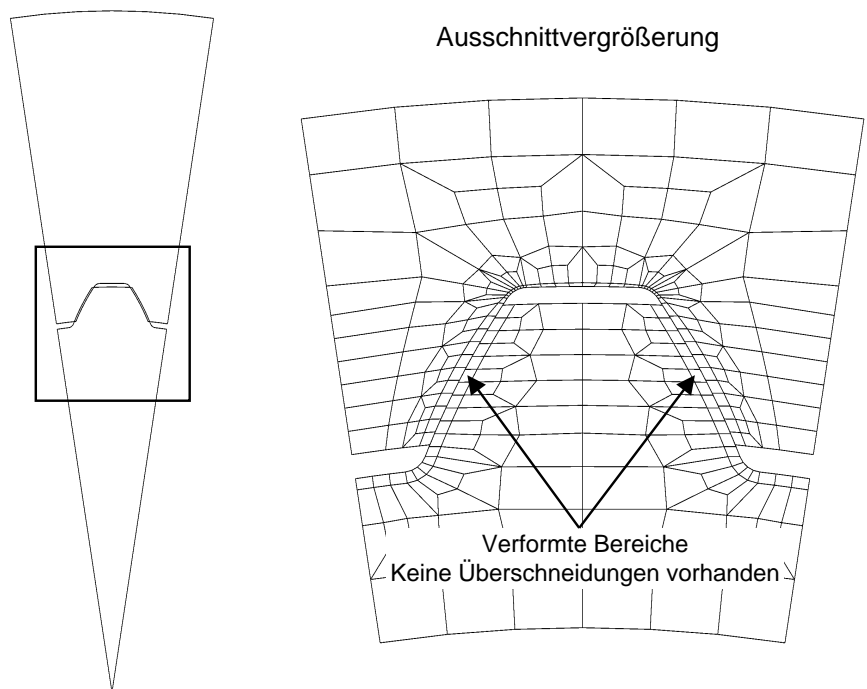


Bild 5.2 Verformtes Modellnetz nach der FE-Rechnung; Übermaß in Verformung umgewandelt (Keilmodell mit Ausschnittvergrößerung)

6 Einfluß von Berechnungsparametern

Mit Auswahl der Kontakttoleranz, der Temperaturschrittweite pro Berechnungsschritt (Inkrement) und des Wärmeausdehnungskoeffizienten erfolgt auch eine Beeinflussung der Vorgänge bei der Kontakt-ermittlung. Eine ungeeignete Kombination dieser Parameter kann zu zahlreichen Iterationsvorgängen bei der Kontaktüberprüfung und damit zu langen Rechenzeiten bis hin zu unbrauchbaren Ergebnissen führen. Es ist daher bei der Auswahl der Parameter auf eine geeignete Abstimmung zu achten.

Prinzipiell ist der Wert für den Wärmeausdehnungskoeffizienten frei wählbar, es sollte dennoch der Wert für den zu untersuchenden Werkstoff gewählt werden, da somit auch die erforderliche Temperaturdifferenz beim Fügevorgang ermittelt werden kann. Die Wahl der Temperaturschrittweite erfolgt anhand des Ausdehnungskoeffizienten und der Modellabmaße, so daß die bei der Berechnung im Bereich des Zahnflankenkontakts auftretenden Längenänderungen die zu wählende Kontakttoleranz nicht überschreiten. Sehr kleine Temperaturänderungen, die kleine Längenänderungen bewirken, führen zu langen Rechenzeiten aufgrund zahlreicher Rechenschritte bis zum Erreichen der Endtemperatur. Eine sehr große Temperaturdifferenz mit Längenänderungen, die größer als die Kontakttoleranz sind, führt ebenfalls zu langen Rechenzeiten, da sich die exakte Kontaktermittlung mit einer im Verhältnis zur Ausdehnungsänderung kleinen Kontakttoleranz wegen alternierender Iteration als sehr schwierig erweist. Die Kontakttoleranz sollte im Verhältnis zu den Modellausmaßen, der verwendeten Elementgröße (auf diese Art berechnet MARC die Kontakttoleranz) und der zu erwartenden Ergebnisgröße gewählt werden. Zu große wie auch zu kleine Werte führen zu ungenauen Kontaktbestimmungen. Eine Untersuchung von Übermaßen von einigen μm , mit resultierenden Verformungen im μm -Bereich, erfordert eine Kontakttoleranz, die ebenfalls in dieser Größenordnung liegt. Für bereits untersuchten Übermaßbereiche von ca. 5 - 100 μm hat sich eine Kontakttoleranz von 1 μm bewährt.

7 Zusammenfassung

Zur Untersuchungen von Zahnwellenverbindungen mit Preßsitz sind für das FE-Programmsystem MARC/MENTAT mehrere Zahnwellenmodelle mit entsprechender Berechnungsmethodik entwickelt

worden. Diese Modelle sind auf die zu untersuchenden Parameter zugeschnitten und hinsichtlich der erforderlicher Rechenzeit optimiert worden. Weiterhin wurden Richtlinien für eine optimale Auswahl der Berechnungsparameter vorgestellt. Die Berechnungsmethodik läßt sich auch auf Preßsitzverbindung mit anderen Formelementen wie zum Beispiel Keilwellenverbindungen übertragen. Die Untersuchung von rotationssymmetrischen Schrumpfverbindungen ist mit MARC/MENTAT ebenfalls möglich, allerdings nicht mit der hier beschriebenen Methode.

Literatur

- /1/ DIN 5466E: Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen; Berlin, Beuth-Verlag 1994
- /2/ DIN 5480: Zahnwellenverbindungen mit Evolventenflanken; Berlin, Beuth-Verlag 1986
- /3/ Burgtorf, U.: Theoretische Untersuchungen zur Ermittlung der Bauteilbeanspruchungen in Zahnwellenverbindungen unter Preßsitz; Studienarbeit TU Clausthal 1992
- /4/ Burgtorf, U.: Ermittlung der Umfangs-Lastverteilung an Zahnwellenverbindungen mit der FE-Methode unter Berücksichtigung fertigungstechnischer Einflüsse; Diplomarbeit TU Clausthal 1993
- /5/ Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 15. Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1983
- /6/ MARC K5.2, MARC Analysis Research Corporation; Palo Alto, USA 1993
- /7/ MENTAT II, MARC Analysis Research Corporation; Palo Alto, USA 1993

Reformation der Zahnwellen-Verbindung

Schäfer, G.

Die Zahnwellenverbindungen mit Evolventenflanken sind ein Forschungsschwerpunkt des IMW. Die vorhandenen Erfahrungen lassen die Generierung eines neuen Flankenprofils, auch unter Berücksichtigung der spanlosen Herstellungsverfahren, sinnvoll erscheinen.

Shaft hub interfaces with involute splines are the focus of research activity at the IMW. One of the results of this activities is, that it is wise to create a new spline geometry for special conditions, considering the filin-gless processes as well.

1. Einführung

Die Forschungsaktivitäten auf dem Bereich der form-schlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen, speziell der Zahnwellen-Verbindungen, stellen seit vielen Jahren einen Schwerpunkt im Bereich der experimentellen und theoretischen Forschung des Institutes dar. An den Anfängen standen grundsätzliche Untersuchungen der Tragfähigkeit und des Verschleißverhaltens von Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5480. Als aktueller Abschluß dieser Arbeiten entsteht zur Zeit eine darauf aufbauende Berechnungsvorschrift für Zahn- und Keilwellen-Verbindungen, die DIN 5466. Neben diesen Untersuchungen, der klassischerweise mit Schiebesitz versehenen Zahnwellen-Verbindungen, werden seit ca. zwei Jahren, mit finanzieller Unterstützung der Forschungsvereinigung Antriebs-technik (FVA), Anstrengungen unternommen, den bei großen Stückzahlen auftretenden "Sonderfall" der axial nichtverschieblichen Zahnwellen-Verbindung mit Preßsitz zu untersuchen.

Ein erstes Ergebnis dieser Untersuchungen ist die ansteigende Empfindlichkeit der Verbindung gegenüber Fertigungstoleranzen wie z.B. Flankenrichtungs- und Teilungsabweichungen. Diese Abweichungen machen sich zunächst bei der Montage durch stark schwankende Montagekräfte bis hin zur Nichtmontierbarkeit bemerkbar. Im späteren Betrieb kommt es dann häufig zu einem verschleißbedingten Ausgleich

dieser Abweichungen. Gleichzeitig wird bei Flankenkontaktgeometrien mit sehr steiler Federkennlinie, **Bild 1**, der Preßsitz aufgehoben und es kommt zum Lockern und damit zum Ausfall der Verbindung.

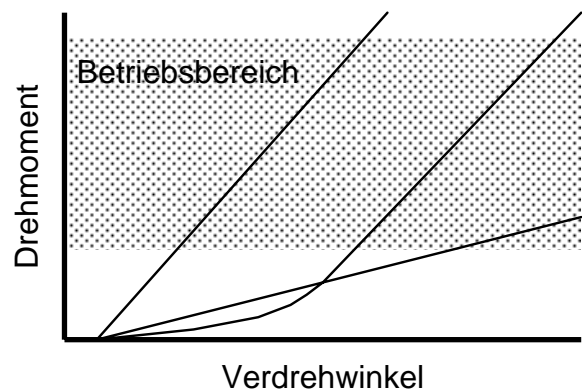


Bild 1 Verdrehwinkel als Funktion des Drehmomentes für verschiedene Verdrehfedersteifigkeiten.

Der andere Extremfall einer sehr flachen Federkennlinie wirkt sich günstig auf den Ausgleich der Flankenrichtungs- und Teilungsabweichungen aus, er hat aber den Nachteil einer sehr begrenzten Drehmomentenübertragungsfähigkeit bei begrenztem Verdrehwinkel. Ideal wäre eine progressive Federkennlinie des Flankenkontaktes, damit würde eine gute Fähigkeit zum Ausgleich von Abweichungen bei gleichzeitig hoher Drehmomentenübertragungsfähigkeit erreicht.

Grundvoraussetzung für eine solche progressive Federkennlinie wäre eine gegenüber der DIN 5480 geänderte Flankenform. Eine solche Änderung sollte in der Serienfertigung nicht unbesehen abgelehnt werden. Über die angesprochenen Verbesserungen hinaus lassen sich mit der neuen Zahnform allgemein funktions-, fertigungs- und montagegerechtere form-schlüssige Welle-Nabe-Verbindungen realisieren. Im folgenden sollen diese Schlagworte genauer ausgeführt und im Zusammenhang erläutert werden.

2. Funktionsgerecht

Die Funktionsanforderungen an formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen spiegeln den weiten Einsatzbereich dieses Maschinenelementes wieder. Beginnend bei der einfachen Drehmomentübertragung von einer Welle auf eine Nabe kommt z.B. bei Riemenscheiben oder Schieberädern eine Querkraftübertragung hinzu. Bei fehlender oder unzureichender Zentrierwirkung erzeugen die angreifenden Querkräfte Relativbewegungen zwischen Welle und Nabe, die durch Reibungsverschleiß zum vorzeitigen Versagen der Verbindung führen. Die Schieberäder stellen außerdem höhere Anforderungen an die Zentrierfähigkeit der Welle-Nabe-Verbindung, da die Laufgüte der Außenverzahnung entscheidend vom Rundlauf des Zahnrades abhängt.

Der notwendigerweise vorhandene Schiebesitz macht z.B. bei Schieberädern mit flankenzentrierten Zahnwellen-Verbindungen eine zusätzliche Durchmesserzentrierung zur Übertragung der Querkräfte nahezu unmöglich. Der Grund dafür liegt in der sich verschärfenden Problematik der Doppelpassung zwischen den beiden Zentrierungen. Die verzahnungsinernen Abweichungen, wie z.B. Teilungsabweichungen, können bei sehr kleinem Verdrehspiel bereits zum Klemmen der Verbindung führen. Durch eine zusätzliche Durchmesserzentrierung kommt es, im Fall größerer Abweichungen zwischen Verzahnungs- und Wellenmitte, zu einer erheblichen Verspannung von Welle und Nabe mit dem Ergebnis einer axialen Bewegungsbehinderung. Diese Funktionbeschränkung könnte durch vergrößertes Verdrehspiel aufgehoben werden. Bei wechselnder Drehmomentbelastung ist diese Lösung aber dringend zu vermeiden, da durch das Spiel die dynamische Beanspruchung (Flankenschlagen) vergrößert werden.

Für den Fall einer Zahnwellen-Verbindung mit Preßsitz behindert die zusätzliche Durchmesserzentrierung nicht die Funktion, da hier die axiale Fixierung eine Aufgabe der Verbindung ist. Solange die Beanspruchungen aus der Verspannung der beiden Zentrierungen unterhalb der Festigkeitsgrenzen von Welle und Nabe bleiben, sollte die Durchmesserzentrierung zur Querkraftübertragung genutzt werden.

Aus diesen Beispielen wird deutlich, wie umfassend die Auswahl und Auslegung von Zahnwellen-Verbindungen sein kann. Bei diesem Vorgang müssen auch Flankengeometrievariationen bewertet werden. Eine in der Norm vorgesehene Variation zur Verbesserung

des Zentrierverhaltens ist die Vergrößerung des Flankenwinkels von 30° auf 45° , **Bild 2.1**.

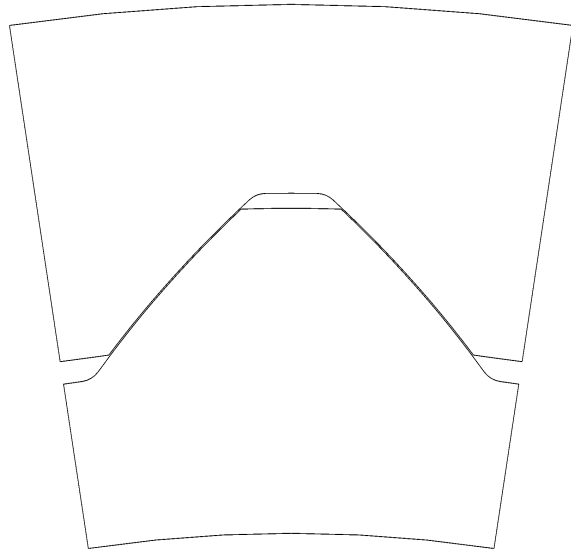


Bild 2.1 Zahn mit Evolventenflanke und 45° Flankenwinkel.

Durch die Vergrößerung des Flankenwinkels werden die aus der Drehmomentbeanspruchung resultierenden Radialkräfte größer. Der Vorteil ist eine höhere Zentrierfähigkeit der Verbindung, dies ist jedoch mit dem Nachteil der ansteigenden Nabenbeanspruchung durch Sprengkräfte verbunden. Bei der Wahl größerer Flankenwinkel ist also auf ausreichende Nabenwandstärken zu achten.

Werden nur geringe Anforderungen an die Zentrierfähigkeit der Verbindung bei geringen Nabenwandstärken gestellt, so empfiehlt es sich, auf geringere Flankenwinkel bis hin zu $\alpha=20^\circ$, **Bild 2.2**, auszuweichen.

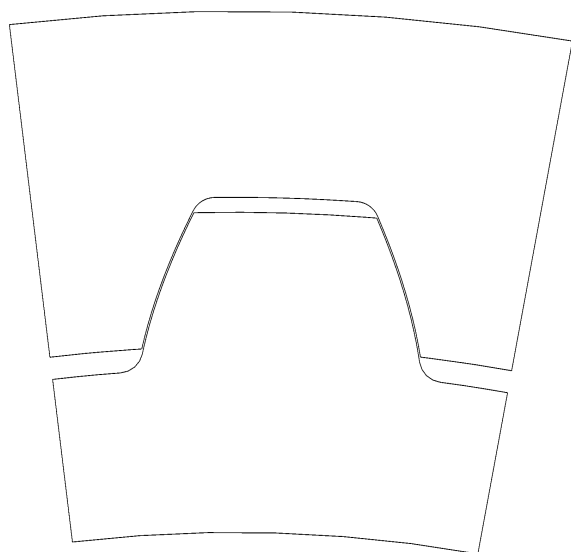


Bild 2.2 Zahn mit Evolventenflanke und 20° Flankenwinkel.

Ein weiter Aspekt bei der Wahl des Flankenwinkels und der Flanken­geometrie ist das Fertigungs­ver­fahren.

3. Fertigungsgerecht

Für die Herstellung von Zahnwellen-Verbindungen werden heute sowohl spanende als auch spanlose Verfahren eingesetzt. Der Einsatzbereich der spanlosen Verfahren liegt zur Zeit hauptsächlich in der Großserienfertigung. Die spannenden Verfahren, wie z.B. das Wälzfräsen und das Wälzstoßen, sind aus der Laufverzahnungsherstellung heraus eingeführte Verfahren. Aufgrund der abwälzenden Arbeitsweise sind sie zur Herstellung von evolventischen Flanken­geometrien geeignet. Bei den konkurrierenden Verfahren der spanlosen Herstellung gibt es längs- und querarbeitende Verfahren. Die Geometrie­beschränkungen sind bei dem querarbeitenden Verfahren durch die Wälzbewegung zwischen zwei Zahnstangen, **Bild 3.1**, denen der spannenden Abwälzverfahren ähnlich.

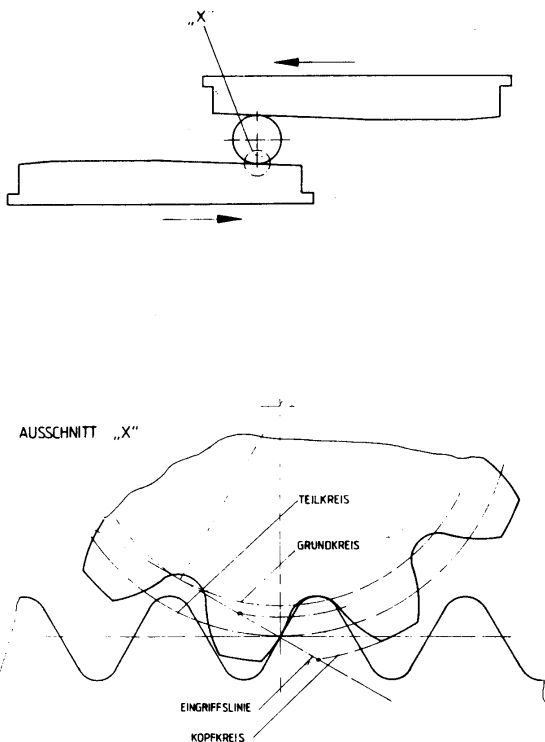


Bild 3.1 Querwalzverfahren, Zahnstange und Ritzel im Eingriff /2/

Das längsarbeitende Verfahren, **Bild 3.2**, erlaubt beliebige Flanken­formen. Die spanlosen Verfahren haben durch den Umformvorgang bedingt Grenzen bei dem Verhältnis Zahn­höhe zu Zahn­breite. Das Fließverhalten des Werkstoffes setzt dabei die Grenze fest,

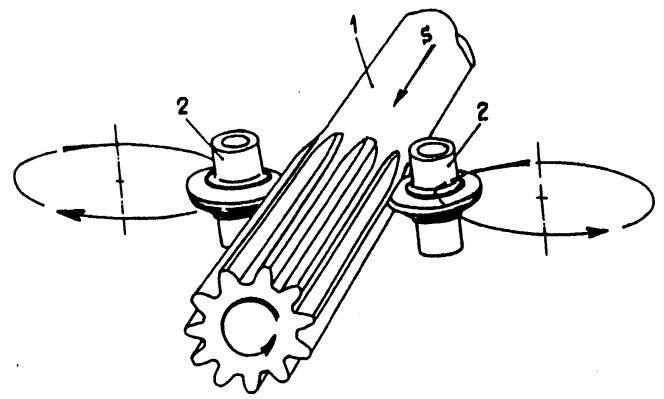


Bild 3.2 GROB-Walzverfahren für Außenverzahnungen. Die Walzrollen haben das Lückenprofil und erlauben so jede beliebige Profilform. /2/

darüberhinaus würde der Werkstoff nicht mehr bis in den Wellenzahnkopf fließen können. Für den Fließvorgang beim Umformen sind grundsätzlich größere Radien günstiger als z.B. die Kerbe im Zahnfuß der DIN 5480 Flanken­geometrie. Die Zahnfußausrundung stellt eine erhebliche Fließ­behinderung dar. Die ANSI B92.2 sieht aus diesem Grund auch die Möglichkeit der vollen Fußausrundung vor. Der zweite Ansatzpunkt wäre eine Rücknahme im Kopfbereich, sowie eine generelle Kopfkürzung. Beide Maßnahmen würden den Umformvorgang erleichtern, indem der Bereich hoher Umformgrade reduziert würde. Bei Betrachtung der Flanken­tragfähigkeit ist eine leichte Kopfrücknahme positiv zu bewerten. Ohne Kopfrücknahme ergeben sich die in **Bild 3.3** dargestellten Belastungsverläufe über der Zahn­höhe.

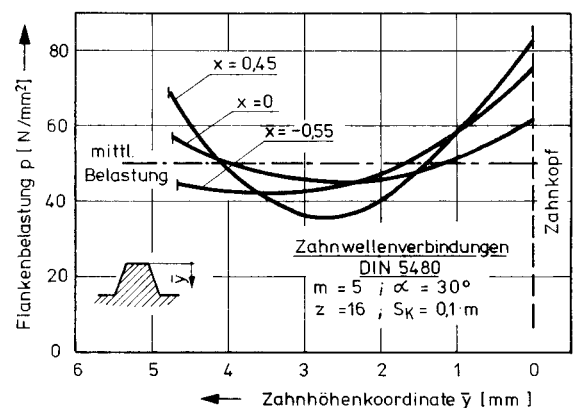


Bild 3.3 Abhängigkeit der Lastverteilung über der Zahn­höhe von der Profilverschiebung /1/

Die Lastüberhöhung im Zahnkopf kann durch eine leichte Kopfrücknahme wirksam vermindert werden. Die generelle Kopfkürzung geht mit einer Reduzierung der wirksamen Flanken­fläche einher. Dieser Nachteil könnte durch eine sowohl fertigungs- als

auch tragfähigkeitsoptimierte Flankengeometrie ausgeglichen werden. Für eine Quantifizierung sind noch entsprechende Berechnungen und Versuche durchzuführen. Die Tragfähigkeitsoptimierung muß zum einen auf eine Vergleichmäßigung der Lastverteilung, sowohl in Zahnhöhenrichtung und über dem Verbindungsumfang als auch in Richtung der Verbindungsbreite, und zum anderen auf die Verbesserung der elastischen Eigenschaften des Flankenkontaktes zum Ausgleich von Verzahnungsabweichungen zielen. Die notwendige Flankenformoptimierung sollte neben der Tragfähigkeit und der Fertigung, die Montierbarkeit als weiteren Parameter beinhalten.

4. Montagegerecht

Wie weiter oben beschrieben wurde, kommt es aufgrund von Fertigungsabweichungen bei der Standardevolventengeometrie DIN 5480 und ANSI B92.2 durch den Flächenkontakt zu erheblichen Problemen. Der Flächenkontakt hat den in Bild 1 schematisch dargestellten steilen Verlauf. Die Verbindung reagiert insgesamt sehr hart, minimale Geometrieabweichungen führen zu erheblichen Flankenkräften und entsprechender Beanspruchung. Diese Charakteristik führt bei der Montage von Verbindungen mit Übergangs- und Preßpassungen zu den Problemen der stark schwankenden Montagekräfte, der teilweisen Nichtmontierbarkeit und dem "Späne ziehen" beim Aufschieben. Eine Lösungsmöglichkeit für dieses Problem ist die gezielte Montage in der idealen Fügstellung. Dazu werden die Wellen und Naben vermessen und nach festgelegten Regeln gepaart. Dieser Vorgang ist sehr zeit- und kostenintensiv, er ist aber dennoch in der Großserienfertigung Standard. An dem betriebenen Aufwand ist das Ausmaß der Probleme gut abzuschätzen, die durch die bestehenden Verzahnungsgeometrien tagtäglich an tausenden von Verzahnungen anfallen.

Aus Kenntnis dieser Sachlage heraus scheint die Zeit reif zu sein eine neue Verzahnungsgeometrie zu entwickeln, die den heutigen Anforderungen und Gegebenheiten durch die Funktion, die Fertigung, die Montage und die Festigkeit entspricht. Diese Geometrie kann die zur Zeit etablierten Normgeometrien nicht vollständig ablösen, aber in den mit sehr großen Stückzahlen belegten Bereichen der kaltverformten und Preßsitz-Verbindungen eine Lösung für die dort anstehenden Probleme sein. Die Berechtigung für eine solche Geometrie ergibt sich aus der gefertigten

Stückzahl und dem momentanen Aufwand zur Beherrschung des Montageprozesses.

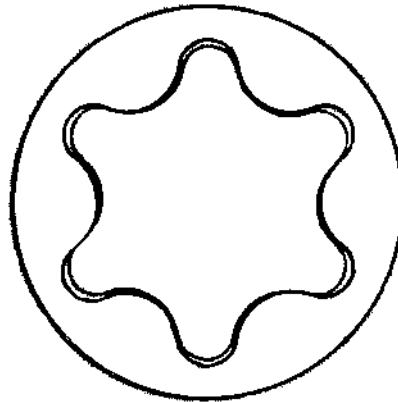


Bild 4.1 TORX-Geometrie

Ein denkbarer Ansatz für die neue Zahnwellen-Geometrie kann die von den Schrauben bekannte TORX-Geometrie sein. Die Anforderungen durch den Umformprozeß werden hier vorbildlich erfüllt. Eine Durchmesserzentrierung kann über den Nabenzahnkopf und den durch den Walzvorgang kalibrierten Wellenzahnfuß erreicht werden, so daß diese Geometrie schon einen Teil der Funktionsanforderungen erfüllen kann. Bezüglich der Montageanforderungen kann momentan nur eine Aussage aus den Flankenwinkel-Untersuchungen abgeleitet werden, die mit größer werdenden Flankenwinkeln einen positiven Einfluß auf die Abweichungstoleranz der Verbindung nachgewiesen haben. Die Sprengwirkung auf die Nabe ist dabei gesondert zu betrachten.

Abschließend kann gesagt werden, daß hier eine Möglichkeit zur Innovation der Zahnwellenverbindung gegeben ist, die es in Zukunft zu nutzen und auszubauen gilt.

5. Literatur

- /1/ Dietz, P.: Die Berechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen, Selbstverlag des Verfassers, 1978
- /2/ Bausch, Th.: Moderne Zahnradfertigung 2.Aufl., expert Verlag, 1994

Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit der geschwächten Welle-Nabe-Preßverbindungen

Tan, L.

Welle-Nabe-Preßverbindungen werden häufig durch konstruktiv bedingte Diskontinuitäten, z.B. Bohrungen oder Nuten, gestört. Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit dieser geschwächten Verbindungen wurden mit Finite-Element-Methode, Dehnungsmeßstreifen und Spannungsoptik untersucht. Die Störungen bedingen einerseits eine örtliche Spannungszunahme und damit eine Begrenzung der übertragbaren Lasten infolge Kerbwirkung, andererseits verursachen diese Störungen eine Änderung des elastischen Verhaltens.

Shrink-fit assemblies are often disturbed by longitudinal or radial holes or longitudinal notches. The strength and force-transmit ability of these disturbed assemblies were researched with finite-element method, strain gauges and photoelasticity. The disturbances cause local stress concentrations, limit the transmittable forces and change the elastic behavior in the assemblies in comparison with the axially symmetric shrink-fit assemblies.

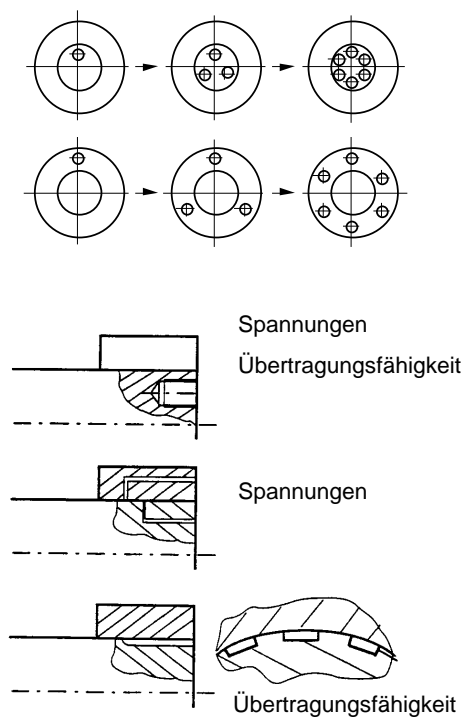


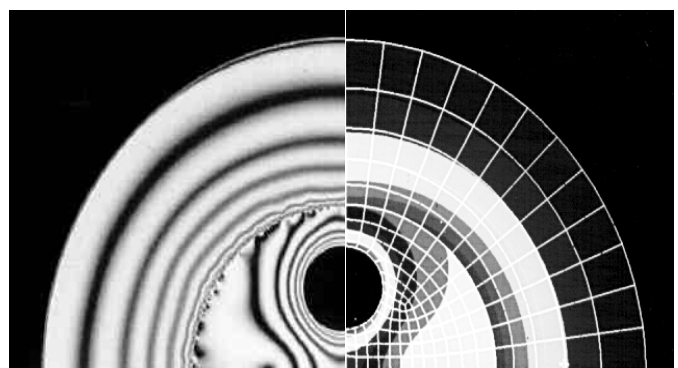
Bild 1: Übersicht über die untersuchten geometrischen Bauformen

1 Spannungserhöhung und Verminderung der Übertragungsfähigkeit

Aufgrund der nicht rotationssymmetrischen Geometrie vermindert sich im Vergleich mit rotationssymmetrischen Preßverbindungen die Übertragungsfähigkeit der geschwächten Verbindungen, gleichzeitig erhöht sich die Spannung am Bohrungsrand oder an der Zahnkopfkante. Die Abhängigkeiten der Spannungserhöhung und Übertragungsfähigkeitsverminderung von den Geometrieparametern werden mit analytischen Ansätzen und FEM numerisch untersucht und meßtechnisch sowohl an spannungsoptischen Modellversuchen als auch an ausgeführten Verbindungen verifiziert. **Bild 2** zeigt die Verteilung der Hauptschubspannung in einer Welle mit zwei exzentrischen Axialbohrungen.

Abhängig von der geometrischen Form der Störungen entstehen zum Teil sehr starke Kerbwirkungen, die besonders bei Sackbohrungen im Bereich des Bohrungsgrundes zu dreidimensionalen Spannungszuständen mit gleichachsigem Spannungszustand führen und damit als Ursache vieler bisher nicht geklärter Schadensfälle detektiert werden können. Auch die Störung an unterbrochenen Preßfügen mit z.B. Kerbzahnprofil führt zu Beanspruchungen und damit zu Berechnungsmethoden, die mit dem rotationssymmetrischen Spannungszustand nur bedingt zu vergleichen sind.

Im Vergleich zur ungestörten Preßverbindung erhöht sich die Spannung am Bohrungsrand oder an

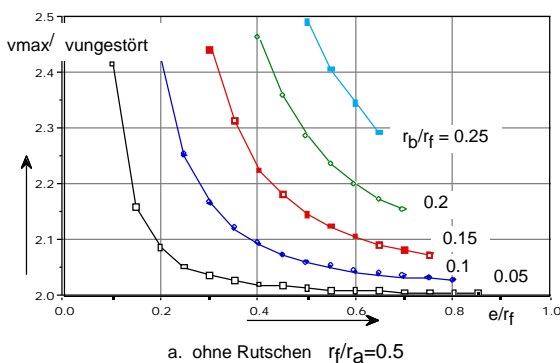


a) Spannungsoptikmodell b) FE-Modell
Bild 2: Verteilung der Hauptschubspannung

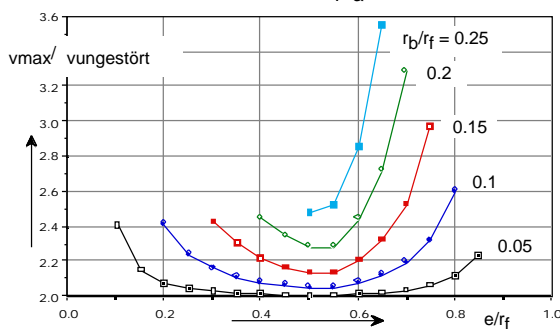
der Zahnkopfkante. Die Spannungserhöhung wird mit einer Formzahl k relativ zur ungestörten Verbindung dargestellt:

$$k = v_{max} / v_{ungestört}$$

Die maximale Bohrungsrandspannung liegt an der dünnsten Stelle der Bohrungswand, nämlich am zur Nachbarbohrung, zur Fügefläche oder zur Stirnfläche nächstliegenden Punkt. Dünnere Bohrungswand führt zu stärkerer Beanspruchung. Für Welle oder Nabe mit Sackbohrungen sind die maximalen Spannungen an der Stirnfläche und an der Bohrerkegelspitze. Der Bohrungsinnenrand wird durch die Stützwirkung des ungestörten Teiles schwächer beansprucht als an der Stirnfläche. Der Spannungszustand an der Stirnfläche stimmt mit dem ebenen Spannungszustand zusammen und kann als 2-di-



a. ohne Rutschen $r_f/r_a=0.5$



b. mit Rutschen $r_f/r_a=0.5$

Bild 3: Formzahl für Welle mit 2 Axialbohrungen

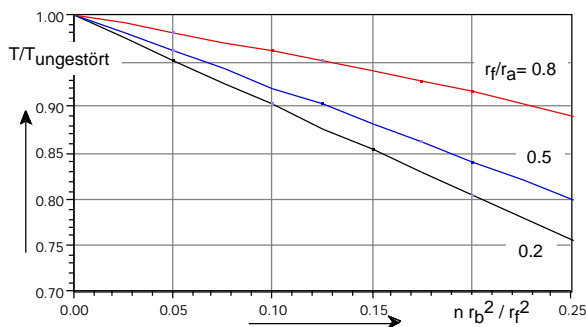


Bild 4: Übertragungsfähigkeit für Welle mit Axialbohrungen

mensional-Problem gelöst werden.

Für ungestörte Nabe auf Zahnwelle oder Keilwelle treten Spannungsspitzen an der Zahnkopfkante sowohl in der Welle wie auch in der Nabe auf.

Auf der Fügefläche einer geschwächten Pressverbindung ist der Fugendruck ungleichmäßig verteilt. Die Übertragungsfähigkeit der geschwächten Verbindung vermindert sich im Vergleich zur ungestörten Verbindung mit gleichem Übermaß. Ingenieurmäßig kann man die Verminderung der Übertragungsfähigkeit mit einem durchschnittlichen Fugendruck p quantitativ ausdrücken:

$$= T/T_{ungestört} = p / p_{ungestört}$$

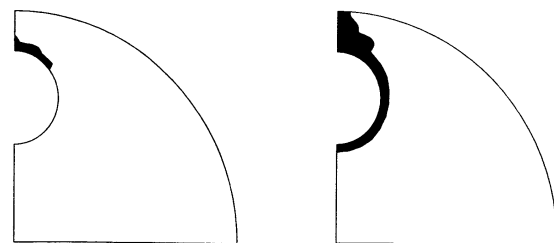
2. Einflußfaktoren

2.1 Einfluß der Montagebedingung

Auf der Fügefläche einer geschwächten Verbindung wirken nicht nur radialer Fugendruck, sondern auch tangentialer Fugenschubkraft. Wenn der Reibbeiwert beim Fügevorgang nicht groß genug ist, entsteht örtliches Rutschen in der Umfangsrichtung. Dadurch erhöht sich die Spannung am Bohrungsrand. Bestimmung der Beanspruchungen mit dem Grenzwert $\mu_{montage} = 0$ liegt also auf der sicheren Seite. Der durchschnittliche Fugendruck p und die dadurch bestimmte Übertragungsfähigkeit sind praktisch unabhängig von der Montagebedingung.

2.2 Einfluß der teilplastischen Verformung

Wenn die maximale Spannung gleich der Streckgrenze des Werkstoffs ist, wird der Pressverband elastisch am stärksten beansprucht. Um die Festigkeit des Werkstoffs besser auszunutzen, können plastische Verformungen unter bestimmten Bedingungen



a) $\bar{u}/\bar{u}_{egrenz}=1.1$

b) $\bar{u}/\bar{u}_{egrenz}=1.4$

Bild 5: Plastische Zonen einer Welle mit 2 Bohrungen ohne Montagereibung

zugelassen werden.

Mit zunehmendem Übermaß entstehen und vergrößern sich plastische Zonen an den stark beanspruchten Stellen (**Bild 5**). Die kritischen Stellen, die früher vollplastisch werden können, sind die dünnste Stelle der Bohrungswand zwischen Nachbarbohrungen, zwischen Bohrung und Fügefläche, zwischen Bohrung und Stirnfläche, der Zahnkopf und die Stelle zwischen Zahnkopfkanten in der Nabe.

Solange keine kritische Stelle vollplastisch verformt

ist, übt die verbleibende elastische Zone eine ausreichende Stützwirkung auf die plastischen Zonen aus. Der durchschnittliche Fugendruck bleibt daher praktisch weiterhin proportional dem Übermaß wie im elastischen Bereich. Der Faktor μ gilt also praktisch auch für den teilplastischen Bereich.

Als Steifigkeitsbedingung darf keine kritische Stelle vollplastisch werden. Als Festigkeitsbedingung darf die maximale plastische Dehnung nicht größer als die zulässige plastische Dehnung.

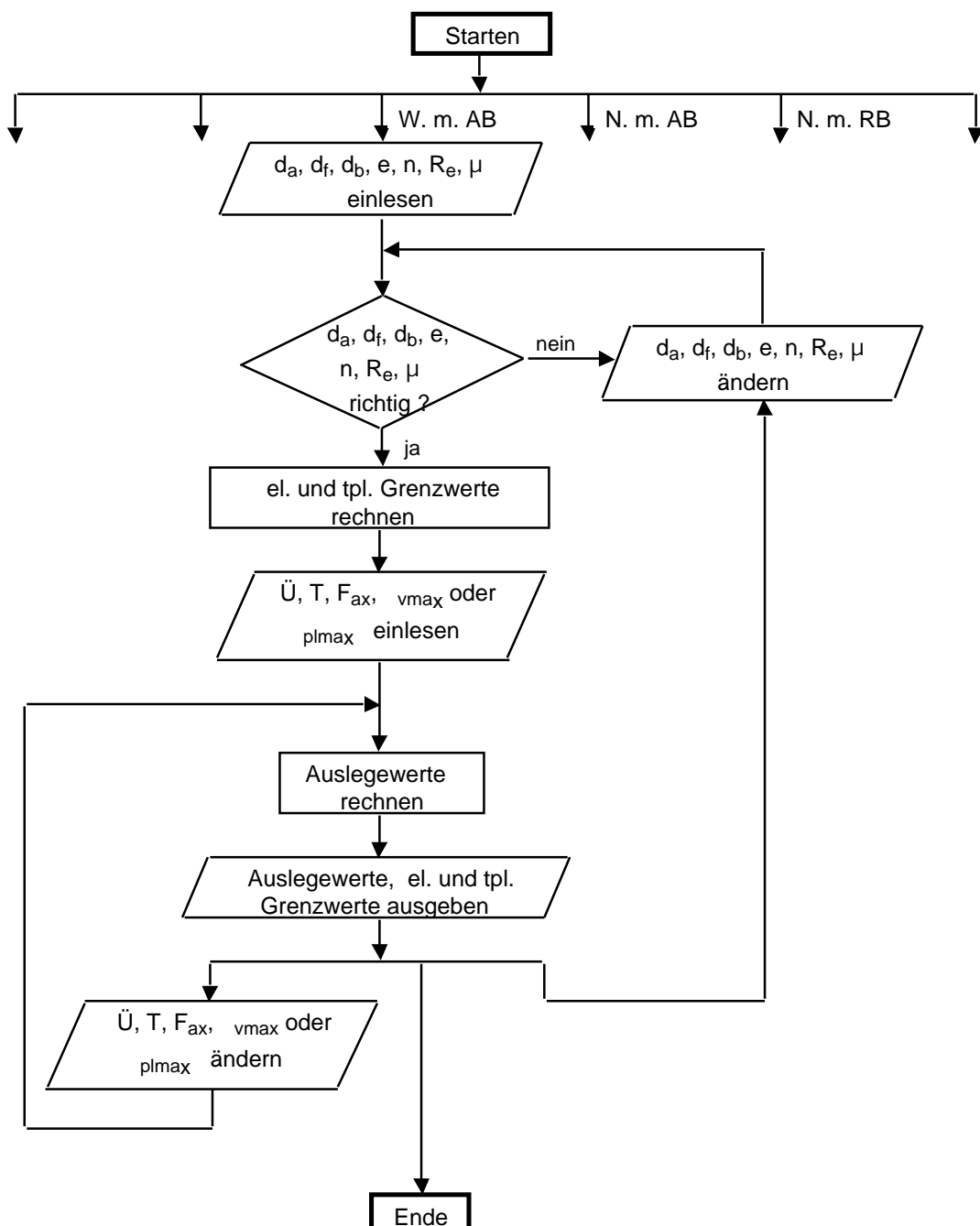


Bild 6: Flußdiagramm des Programms "prsvb"

In einem Beispiel einer Welle mit 2 Bohrungen erhöht sich die Übertragungsfähigkeit durch Zulassung plastischer Verformung um 40%.

2.3 Einfluß des Oberflächenhärtens

Da die Steifigkeitsbedingungen ausschließlich durch Geometrieparameter bestimmt und praktisch unabhängig vom Materialparameter E_{pl} sind, ist eine weitere Erhöhung der Übertragungsfähigkeit durch Oberflächenhärtens im allgemeinen nicht zu erwarten. Die durch Steifigkeits- und Festigkeitsbedingung begrenzte Übertragungsfähigkeit gilt also auch grundsätzlich für Preßverbände aus inhomogenen Werkstoffen.

3. Konstruktionsregeln

Im Bezug auf den Bohrungsdurchmesser sind die Bohrungswand zwischen Bohrung und Fügefläche und die zwischen Nachbarbohrungen in einer durch Axialbohrungen geschwächten Welle, die zwischen Bohrung und Fügefläche in einer durch Axialbohrungen geschwächten Nabe und die zwischen Bohrung und Stirnfläche in einer durch Radialbohrungen geschwächten Nabe so dick wie möglich zu konstruieren.

4. Rechnerunterstützte Auslegung

Für die rechnerunterstützte Auslegung der geschwächten Welle-Nabe-Preßverbindungen im elastischen und teilplastischen Bereich wurde ein FORTRAN-Programm entwickelt. Das auf einem PC (Personal-Computer) implementierbare Programm ist sowohl im Batch-Betrieb wie auch interaktiv lauffähig. Die Programmführung erfolgt so, daß das Benutzerhandbuch nicht gebraucht wird. Während eines interaktiven Auslegungsvorgangs wird der Konstrukteur bei einem Eingabefehler oder einer unverträglichen Geometrie durch wiederholten Hinweis auf dem Bildschirm aufgefordert, die eingegebenen Daten noch einmal zu überprüfen und zu korrigieren. In Dialogform wird der Konstrukteur durch die einzelnen Programmteile geführt. Alle Eingabe- und Ausgabedaten werden nicht nur auf dem Bildschirm angezeigt sondern auch in einer Ausgabedatei in der Festplatte gespeichert. Das EDV-Programm ist unabhängig von den Gegebenheiten spe-

zieller EDV-Anlagen und auf verschiedene Betriebssysteme portierbar.

5. Berechnungsbeispiel

Eine ungestörte Nabe auf einer durch zwei Sackbohrungen geschwächten Welle.

Außenradius der Nabe	$r_a = 100 \text{ mm}$
Fugenradius	$r_f = 50 \text{ mm}$
Schrumpfsitzlänge	$L = 80 \text{ mm}$
Bohrungsanzahl	$n = 2$
Bohrungsradius	$r_b = 10 \text{ mm}$
Bohrungstiefe	$h_b = 40 \text{ mm}$
Radius der Bohrkegelspitze	$r_e = 0.8 \text{ mm}$
Exzentrizität der Bohrungen	$e_x = 30 \text{ mm}$
Streckgrenze der Welle	$R_{e_W} = 300 \text{ N/mm}^2$
Reibbeiwert	$\mu = 0.1$
Elastizitätsmodul	$E = 210000 \text{ N/mm}^2$
Übermaß	$\ddot{U} = 0.1 \text{ mm}$

i. Elastische Grenzwerte

Übermaß	$\ddot{U} = 0.1194 \text{ mm}$
Axialkraft	$F_{ax} = 229039 \text{ N}$
oder Drehmoment	$T = 11452 \text{ Nm}$
max. Spannung	$v_{max_W} = 300 \text{ N/mm}^2$
max. Spannung	$v_{max_N} = 219.35 \text{ N/mm}^2$

ii. Teilplastische Grenzwerte

Übermaß	$\ddot{U} = 0.2182 \text{ mm}$
Axialkraft	$F_{ax} = 418629 \text{ N}$
oder Drehmoment	$T = 20931 \text{ Nm}$
max. Spannung	$p_{l_W} = 0.211\%$
max. Spannung	$v_{max_N} = 400.93 \text{ N/mm}^2$

iii. Auslegewerte

Übermaß	$\ddot{U} = 0.1 \text{ mm}$
Axialkraft	$F_{ax} = 191862 \text{ N}$
oder Drehmoment	$T = 9593 \text{ Nm}$
max. Spannung	$v_{max_W} = 251.31 \text{ N/mm}^2$
max. Spannung	$v_{max_N} = 183.75 \text{ N/mm}^2$

6. Literatur

FVA Forschungsheft 421 (1993)

Programm WEIBULL – ein Subprocessor zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit keramischer Bauteile mittels FEM-Unterstützung

Jakel, R.

Am IMW ist eine Berechnungssoftware entwickelt worden, die dem in der Praxis stehenden Ingenieur die Möglichkeit bietet, Zuverlässigkeit und Lebensdauer des von ihm entwickelten keramischen Bauteils schnell und komfortabel abzuschätzen. Im Gegensatz zu anderen sogenannten „Postprozessoren“ wird dabei die statistische Berechnung unmittelbar während des FEM-Laufes durchgeführt, zeitaufwendige Ein- und Ausleseprozeduren entfallen. Das Programm nutzt Schnittstellen zum kommerziellen, am IMW implementierten Finite-Elemente-Programm MARC.

The IMW has developed a powerful and userfriendly software for the engineer to calculate reliability and lifespan of ceramic engine parts. In opposite to other programs called "postprocessors", this program calculates statistics during the FE processing. So no time for in- and output operations is used. The program uses interfaces of the commercial FEM software MARC, which is used by the IMW.

1. Einleitung

Die Berechnung keramischer Bauteile unterscheidet sich in mehrfacher Hinsicht von der dem Ingenieur sehr viel vertrauteren Berechnung der üblichen metallischen Werkstoffe:

- 1) Durch die wesentlich größere Festigkeitsstreuung keramischer Werkstoffe können im Gegensatz zu Metallen keine deterministischen Aussagen getroffen werden („hält oder hält nicht“), sondern es kann nur eine Wahrscheinlichkeit angegeben werden, mit der ein keramisches Bauteil einer äußeren Belastung standhält bzw. bei der es versagt.
- 2) Das Verhalten unter mehrachsiger Belastung unterscheidet sich erheblich von den Vorhersagen des für die Berechnung metallischer Werkstoffe bewährten von Mises- oder des Schubspan-

nungskriteriums. Es muß bei keramischen Werkstoffen unbedingt zwischen Druck- und Zugfestigkeit unterschieden werden.

- 3) Keramische Werkstoffe können auch unter statischen Lasten nach langer Zeit plötzlich und ohne Vorankündigung versagen (unterkritisches Rißwachstum). Metallische Werkstoffe tun dies in der Regel nur bei dynamischen Lasten, wobei meist rechtzeitig makroskopisch sichtbare Anrisse erkannt werden können.
- 4) Keramische Werkstoffe sind in der Regel völlig spröde und weisen keine Duktilität auf, die den Abbau von Spannungsspitzen ermöglicht. Für die Festigkeitsrechnung bedeutet dies – im Gegensatz zu den anderen Eigenschaften – eine Vereinfachung, da das Materialverhalten sehr gut mittels des für linearelastische Werkstoffe gültigen Hookeschen Gesetzes beschrieben werden kann. Für die Konstruktionspraxis jedoch ist damit eine wesentlich größere Sorgfalt bei der Gestaltung und Lasteinleitung verbunden.

Eine Bestimmung der Überlebenswahrscheinlichkeit auf analytischem Wege ist bereits bei relativ einfach erscheinenden Geometrien praktisch nicht mehr möglich, da die Berechnung eine Integration der Spannungen über das gesamte belastete Bauteilvolumen bzw. die Bauteiloberfläche erfordert. Die Methode der Finiten Elemente eignet sich daher in hervorragender Weise zur Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bauteils, da nach der Berechnung für diskrete Punkte in der Struktur (Integrationspunkte) die Spannungen bekannt sind und daraus einfach eine numerische Näherungslösung für das Volumen- bzw. Oberflächenintegral ermittelt werden kann.

Das Programm WEIBULL ist eine in FORTRAN 77 programmierte Subroutinensammlung, die speziell für den Gebrauch mit dem Finite-Elemente-Programm MARC entwickelt worden ist. Als Schnittstelle wird dabei auf die MARC-Usersubroutinen „PLOTV“

und „USDATA“ zurückgegriffen, die es erlauben, die Werte des Spannungstensors für jeden Integrationspunkt abzufragen bzw. benutzerspezifische Daten (hier Steuerparameter, Werkstoffkennwerte für die Keramik und Belastungsdaten) im MARC-Eingabedeck festzulegen. Compilerspezifische Erweiterungen sind bei der Programmierung nicht vorgenommen worden, so daß WEIBULL auf vielen unterschiedlichen Systemen lauffähig ist.

Die Subroutinensammlung WEIBULL bietet die Möglichkeit, die Sofort- und Zeitausfallwahrscheinlichkeit nach drei verschiedenen globalen Mehrachsighypothesen /1-3/ während eines einzigen Rechenlaufs gleichzeitig zu ermitteln. Ein großer Vorteil des Programms für die Auslegungspraxis ist die Möglichkeit, die Zeitausfallwahrscheinlichkeit auch unter in-stationärer Belastung ermitteln zu können. Hierzu wird das phänomenologisch-statistische Modell nach Nadler /4/ genutzt. Unabhängig von der keramischen Berechnung erlaubt das Programm, Spannungs- und Dehnungskomponenten zu ermitteln (Radial-, Tangential- und Hauptspannungen, Hauptschubspannungen bzw. entsprechende Verzerrungen) und grafisch mittels des Pre- und Postprocessors MENTAT darzustellen. Desweiteren kann das zu einem Integrationspunkt zugehörige Teilvolumen („Subelementvolumen“) wie das Gesamtvolumen der FE-Struktur bestimmt werden.

2. Weibull-Verteilung

An spröden Werkstoffen, insbesondere an Keramik, lassen sich folgende grundlegende Eigenschaften beobachten:

- 1) Die Festigkeit ist kein deterministischer Wert, sondern kann erheblich streuen;
- 2) große Teile haben eine niedrigere Festigkeit als kleine;
- 3) das Materialverhalten ist linearelastisch, begrenzt durch einen Spröbruch.

Zur Beschreibung dieses Materialverhaltens können folgende Annahmen gemacht werden:

- 1) Ein Bauteil mit dem Volumen V besteht aus vielen tragenden Volumenelementen, sogenannten „Bezugsvolumen“, ähnlich einer Kette aus einzelnen Kettengliedern (daher die Bezeichnung

„Weakest Link Concept“ – „Modell des schwächsten Kettengliedes“);

- 2) die Festigkeit der einzelnen Volumenelemente ist statistisch verteilt;
- 3) wegen der Sprödeheit des Materials führt der Bruch eines Bezugs-elementes zum Bruch der gesamten Struktur, Spannungen werden nicht durch plastisches Fließen wie bei duktilen Werkstoffen abgebaut.

Mittels dieser Modellannahmen entwickelte Weibull 1939/5/ die nach ihm benannte Verteilung. Demnach läßt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit eines einachsigen auf Zug belasteten Bauteils aus der Gleichung

$$P_f(\sigma) = 1 - e^{-R_r} = 1 - e^{-\frac{1}{V_0 \cdot \sigma_0^m} \int_V (\sigma - \sigma_u)^m dV}$$

ermitteln. Hierin sind:

P_f Ausfallwahrscheinlichkeit

R_r Bruchrisiko („risk of rupture“)

σ (einachsige) Spannung im Bauteil

σ_u untere Grenzspannung, unterhalb derer kein Bruch mehr auftritt (Mindestfestigkeit)

σ_0 Bezugselementfestigkeit („scale parameter“)

V Bauteilvolumen

V_0 Volumen des Bezugselementes

m Weibullmodul („shape parameter“), ein Maß für die Streuung der Festigkeit

Praktisch setzt man meist σ_u zu Null, da ein unterer Grenzwert experimentell nur sehr schwierig nachzuweisen ist und man mit dieser Vereinfachung „auf der sicheren Seite“ liegt. Normiert man die Weibull-Verteilung mit der maximal auftretenden Spannung σ_{max} im Bauteil, so ergibt sich mit $z = \sigma / \sigma_{max}$, $z_0 = \sigma_0 / \sigma_{max}$, $z_u = \sigma_u / \sigma_{max}$ die Beziehung

$$P_f = 1 - e^{-\frac{1}{V_0 \cdot z_0^m} \int_V (z - z_u)^m dV}$$

Damit wird das Integral von der absoluten Höhe der Beanspruchung unabhängig. Um das Integral auch vom Bauteilvolumen V unabhängig zu machen, führt man die Funktion

$$f(z) = \frac{1}{V} \frac{dV}{dz}$$

ein, die den Namen „Spannungsdichtefunktion“ trägt und zur Vereinfachung der weiteren analytischen Behandlung dient /4/. Damit wird

$$P_f = 1 - e^{-\frac{V}{V_0 \cdot z_0^m} \int_0^1 f(z)(z-z_u)^m dz}$$

Zusammenfassen des Integrals und Resubstituieren von z_0 ergibt:

$$P_f = 1 - e^{-\frac{V}{V_0} \cdot \frac{\sigma_{max}^m}{\sigma_0^m} \cdot I} \quad (*)$$

Hierin ist

I normiertes Weibull-Integral, abhängig von:

- a) der Geometrie des belasteten Bauteils,
- b) von der Spannungsverteilung und
- c) vom Weibullmodul m ;

V Gesamtvolumen des Bauteils.

Die Größen I und V sowie die maximale Spannung σ_{max} werden näherungsweise vom Programm WEIBULL bestimmt, so daß mit ihrer Kenntnis und obiger Gleichung die Ausfallwahrscheinlichkeit für eine andere absolute Lasthöhe σ_{max} oder ein anderes absolutes Bauteilvolumen V einfach und ohne erneuten FEM-Durchlauf analytisch berechnet werden kann – wichtig z.B. für Baureihenentwicklungen.

3. Einsatz der FE-Methode

Die Weibull-Verteilung kann für eine konstante (einsachsige) Spannung in einem Bauteil mit dem Volumen V vereinfacht geschrieben werden:

$$P_f(\sigma) = 1 - e^{-\frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m}$$

Man kann sich nun ein Bauteil zusammengesetzt denken aus lauter kleinen „Subbauteilen“, in denen näherungsweise eine solche konstante Spannung herrscht. Die Überlebenswahrscheinlichkeiten $P_{s,i}$ ($P_{s,i} = 1 - P_{f,i}$) aller Subbauteile miteinander multipliziert ergibt die Gesamtüberlebenswahrscheinlichkeit.

Eine FE-Struktur eignet sich in idealer Weise für eine solche Berechnung, weil der Gesamtkörper durch die Elementierung bereits in kleinere Volumen zerlegt ist. In einem finiten Element sind die Spannungen an mehreren diskreten Punkten, den sogenannten Integrationspunkten, bekannt. Man könnte nun das Elementvolumen $V_{FE,i}$ bestimmen und den Mittelwert der Spannungen aller Integrationspunkte des Ele-

mentes bilden. Damit ließe sich das Bruchrisiko $R_{rFE,i}$ des Elementes i aus der Gleichung

$$R_{rFE,i} = \frac{V_{FE,i}}{V_0} \left(\frac{\bar{\sigma}_i - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m$$

berechnen. Einer Multiplikation der Überlebenswahrscheinlichkeiten entspricht einer Addition der Elementbruchrisiken, so daß die Gesamtausfallwahrscheinlichkeit der Struktur aus n Elementen ermittelbar ist durch die Beziehung

$$P_f = 1 - e^{-\sum_{i=1}^n R_{rFE,i}}$$

Bei starken Spannungsgradienten führt dieses Verfahren jedoch zu sehr unbefriedigenden Ergebnissen, da die Mittelwertbildung höhere Integrationspunktspannungen (die ja mit der Potenz von m eingehen) zu wenig berücksichtigt. Praktisch werden oft viel zu niedrige Ausfallwahrscheinlichkeiten berechnet.

Es bietet sich daher an, jedem Integrationspunkt des Elementes ein bestimmtes zugehöriges Teilvolumen zuzuordnen. Man könnte dies durch Division des Gesamtelementvolumens durch die Anzahl der Integrationspunkte berechnen, was aber bei verzerrten Elementen ebenfalls unnötig große Abweichungen verursacht. Das Programm WEIBULL bildet daher mittels vektorgeometrischer Beziehungen Hilfsknoten in den Elementen, aus denen dann das zu einem Integrationspunkt gehörige Teilvolumen $V_{sub,ij}$, das sogenannte Subelementvolumen, berechnet wird. Für die FE-Struktur aus n Elementen mit je k Integrationspunkten erhält man dann die Strukturausfallwahrscheinlichkeit aus der Gleichung

$$P_f = 1 - e^{-\frac{1}{V_0 \cdot \sigma_0^m} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^k V_{sub,ij} (\sigma_{ij} - \sigma_u)^m \right]}$$

Stellt die Struktur nur einen Teil des Gesamtvolumens des Bauteils da, was in vielen FE-Rechnungen wegen der Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften der Fall ist, so muß die Gesamtausfallwahrscheinlichkeit durch Potenzieren der Strukturüberlebenswahrscheinlichkeit mit dem Symmetriefaktor berechnet werden. In WEIBULL kann man daher einen solchen Faktor eingeben: Bei der Ausgabe wird zwischen Strukturvolumen (also das Volumen, das das FE-Netz umschließt) und dem Gesamtvolumen (das Volumen des realen Bauteils) unterschieden.

Dieses Verfahren liefert bei einer im Zugbereich sorgfältigen, aber nicht notwendigerweise sehr feinen Netzgenerierung in Verbindung mit höherwertigen Elementen befriedigende Ergebnisse. Ein genaueres Verfahren zur Ausfallwahrscheinlichkeitsberechnung durch Ausnutzen von Formfunktionen der Elemente /6/ ist bei der in der praktischen Anwendung erzielbaren Genauigkeit bei der Extrapolation von der Probe auf das Bauteil nicht zwingend notwendig.

Neben der errechneten Ausfallwahrscheinlichkeit gibt das Programm WEIBULL dem Benutzer auch das Volumen, die maximale Spannung und das normierte Weibull-Integral aus. Dieses Integral wird jedoch nicht durch numerisches Integrieren der Spannungsdichtefunktion errechnet, sondern einfach durch Umstellen von Gleichung (*) nach I, da nach der FEM-Berechnung alle Größen rechts des Gleichheitszeichens bekannt sind:

$$I = - \frac{V_0 \cdot \sigma_0^m \cdot \ln(1 - P_f)}{V \cdot \sigma_{\max}^m}$$

Mit der Kenntnis dieses Integrals kann leicht die Ausfallwahrscheinlichkeit für eine andere absolute Lasthöhe ohne erneuten FEM-Berechnungslauf analytisch berechnet werden.

4. Mehrachsigkeitseinfluß

Die bisher vorgestellte Verteilung erlaubt nur die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit bei einachsiger Bauteilbeanspruchung. Für den mehrachsigen Beanspruchungsfall muß für die einachsige Spannung σ eine geeignete Vergleichsspannung σ_V

$$\sigma_V = f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx})$$

gesetzt werden. Weibull selbst hat in seiner Arbeit einen Lösungsansatz vorgestellt, indem er alle positiven Normalspannungskomponenten über die Einheitskugel integrierte. Andere Autoren schlagen eine Kombination des statistischen Modells mit bruchmechanischen Ansätzen vor. Da alle diese Verfahren wegen der damit verbundenen Integrationen jedoch zusätzliche Rechenzeit benötigen, wurden für das Programm WEIBULL drei recht einfache, globale Mehrachsigkeitshypothesen programmiert, die für den praktischen Einsatz meist befriedigende Ergebnisse liefern – zumal, wenn man die Vorhersagen der

Kriterien vergleichen kann. Dies sind:

- a) Barnett-Freudenthal-Approximation /1/
- b) Weibull-Stanley-Theorie /2/
- c) Hypothese der positiven Hauptdehnungen /3/

Alle diese Hypothesen beruhen auf dem sogenannten PIA-Modell (Principle of Independent Action). Dabei werden drei Teilvergleichsspannungen σ_{iV} , nämlich – die positiven Hauptspannungen bei a); – die positiven Hauptspannungen bzw. im Falle negativen Hauptspannungen mit dem gemessenen Verhältnis von einachsiger Druck- zur Zugfestigkeit σ_d/σ_z umgerechnete Teilvergleichsspannungen bei b); – die positiven Hauptdehnungen bei c); nach der Gleichung

$$\sigma_V = \sqrt[m]{(\sigma_{1V} - \sigma_u)^m + (\sigma_{2V} - \sigma_u)^m + (\sigma_{3V} - \sigma_u)^m} + \sigma_u$$

zu einer resultierenden Vergleichsspannung σ_V überlagert und tragen so unabhängig voneinander einen Teil zur Ausfallwahrscheinlichkeit bei.

Bei der praktischen Anwendung ist allerdings oft nicht bekannt, mit welcher Hypothese das Versagensverhalten des eingesetzten keramischen Konstruktionswerkstoffs am besten beschrieben werden kann. Hier sollen daher die wesentlichen Unterschiede der drei vorgestellten Kriterien kurz erläutert werden. Dazu dienen die **Bilder 1 bis 3**.

Diese Bilder zeigen die Hüllkurven der Festigkeit für den zweiachsigen Spannungszustand nach den drei Hypothesen, normiert mit der einachsigen Zugfestigkeit σ_z . Zum besseren Vergleich sind die Hypothese der positiven Hauptdehnungen und die Weibull-Stanley-Theorie für eine Querkontraktionszahl von $\nu=0,2$ bzw. einem Festigkeitsverhältnis von $\sigma_d/\sigma_z=5$ aufgetragen. Die Festigkeitsstreuung ist dabei nicht berücksichtigt, d.h., $m=\infty$. Es fällt auf, daß:

- Barnett-Freudenthal-Approximation und Weibull-Stanley-Theorie im ersten Quadranten identisch sind;
- die Hypothese der positiven Hauptdehnungen bei biaxialer Zugbeanspruchung eine höhere, bei biaxialer Druckbeanspruchung eine geringere Überlebenswahrscheinlichkeit hat als die Weibull-Stanley-Theorie bzw. die Barnett-Freudenthal-Approximation;

- im Zug-Druck- wie im Druck-Druck-Quadranten die Hypothese der positiven Hauptdehnungen das schärfste Kriterium darstellt.

Im dreiachsigen Fall liefert bei Zugbeanspruchungen die Hypothese der positiven Hauptdehnungen die geringste Ausfallwahrscheinlichkeit. Bei isostatischer Druckbeanspruchung errechnen Barnett-Freudenthal-Approximation und Hypothese der positiven Hauptdehnungen eine Bruchwahrscheinlichkeit von Null, während die Weibull-Stanley-Theorie einen Bruch vorhersagt. Da das Programm WEIBULL Ausfallwahrscheinlichkeiten nach allen drei Hypothesen berechnet, können durch Vergleich auch Rückschlüsse auf den Spannungszustand im Bauteil und die „Sicherheit“ der Vorhersage gemacht werden.

5. Lebensdauerabschätzung

Bisher wurde nur die sogenannte „Sofortausfallwahrscheinlichkeit“ betrachtet, d.h., die Wahrscheinlichkeit, mit der das Bauteil unmittelbar nach Auftreten der Beanspruchung versagt. Praktisch existiert jedoch ein mehr oder weniger stark ausgeprägter statischer Dauerfestigkeitseffekt, d.h., nach einer bestimmten Belastungszeit kann auch ein Bauteil versagen, das zunächst der Beanspruchung gewachsen war. Dieser Effekt – neben der Festigkeitsstreuung – macht es notwendig, keramische Bauteile mit sehr großer Sicherheit gegenüber der kurzzeitig ertragbaren Spannung auszulegen bzw. die Belastungszeit in die Berechnung mit einzubeziehen.

Ein für die praktische Arbeit sehr gut handhabbarer und einfacher Ansatz wird von /4/ vorgestellt. Dabei wird das Bruchrisiko der Weibullschen Verteilungsfunktion durch einen Exponentialansatz erweitert, so daß sich ergibt:

$$P_f = 1 - e^{-\frac{1}{V_0} \int_V \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m dV \left(\frac{t}{t_0} \right)^\mu}$$

- mit
- t Belastungszeit,
- t₀ Bezugszeit,
- μ Zeiteinflußparameter (Werkstoffkenngröße).

Dieser Ansatz kann auch für mehrachsige und zeitlich instationäre Beanspruchungen ausgeweitet werden. Damit erhält man

$$P_f = 1 - e^{-\frac{V}{V_0 \cdot \sigma_0^m \cdot t_0^\mu} \cdot I \cdot \left\{ \int_0^t \sigma_{iVmax}(t)^{m/\mu} dt \right\}^\mu} \quad (**)$$

- mit
- t Gesamtbelastungszeit,
- I normiertes Weibull-Integral nach einer der Mehrachsigkeitshypothesen,
- σ_{iVmax}(t) zeitlicher Verlauf der maximalen Teilvergleichsspannung nach einer der Mehrachsigkeitshypothesen.

Für stufenförmige Lasten kann man sich eine Ersatzbelastungszeit aus der Gleichung

$$t_{ers} = \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{\sigma_{iVmax,j}}{\sigma_{iVmax}} \right)^\mu t_j \right]$$

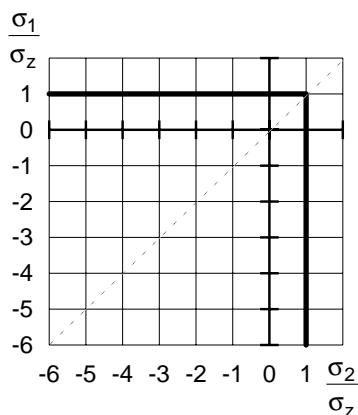


Bild 1: Barnett-Freudenthal-Approximation im σ₁/σ₁-Diagramm (m=∞)

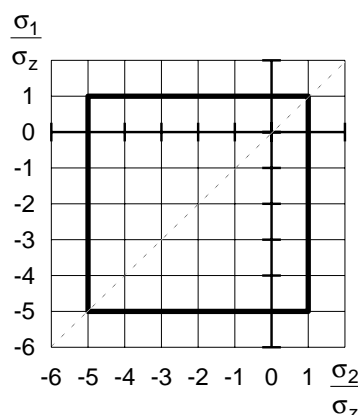


Bild 2: Weibull-Stanley-Theorie im σ₁/σ₁-Diagramm für σ_d/σ_z=5 (m=∞)

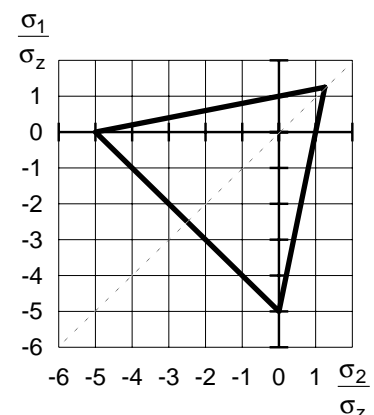


Bild 3: Hypothese der positiven Hauptdehnungen im σ₁/σ₁-Diagramm für v=0,2 (m=∞)

mit

σ_{iVmax} maximale Teilvergleichsspannung (Bezugsspannung) nach einer der drei Mehrachsigkeitshypothesen für die größte Last aller Stufen,

$\sigma_{iVmax,j}$ maximale Teilvergleichsspannung nach einer der vorgestellten Hypothesen für die j-te Laststufe,

n Zahl der Laststufen,

t_j Belastungszeit der Stufe j,

berechnen.

Damit vereinfacht sich Gleichung (**) zu

$$P_f = 1 - e^{-\frac{V}{V_0} \cdot \frac{\sigma_{iVmax}^m}{\sigma_0^m} \cdot \frac{t_{ers}^\mu}{t_0^\mu}}$$

Voraussetzung für die Anwendung dieser Gleichung ist, daß der Beanspruchungszustand im Bauteil über der Zeit sich qualitativ nicht ändern darf. Ändert er sich, so kann kein normiertes Weibullintegral mehr angegeben werden.

Mittels des Programms WEIBULL kann aber dennoch eine zeitlich abhängige Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet werden. Dazu werden die jetzt auch qualitativ unterschiedlichen Beanspruchungen in den einzelnen Laststufen mit einer vom Benutzer angebbaren Stufenbelastungszeit berücksichtigt. Die Gesamtausfallwahrscheinlichkeit der Struktur aus n Elementen mit je k Integrationspunkten über die j Laststufen (Belastungszeit je Laststufe, d.h., je Increment der MARC-Berechnung: t_j) kann dann aus der Gleichung

$$P_f = 1 - e^{-\frac{1}{V_0 \cdot \sigma_0^m \cdot t_0^\mu} \cdot \sum_{b=1}^n \left[\sum_{l=1}^k V_{sub,bl} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^j (\sigma_{V,bli} - \sigma_u)^{m/\mu} t_i \right\}^\mu \right]}$$

ermittelt werden. Darin ist $\sigma_{V,bli}$ die resultierende Vergleichsspannung nach einer der drei globalen Mehrachsigkeitshypothesen.

/4/ vergleicht das von ihm vorgestellte Modell mit dem bruchmechanischen der langsamen Rißausbreitung, gesteuert durch den Rißausbreitungsparameter n der Paris-Gleichung. Danach ist folgendes festzustellen: Für extrem kurze Belastungszeiten liefern die Modelle unterschiedliche Vorhersagen, da das phänomenologisch-statistische Modell für eine Belastungszeit von Null auch eine Bruchwahrscheinlichkeit von Null vorhersagt. Das bruchmechanische Modell dagegen strebt gegen die Inertfestigkeit. /4/ definiert daher zu-

sätzlich zur Inertfestigkeit die sogenannte 1-Sekunden-Kurzzeitfestigkeit, die durch eine Weibull-Verteilung angenähert wird.

Ab der unter üblichen Bedingungen gemessenen Kurzzeitfestigkeit können die Modelle dagegen recht gut verglichen werden. Es existiert die Parameterentsprechung

$$\mu \approx \frac{m}{n}$$

mit

m Weibull-Modul,

n Rißausbreitungsparameter der Paris-Gleichung.

Sind also Weibullmodul und Rißausbreitungsparameter z.B. aus Prospektwerten oder Literaturangaben bekannt, so kann daraus der Parameter μ bestimmt und eine überschlägige Näherungsrechnung mittels des Programms WEIBULL gemacht werden. Liegen solche Werte nicht vor, so ermittelt man den Parameter μ zweckmäßig im Stufenversuch /4/.

Es muß darauf hingewiesen werden, daß die Ausfallzeiten einer Charge keramischer Bauteile bei völlig gleicher Beanspruchung um weit mehr als zwei Zehnerpotenzen streuen können, was zusammen mit der Unsicherheit in der Parameterbestimmung und der Problematik einer Festigkeitsrechnung große Sorgfalt bei Berechnung und Gestaltung und ausreichende „Sicherheitsfaktoren“ notwendig macht. Oft kann man auch den Rißfortschritt nicht mit einem einfachen Potenzgesetz beschreiben, was dann wesentlich aufwendigere Berechnungen erfordert.

6. Programmtechnische Umsetzung

Im Gegensatz zu anderen sogenannten „Postprozessoren“ (z.B. das Programm „CARES“ der NASA), die eine Ausfallwahrscheinlichkeitsberechnung erst nach vollzogener FE-Berechnung erlauben, werden beim Programm WEIBULL vorhandene Schnittstellen, sogenannte „Usersubroutinen“, unmittelbar während des FE-Rechenlaufes genutzt. Es handelt sich also nicht um eine selbständige Programmeinheit, die ihre Daten aus einem zu erzeugenden oder bereits vorhandenem Ergebnisfile liest, sondern um eine Subroutinensammlung, die die während des FE-Pro-

grammlaufes zur Verfügung stehenden Daten verarbeitet. Entsprechend einfach wird das Programm WEIBULL beim Aufruf des FEM-Programms MARC durch den üblichen Befehl für eine Usersubroutine „marc -jid jobname -u weibull“ gestartet. Dadurch wird das Programm übersetzt, an das MARC-Hauptprogramm gebunden und ein neues Executable erzeugt, was direkt während des MARC-Rechenlaufes die Ausfallwahrscheinlichkeitsberechnung vornimmt. Durch dieses Prinzip sind also keine zeitaufwendigen Ein- und Ausleseprozeduren notwendig, ebenso erhöht sich der Bedienungskomfort beträchtlich, weil separate Steuerfiles nicht beschrieben und verarbeitet werden müssen. Alle notwendigen Daten können direkt aus dem MARC-Eingabefile gelesen werden.

Zur Eingabe solcher Werkstoff- und Steuerdaten dient die MARC-Usersubroutine USDATA /7/. Damit können die benutzerspezifischen Daten aus dem Eingabedeck herausgelesen und in selbstdefinierten Commonblöcken abgelegt werden. Materialdaten wie Weibullmoduli oder charakteristische Spannungen (bis zu 6 verschiedene Keramikbauteile können während eines Laufes berechnet werden) oder auch Steuerparameter (z.B. für den gewünschten Umfang an Ausgabeinformationen) stehen also jederzeit zur Verfügung.

Wesentliche Basis des Programms WEIBULL ist jedoch die Usersubroutine PLOTV /7/. Diese Subroutine übergibt für jeden Integrationspunkt des FE-Netzes den Spannungstensor. Nach der Berechnung des zum Integrationspunkt gehörenden Teilvolumens können so mittels der durch die Subroutine USDATA zur Verfügung gestellten Materialdaten die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Subelemente und schließlich die der Gesamtstruktur berechnet werden. Den prinzipiellen Ablauf der Berechnungsvorgänge zeigt das Flußdiagramm **Bild 4**.

Die Subroutinesammlung WEIBULL ist modular aufgebaut, d.h., jeder Berechnungsschritt wird in einer separaten, übersichtlichen Subroutine durchgeführt. Steuerndes „Hauptprogramm“ ist dabei die Usersubroutine PLOTV.

7. Weitere Features und Grenzen von WEIBULL

Neben der Hauptaufgabe, Ausfallwahrscheinlichkeiten für keramische Bauteile zu berechnen, hat das Programm WEIBULL eine Reihe an Features, die es auch für den allgemeinen FEM-Nutzer interessant machen. Dazu zählt die Berechnung bestimmter Tensorkomponenten (z.B. Hauptspannungen, Hauptdehnungen) sowie die Möglichkeit, das Volumen bzw. die Oberfläche einer FEM-Struktur anhand der Knotenkoordinaten des unverformten Netzes zu berechnen. Diese Größen können übrigens auch mit der am Institut für Maschinenwesen entwickelten Subroutine PLOTVOL berechnet werden.

Derzeit ist die Verwendung des Programms beschränkt auf folgende MARC-Elementtypen /8/:

- a) Ebener Spannungszustand: Typ 3, 26, 114, 124
- b) Ebener Dehnungszustand: Typ 11, 27, 115, 125
- c) Axialsymmetrischer Spannungszustand: Typ 10, 28, 116, 126

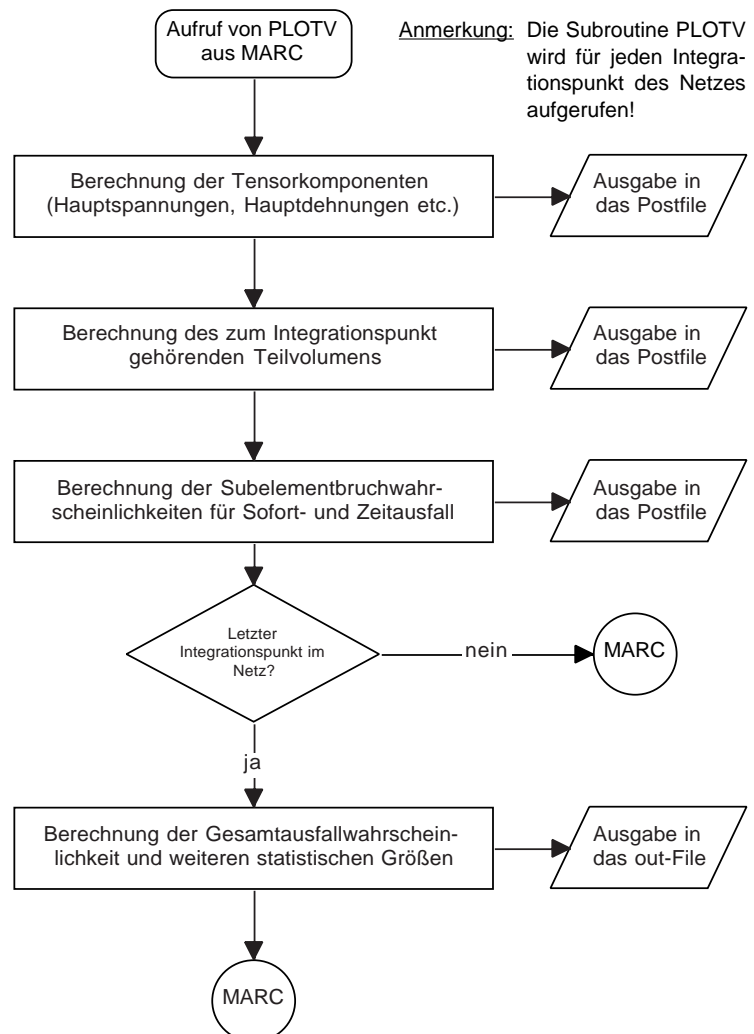


Bild 4: Vereinfachter Ablauf des Berechnungsganges in WEIBULL

- d) Dreidimensionaler Spannungszustand: Typ 7, 21, 117, 127
- e) Schalenelemente: Typ 22, 75

Die besten Ergebnisse werden mit den QUAD8- und HEXA20-Elementen mit höherwertigen Rechenansätzen erzielt, also hier die Elemente 26, 27, 28 und 21. Insbesondere bei hohen Biegebeanspruchungen mit großen Spannungsgradienten sind die „einfachen“ Elemente (QUAD4-, TRIANGLE6-, HEXA8-, und TETRA10-Elemente) mit einer geringeren Zahl an Integrationspunkten zu vermeiden. Wird die MARC-Usersubroutine PLOTV, auf der die Subroutinesammlung WEIBULL aufbaut, für einen Elementtyp aufgerufen, den WEIBULL nicht unterstützt, so erfolgt keine Ausgabe und der Sprung zurück zu MARC. Das Programm erlaubt in-core- und out-of-core-Berechnungen, die zulässige Größe des Jobs hängt nur vom verwendeten Computersystem ab.

8. Zusammenfassung des Vorgehens bei einer Bauteilauslegung

Möchte man ein Bauteil auf seine Zuverlässigkeit überprüfen, so kann unter Verwendung des Programms WEIBULL und des FE-Programmsystems MARC/MENTAT wie folgt vorgegangen werden:

- 1) Durchführung von Festigkeitsmessungen an Proben aus dem Bauteil (z.B. 4-Punkt-Biegeversuch)
- 2) Ermitteln der Weibull-Parameter
- 3) Netzgenerierung und Erstellung der Randbedingungen mittels des Pre- und Postprocessors MENTAT
- 4) Eingabe der Werkstoffkennwerte und Steuerparameter unter der Karte USDATA im MARC-Inputdeck
- 5) Eingabe der gewünschten Postvariablen unter der Steuerkarte POST
- 6) MARC-Rechenlauf mit Aufruf
marc -jid jobname -u weibull
- 7) Analyse der Überlebens- und Ausfallwahrscheinlichkeiten, normierten Weibullintegrale, Gesamtvolumen und Spitzenspannungen im out-File
- 8) Interpretation der Vergleichsspannungen und lokalen Bruchwahrscheinlichkeiten aus dem Postfile mittels des Pre- und Postprocessors MENTAT

In Verbindung mit dem Finite-Elemente-Programm MARC erhält der Benutzer also ein leistungsfähiges Werkzeug zur Berechnung keramischer Bauteile. Umfangreiche Informationen zur Theorie, zur Installation und zur Nutzung des Programms WEIBULL enthält das im IMW verfaßte Handbuch /9/, aus dem für diesen Aufsatz einige Teile gekürzt entnommen sind.

9. Literaturverzeichnis

- /1/ Barnett, R.L. et al.: Fracture of Brittle Materials Under Transient Mechanical and Thermal Loading; AFFDL-TR-66-220 (1967)
Freudenthal, A.M.: Statistical Approach to Brittle Fracture; Fracture Vol. 2, Liebowitz, ed., Academic Press, New York (1968), 591-619
- /2/ Stanley, P.; Fessler, H.; Sivill, A.D.: An Engineer's Approach to the Prediction of Failure Probability of Brittle Components; Proc. Br. Ceram. Soc., 22 (1973), S. 153-187
- /3/ Beierlein, G.: Festigkeitsverhalten keramischer Werkstoffe unter mehrachsiger mechanischer Beanspruchung; Diss. Ingenieurhochschule Zwickau (1988)
- /4/ Nadler, P.: Beitrag zur Charakterisierung und Berücksichtigung des spezifischen keramischen Festigkeitsverhaltens; Diss. Bergakademie Freiberg (1989)
- /5/ Weibull, W.: A Statistical Theory of the Strength of Materials; Ingeniörsvetenskapsakademiens Handlingar, Stockholm, Nr. 151 (1939)
- /6/ Heger, A.: Bewertung der Zuverlässigkeit mehrachsiger belasteter keramischer Bauteile; Fortschritt-Berichte VDI Reihe 18 Nr. 132, Düsseldorf: VDI-Verlag 1993
- /7/ MARC Analysis Research Corporation: Handbuch D „User Subroutines“ zum FE-Programm MARC, Rev. K5.2; Palo Alto, North America, 1992
- /8/ MARC Analysis Research Corporation: Handbuch B „Element Library“ zum FE-Programm MARC, Rev. K5.2; Palo Alto, North America, 1992
- /9/ Jakel, R.: Programm WEIBULL – ein Subprozessor zur Abschätzung der Sofort- und Zeitausfallwahrscheinlichkeit keramischer Bauteile für das Finite-Elemente-Programm MARC. Theorie und Bedienungsanleitung; Handbuch, IMW TU Clausthal, September 1994

EQUIP – Wissensbasiertes System zur Entwicklung lärmarmen Produkte

Haje, D.; Gummersbach, F.

Für die Entwicklung lärmarmen Produkte benötigt der Konstrukteur einfachen Zugriff auf maschinenakustisches Wissen. Im Rahmen eines Forschungsprojektes auf europäischer Ebene wird zu diesem Zweck ein wissensbasiertes Beratungssystem für die Entwicklung lärmarmen Produkte erstellt. Das Projekt "EQUIP" (Work Methodology for Development of Quiet Products) wird im Rahmen des BRITE-EURAM II-Programmes durchgeführt und durch die Generaldirektion XII der Kommission der Europäischen Union gefördert. Die Projektpartner sind TPD TNO (NL), BeSB GmbH (D), CETIM (F), IMW (D), Caterpillar Belgium S. A. (B), FAUN Umwelttechnik GmbH (D) und CIAT (F).

To develop low-noise products, designers need easy access to acoustic knowledge. Under the European research project "EQUIP" a knowledge based consulting system for low-noise design is being developed. The "EQUIP" project (Work Methodology for Development of Quiet Products) is funded by the Commission of the European Union, DG XII, under the BRITE-EURAM II Programme. Partners are TPD TNO (NL), BeSB GmbH (D), CETIM (F), IMW (D), Caterpillar Belgium S. A. (B), FAUN Umwelttechnik GmbH (D), and CIAT (F).

1. Ziel der Systementwicklung

Bei der Entwicklung von Produkten muß der Konstrukteur ständig Entscheidungen mit dem Ziel treffen, die gegebenen Produkt-Anforderungen zu erfüllen. Dabei sind stets Kompromisse zwischen unterschiedlichen, teilweise konträren Gesichtspunkten zu finden. Maschinenakustische Aspekte bleiben dabei, wie die Praxis zeigt, oft unbeachtet, da der Konstrukteur keinen einfachen Zugriff auf das relativ komplexe maschinenakustische Wissen hat. Die Minimierung der Geräuschentwicklung stellt in der Regel auch keine Hauptforderung dar, die eine hohe Aufmerksamkeit erfährt, sondern ist eine – wenngleich immer bedeutendere – Nebenforderung.

Dies hat zur Folge, daß eine mögliche Lärmproblema-

tik erst in späten Phasen des Konstruktionsprozesses zutage tritt. Stellt sich beispielsweise in der Prototypenphase heraus, daß ein Produkt die maschinenakustischen Anforderungen von Seiten des Gesetzgebers oder des Marktes nicht erfüllt, so sind zeit- und kostenintensive Nachbesserungen nicht zu vermeiden. Oft sind dann nur noch Isolations- und Kapselungsmaßnahmen möglich, obwohl die Wahl einer anderen Funktionsweise oder auch nur die Auslegung auf einen anderen Betriebspunkt hin wesentlich effektivere und einfachere Maßnahmen zur Geräuschminderung darstellen können.

Das Ziel des Projektes EQUIP ist die Entwicklung eines Beratungssystems, das dem Konstrukteur in allen Phasen der Konstruktion auf einfache Weise maschinenakustisches Wissen zur Verfügung stellt, vgl. /1/. Hierzu werden die Vorgehensweise des Konstrukteurs sowie die benötigten maschinenakustischen Informationen detailliert beschrieben. Darüber hinaus wird das relevante maschinenakustische Wissen gesammelt, aufbereitet und so strukturiert, daß es dem Konstrukteur durch ein rechnergestütztes System bereitgestellt werden kann. Aufbauend auf diesen Tätigkeiten kann in 1995 mit der Implementierung des Systems begonnen werden.

2. Systemanforderungen der Anwender

Zur Bestimmung der Systemanforderungen wurde 1992 eine Umfrage unter 27 europäischen Unternehmen durchgeführt, vgl. /2, 3/. Desweiteren wurden die Konstruktionsprozesse der am Projekt beteiligten Industrieunternehmen anhand eines jüngst entwickelten Produktes analysiert.

Das wissensbasierte System soll in weiten Bereichen anwendbar sein und dem Konstrukteur kontextorientierte Informationen liefern. Hierfür ist es erforderlich, daß es der Arbeitsweise des Konstrukteurs angepaßt ist und flexibel in seiner Anwendung ist. Weiterhin muß die Information, die bereitgestellt wird, in Beziehung zu der gerade durchlaufenen Konstruktionsphase stehen. In der Konzeptphase müssen also erst allgemeine, tendenzielle Hinweise gegeben werden, die

mit Fortschreiten des Konstruktionsprozesses immer detaillierter und exakter werden.

3. Konstruktion lärmarmen Produkte

3.1 Modellierung der Konstruktionsmethodik

Die Methodik zur Entwicklung lärmarmen Maschinen wurde im Rahmen des Projektes mit Hilfe der SADT-Methode beschrieben. SADT steht für "Structured Analysis and Design Technique" und ist eine in der Software-Entwicklung weit verbreitete Beschreibungssprache für Arbeitsabläufe. Sie wird benutzt, um die einzelnen Arbeitsschritte (Aktivitäten) zu beschreiben, ihre Position in der Arbeitsabfolge festzulegen und die involvierten Informationen (z.B. produktspezifischer und maschinenakustischer Art) und Ressourcen (Rechner, Datenbanken) zu definieren. In SADT-Diagrammen wird jede Aktivität durch einen Kasten dargestellt, in den der Name der Aktivität eingetragen ist. Pfeile kennzeichnen die involvierten Informationen sowie die benötigten Ressourcen. Die jeweilige Bedeutung der Pfeile wird durch ihre Anordnung am Kasten bestimmt: Eingabedaten werden links angetragen, Kontroll- und Steuergrößen oben, Ressourcen ("Mechanismen") unten und Ausgabedaten rechts; vgl. **Bild 1**.

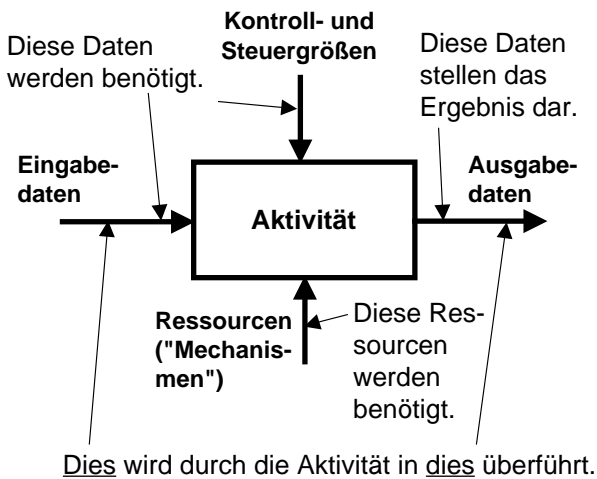


Bild 1 Beschreibung von Aktivitäten, Daten und Ressourcen in SADT-Diagrammen

Eine wichtige Eigenschaft von SADT ist, daß komplexe Abläufe in Einzelschritte zerlegt werden können, ohne daß die Diagramme unübersichtlich werden. In einem ersten Diagramm wird der generelle Ablauf beschrieben. Durch Zerlegen einzelner Aktivitäten in Unteraktivitäten, dargestellt in separaten Diagrammen, kann eine beliebig genaue Beschreibung erreicht werden, vgl. **Bild 2**.

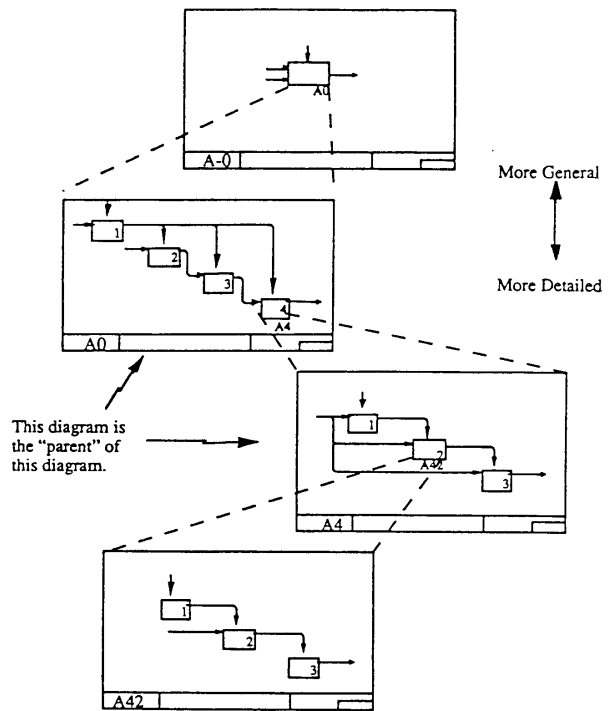


Bild 2 Zerlegen von Aktivitäten in Unteraktivitäten /4/

3.2 Beschreibung der Konstruktionsmethodik

Die im Rahmen des Projektes entwickelte Konstruktionsmethodik läßt sich anhand von **Bild 3** zusammenfassend beschreiben. Das Bild beschreibt die Konstruktion eines lärmarmen Produktes, ausgehend von der Konstruktionsaufgabe und gesteuert durch maschinenakustisches Wissen. Das Ergebnis der Konstruktionstätigkeit ist ein fertig entwickeltes lärmarmes Produkt, oder, falls die Konstruktionsaufgabe nicht lösbar ist (z.B. wegen zu starker Einschränkungen), eine Liste von Vorschlägen zur Modifikation der Konstruktionsaufgabe.

Die Methodik umfaßt fünf Hauptaktivitäten, und zwar die Klärung der Produkthanforderungen (A1), die Erarbeitung eines Produktkonzepts (A2), die Beschreibung des akustischen Verhaltens des Produktes (A3), die Analyse des akustischen Verhaltens (A4) sowie die Produktoptimierung (A5).

Die Klärung der Aufgabenstellung beinhaltet die Auswahl anzuwendender Dokumente (Gesetze, Vorschriften, Normen, Richtlinien usw.) und die Bestimmung der maschinenakustischen Produkthanforderungen. Sie basiert auf der Art des Produktes (z.B. Fahrzeug, Baumaschine) und dem angestrebten Markt.

Die Erarbeitung eines Produktkonzepts basiert auf maschinenakustischen Konstruktionsregeln, einfachen Formeln und grundlegenden Zusammenhän-

gen. Hier bietet das System dem Konstrukteur Hilfe bei der Entwicklung eines ersten Produktkonzeptes, welches in den folgenden Aktivitäten detailliert und gegebenenfalls optimiert wird.
Zur Beschreibung des akustischen Produktverhal-

tens wird ein maschinenakustisches Modell (Noise Path Model) des Produktes erstellt, das sowohl die Schallerzeugung als auch die Weiterleitung und die Abstrahlung des Schalls abbildet. Zur Modellerstellung ist die Konzentration auf die wichtigsten Quellen

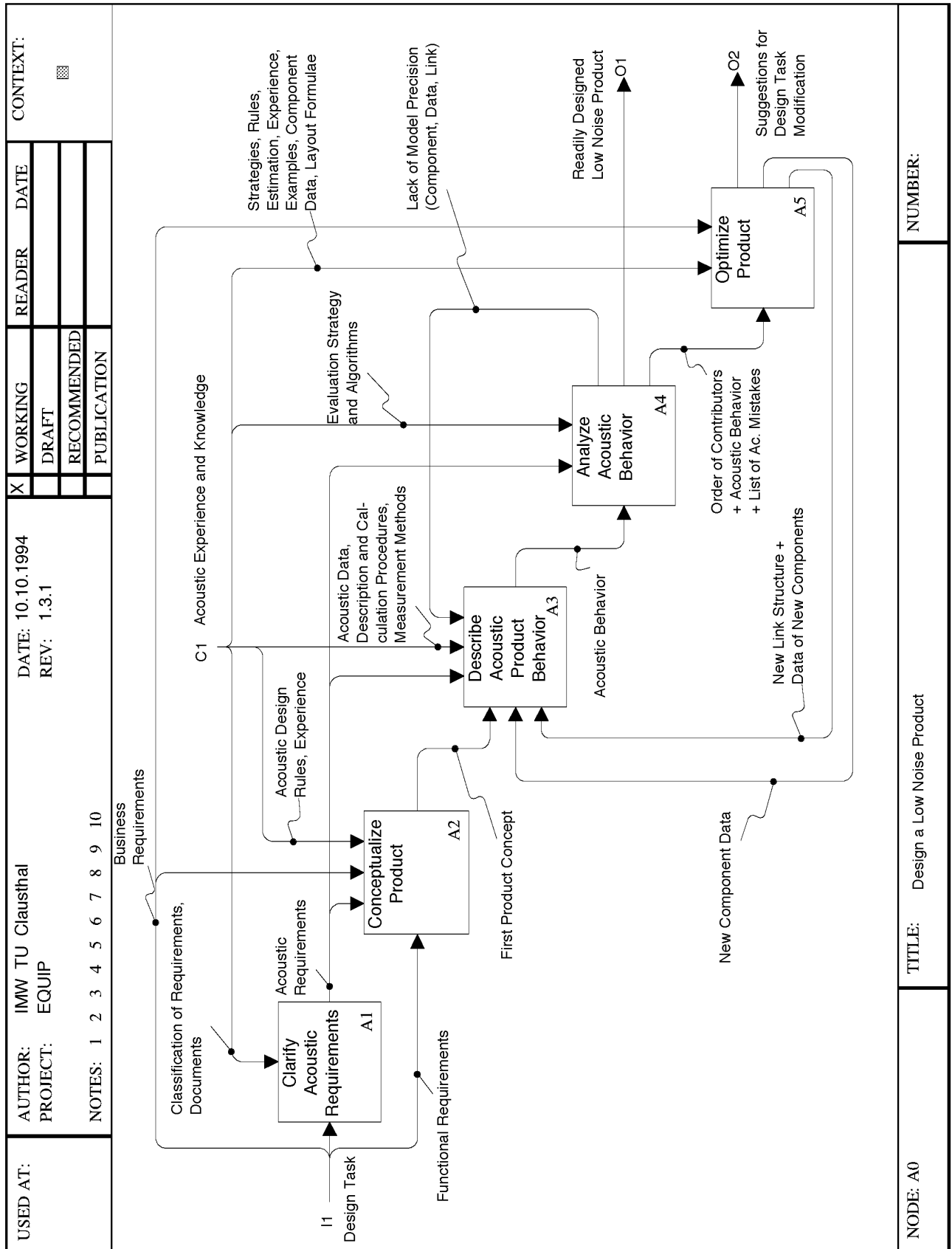


Bild 3 Methodik zur Konstruktion lärmarmen Produkte (Übersichtsschaubild des EQUIP-SADT-Modells)

ausreichend. Das Geräuschverhalten der einzelnen akustisch relevanten Komponenten kann mit Fortschreiten des Konstruktionsprozesses immer genauer beschrieben werden. Damit steigen auch Aussagekraft und Zuverlässigkeit des maschinenakustischen Modells.

Während der Analyse des akustischen Verhaltens wird das zuvor erstellte Modell ausgewertet. Erfüllt das Produkt die maschinenakustischen Anforderungen, so ist das Produkt in akustischer Hinsicht fertig konstruiert. Andernfalls wird das Modell in Hinblick auf die wichtigsten Schallquellen und mögliche maschinenakustische Konstruktionsfehler geprüft.

Bei der Produktoptimierung werden schließlich mögliche Schallminderungsmaßnahmen vom System vorgeschlagen, aus denen der Konstrukteur unter Abwägung aller Gegebenheiten (z.B. Kosten, konstruktive Randbedingungen) geeignete Maßnahmen auswählen kann. Nach der Durchführung der Optimierungsschritte wird das akustische Verhalten des geänderten Produktes beschrieben, so daß der Analyse- und Optimierungsvorgang erneut durchlaufen werden kann.

4. Informationsmodellierung

Die im SADT-Modell beschriebene Konstruktionsmethodik benötigt während der Ausführung der Aktivitäten maschinenakustische Informationen. Für diese Informationen muß ein geeignetes Informationsmodell erstellt werden, in dem Daten so abgelegt werden können, daß sie semantisch eindeutig, formal und objektorientiert beschrieben werden. Somit kann ein schneller und eindeutiger Zugriff auf die benötigten Daten gewährleistet werden.

Hierbei handelt es sich um eine Fülle von Informationen, die in einer geeigneten Art und Weise dem Konstrukteur zur Verfügung gestellt werden müssen. Es wurden Beschreibungsmethoden (Description Methods) entwickelt, die es ermöglichen, ein Objekt der realen Welt formal zu beschreiben.

4.1 Beschreibungssprache EXPRESS

Verwendet wurde die Beschreibungssprache EXPRESS (entwickelt für den Produktdatenaustausch im Rahmen von STEP, beschrieben in der internationalen Norm ISO 10303-11).

Mittels dieser Beschreibungssprache ist es möglich, mit den zur Verfügung gestellten Wörtern, Syntax und Grammatik den Charakter der Information sowie de-

ren Beziehungen untereinander zu beschreiben. EXPRESS darf hier nicht mit einer Programmiersprache verwechselt werden, sie dient lediglich dazu, das Informationsmodell für den Computer und den Menschen in einer geeigneten Art zur Verfügung zu stellen.

Neben einer Textdarstellung ist auch eine übersichtlichere graphische Darstellung (EXPRESS-G) des Modells möglich. Ein rechteckiger Rahmen repräsentiert ein Entity, welches ein Objekt oder einen Begriff aus der realen Welt widerspiegelt. Jedes Entity kann Attribute besitzen, die seine Eigenschaften beschreiben. Die Beziehung von Entities zu einem Attribut wird durch eine schmale und die zwischen Entities untereinander durch eine breite Linie repräsentiert. Der Kreis am Ende der Linie gibt die Richtung der Beziehung (Zugriff) an.

EXPRESS erfüllt die meisten objektorientierten Eigenschaften, wie Klassen- und Instanzenbildung, Generalisierung - Spezialisierung sowie die einfache und mehrfache Vererbung.

Die Vererbung bewirkt, daß ein übergeordnetes Entity den untergeordneten alle Eigenschaften (Attribute und deren Beziehungen untereinander) weitervererbt. Diese Eigenschaft erlaubt es, gemeinsame Attribute in übergeordneten Entity-Levels zu definieren.

Bild 4 zeigt ein einfaches EXPRESS-G Modell eines Autos auf einem Entity-Level. In diesem Modell wird das Entity CAR durch sechs Attribute beschrieben, wobei das Attribut MODEL_TYPE nur indirekt das Entity CAR beschreibt.

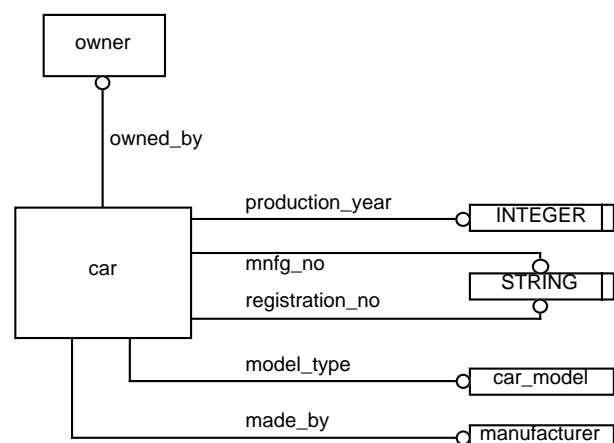


Bild 4 Teil eines Entity-Levels für ein Auto /5/

Das Attribut MODEL_TYPE wird durch das Entity CAR_MODEL repräsentiert, welches wiederum durch drei Attribute beschrieben wird, **Bild 5**.

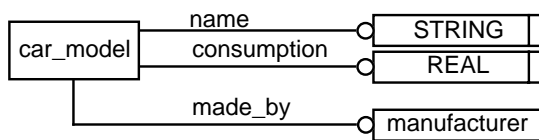


Bild 5 Teil eines Entity-Levels für CAR_MODEL /5/

4.2 Komponentenschema

Wie aus dem SADT-Modell zu erkennen ist, benötigt der Konstrukteur eine Fülle von Informationen zur Konstruktion lärmarmen Produkte. Das wichtigste Datenmodell beinhaltet alle akustisch relevanten Komponenten. Daneben sind Datenmodelle für Schallentstehungsmechanismen, maschinenakustische Produktanforderungen mit den dazugehörigen Dokumenten, maschinenakustische Konstruktionsregeln usw. bereitzustellen.

Bild 6 zeigt das Datenmodell 'Komponentenschema', in dem alle akustisch relevanten Komponenten strukturiert beschrieben sind. Im wesentlichen wurden die relevanten Komponenten durch eine Industriebefragung /2/ ermittelt.

Bei der Modellierung zeigte sich, daß eine Gruppierung der Komponenten notwendig ist, da hierdurch zum einen eine mehrfache Deklaration von Attributen vermieden wird (welches ansonsten zu einer Redundanz von Daten geführt hätte) und zum anderen das Datenmodell übersichtlicher bleibt. Aus Platzgründen wird in Bild 6 nur ein Teil des Komponentenschemas dargestellt. Das Schema besteht aus den folgenden Hauptgruppen, denen direkt oder indirekt über weitere Untergruppen alle relevanten Komponenten zugeordnet sind:

- Verdrängermaschinen (displacement_machinery)
- Strömungsmaschinen (hydrodynamic_machinery)
- Schallmindernde Elemente (acoustic_device)
- Strömungsführende Elemente (fluidic_device)
- elektrische Maschinen (electrical_machinery)
- Strukturelemente (structure)
- Drehmomentwandler (torque_converter)
- Linearantriebe (linear_actuator)
- Führungen (guidance_system)

Die Betrachtung der Komponenten ist oft für die Beschreibung der Schallentstehung nicht ausreichend, so daß neben dem Komponentenschema auch ein weiteres Schema aufgestellt werden mußte, in dem die grundlegenden Schallentstehungsmechanismen beschrieben sind. Somit hat der Konstrukteur die

Möglichkeit, seine Maschine oder Anlage aus Komponenten und Schallentstehungsmechanismen aufzubauen, z.B. zur Beschreibung verfahrenstechnischer Anlagen. Ferner kann so jede Komponente in ihre einzelnen Mechanismen zerlegt werden, welches wiederum eine genauere Vorhersage über die Art des Geräusches (Spektrum) und somit eine exaktere Berechnung des akustischen Produktverhaltens ermöglicht. Zu diesem Zweck wird von den jeweiligen Komponenten auf die zugehörigen Schallentstehungsmechanismen verwiesen (im Bild 6 nicht dargestellt).

Das Ergebnis der Informationsmodellierung wird eine Anzahl untereinander verflochtener Schemata sein, auf die das Beratungssystem automatisch zugreifen kann, um den Konstrukteur bei seiner Aufgabe zu unterstützen.

5. Zusammenfassung

Im Rahmen des BRITE-EURAM-Projektes EQUIP wird ein wissensbasiertes System zur Entwicklung lärmarmen Maschinen entwickelt. An der Entwicklung sind Partner aus der Industrie als spätere Nutzer maßgeblich beteiligt.

Im Jahr 1994 wurde eine Vorgehensweise zur Entwicklung lärmarmen Produkte erarbeitet und detailliert beschrieben. Darüberhinaus wurde maschinenakustisches Wissen gesammelt und derart strukturiert, daß es dem Konstrukteur über ein rechnergestütztes System kontextorientiert zur Verfügung gestellt werden kann. In 1995 wird die Informationsstrukturierung abgeschlossen sein, so daß mit der Implementierung begonnen werden kann. Die Fertigstellung des Systems ist gegen Ende 1996 geplant.

Literatur

- /1/ Dietz, P.; Engel, K.; Haje, D.: Institutsmitteilung Nr. 17, IMW Clausthal 1992
- /2/ Dietz, P.; Haje, D.; Gummersbach, F.: Institutsmitteilung Nr. 18, IMW Clausthal 1993
- /3/ Haje, D.; Gummersbach, F.; Schmidt, A.: Inquiry Results about Low Noise Design Clausthal, März 94, unveröffentlicht
- /4/ Specifications for INTEGRATION DEFINITION FOR FUNCTION MODELLING (IDEF0) Federal Information Processing System, 1992
- /5/ Schenk, D.; Wilson, P.: Information Modeling the EXPRESS Way Oxford University Press, 1994

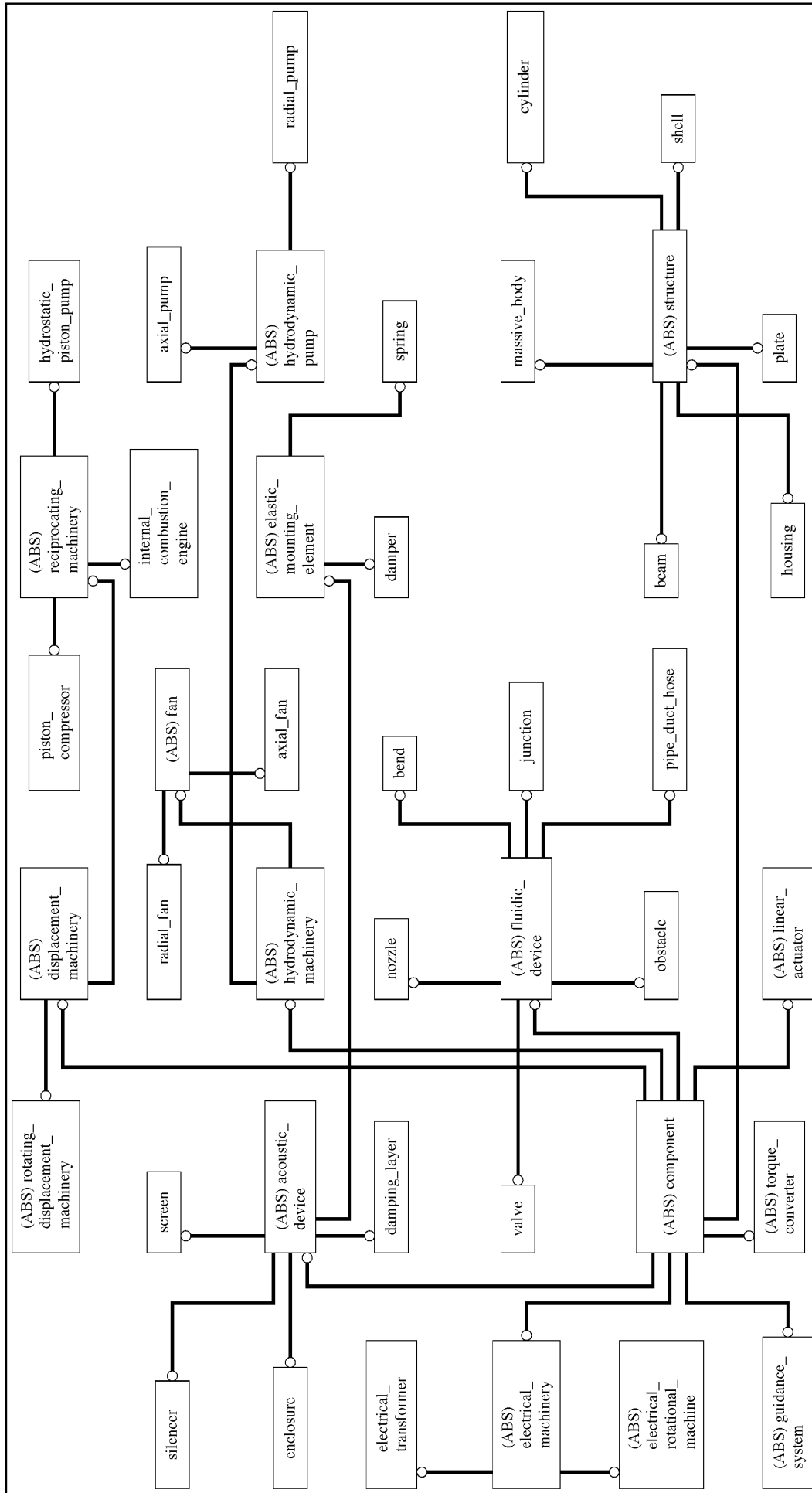


Bild 6 Komponentenschema

PICASSO

Eine wissensbasierte Konstruktionsumgebung

Heinen, F; Kalwa, R.

Seit Januar '93 läuft am Institut für Maschinenwesen (IMW) das Brite-EuRam Projekt PICASSO (Practical and Intelligent CAD for Assembly Objects). Gegenstand dieses EG-Industrieprojektes ist die Entwicklung eines sogenannten Designer Support (DS)-Systems, welches den Konstrukteur Schritt für Schritt durch die Konstruktion leitet und notwendige Informationen hinsichtlich Toleranzen, Baugruppen, Fertigungswerkzeugen usw. zur Verfügung stellt. Zunächst wird dieses System an dem schwierigen Fall der Kunststoffspritzguß- und Umformwerkzeugkonstruktion Anwendung finden, um dann später auf weitere Konstruktionsprozesse übertragen zu werden. Der vorliegende Bericht stellt den derzeitigen Stand und die weitere Vorgehensweise des Projektes dar.

The Institute for Mechanical Engineering (IMW) has, since January '93, been engaged in the Brite-EuRam Project PICASSO (Practical and Intelligent CAD for Assembly Objects). The focus of this EU-Industry-Project is development of a design methodology and a supporting CAD tool (Designer Support System / DSS) that leads the Designer component by component through the design process and makes available to the Designer information on tolerances, machine components, process tools and more. This system will, at first, find application in the design of Plastic Spray Molding and Press Tools and then later in other design processes.

The present and future course of this project is described here.

1 Das Konsortium

Im Projekt arbeitet ein Konsortium aus fünf europäischen Partnern gemeinsam an der gestellten Problematik. Involviert sind das Softwareunternehmen DELCAM International aus Birmingham/Großbritannien, das Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, der Kunststoffspritzgußformenhersteller Marés S.A. aus Barcelona/Spanien, das Softwareunternehmen Technocad Ltd. aus Sligo/Irland und das Department of Mechanical Engineering der Universität Liver-

pool/Großbritannien.

Die Verteilung der Aufgaben gliedert sich wie folgt: Die Firma DELCAM International hat im Rahmen des Projektes die Funktion der Projektleitung übernommen. Das Unternehmen ist eines der ersten Softwarehäuser, welches dem Konstrukteur Programme zur Modellierung von komplexen dreidimensionalen Freiformflächen zur Verfügung stellt und gleichzeitig die Generierung von CNC-Daten zwecks Fertigung derselben ermöglicht. Das heutige Hauptprodukt ist das CAD/CAM-System DUCT 5, welches im wesentlichen in der Kunststoffspritzguß- und Umformwerkzeugherstellung seine Anwendung findet. DELCAM International wird das PICASSO-System in DUCT 5 implementieren und den Forderungen des Konsortiums anpassen.

Das Institut für Maschinenwesen bringt sein Wissen in der Modellierung von Produktmodellen und der Entwicklung von DS-Systemen ein. Desweiteren wird ein STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) konformes Softwaremodul zur Festlegung funktionsorientierter Toleranzen beim Zusammenbau von Baugruppen (Assemblies) entwickelt, welches in das Softwareprodukt DUCT 5 der Firma DELCAM International integriert wird.

Die Firma Marés S.A. ist der Industriepartner dieses Projektes. Das Unternehmen entwickelt und baut Kunststoffspritzgußformen für bevorzugt große und komplexe Bauteile wie bspw. PKW-Stoßfänger, PKW-Armaturenbretter, Getränkekästen oder Lau- genbehälter für Waschmaschinen. Marés S.A. ist der typische Benutzer des zukünftigen PICASSO-Systems und liefert daher das zur Entwicklung einer solchen Software notwendige Experten-Know-How aus dem Bereich der Kunststoffspritzgußformenherstellung.

Das Softwareunternehmen Technocad Ltd. hat Consulting-Funktion in diesem Projekt. Die Firma hat bereits ein in der Funktionalität zu PICASSO ähnliches Softwareprodukt auf dem Markt namens CAMold. Allerdings gibt diese Software dem Konstrukteur keinerlei Hinweise zur Toleranzfestlegung und ist nur für

kleinere und sehr einfache Kunststoffspritzgußformen wie bspw. Cremedosen, Telefonapparatgehäuse oder Tischboilerverkleidungen ausgelegt. Das Department of Mecanical Engineering der Universität Liverpool bringt seine Erfahrungen in bezug auf Umformwerkzeuge in das Projekt ein. Das Institut arbeitet auf diesem Gebiet bereits seit einigen Jahren eng mit Werkzeugherstellern zusammen. Desweiteren entwickelt die University of Liverpool Regeln zur Beschreibung von Baugruppen (Assemblies) und richtet hierauf basierend Bibliotheken ein.

2 Das PICASSO-System

Grundlegend gibt es im PICASSO-System (**Bild 2.1**) zwei Arten von Benutzern. Es gibt den "Super User" und den "Normal User". Der "Super User" ist für die Anpassung des Systems an das entsprechende Unternehmen verantwortlich. Er muß einmalig die Kataloge und Datenbanken des Systems füllen bzw. ergänzen und Restriktionen des Betriebs in das System eingeben. Der "Normal User" ist der Konstrukteur. Er kann nicht wie der "Super User" Einstellungen des Systems vornehmen. Ihm steht das System ausschließlich zur Nutzung bereit.

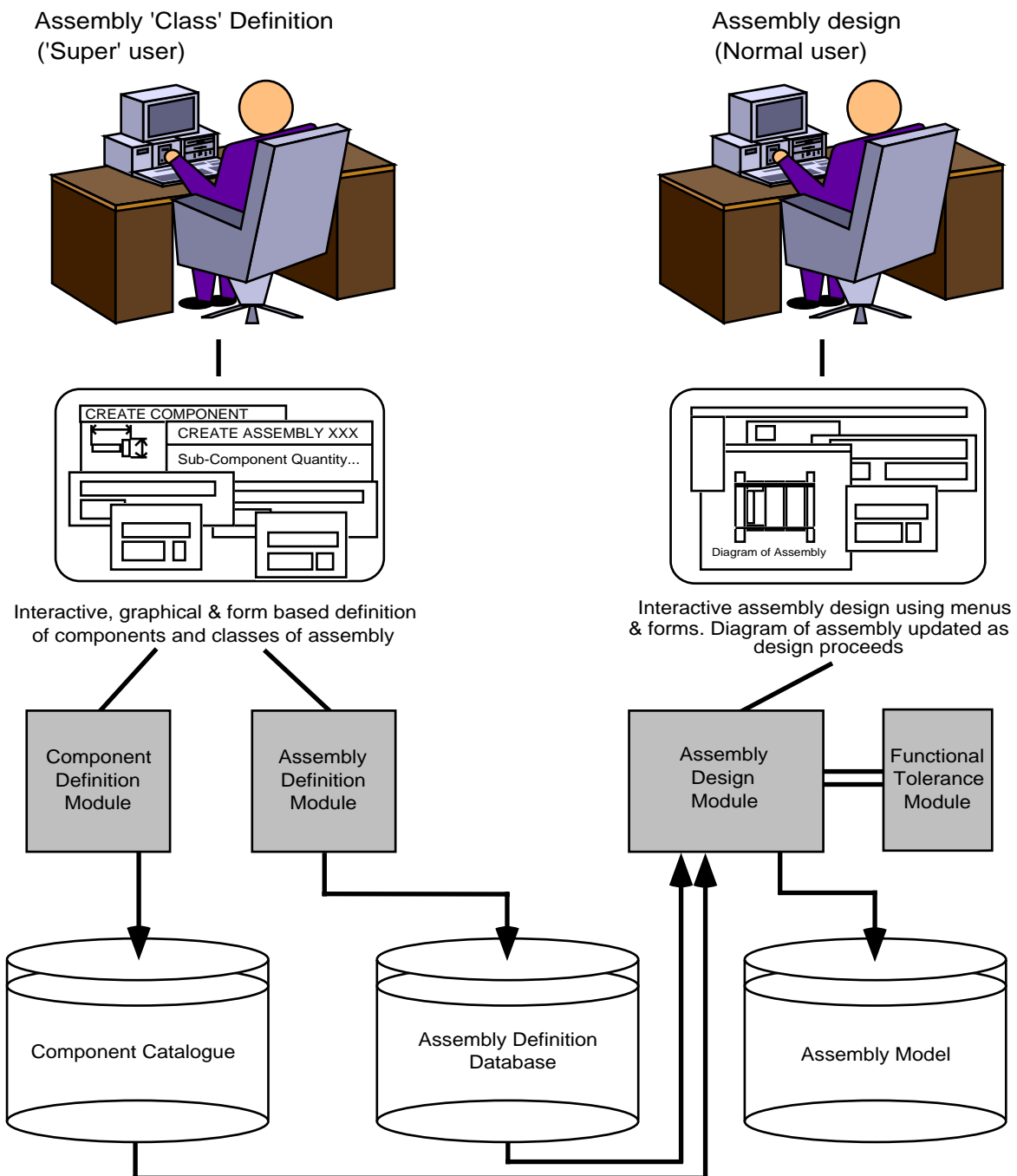


Bild 2.1 Systemkonzept des PICASSO-Systems

Das gesamte PICASSO-System besteht aus vier Modulen, dem "Component Definition Module", dem "Assembly Definition Module", dem "Assembly Design Module" und dem "Functional Tolerance Module". Die beiden zuerst genannten Module müssen durch den "Super User" definiert werden. Das "Component Definition Module" erlaubt die Verwendung bzw. Erstellung eines auf das Unternehmen angepassten Bauteilkatalogs mittels Gruppenhierarchien. Das "Assembly Definition Module" läßt die Erstellung einer Datenbank von Baugruppentypen (Classes) einschließlich der sie beschreibenden Regeln zu. Die Regeln legen fest, auf welche Weise Bauteile zueinander in Beziehung stehen können. Der "Normal User"/Konstrukteur greift auf diese beiden Module mittels des "Assembly Design Module" zurück. Es ist das eigentliche Konstruktionsmodul, und in ihm wird die aktuelle Kunststoffspritzgußform modelliert. Unterstützt wird der Konstruktionsprozeß weiterhin durch das "Functional Tolerance Module", welches funktionsbasiert notwendige Toleranzen vorschlägt und Toleranzen mehrerer Bauteile sinnvoll unter selbigen aufteilt.

Die Wirkungsweise des PICASSO-Systems soll im folgenden anhand des Beispiels einer Kunststoffspritzgußform für einen PKW-Stoßfänger genauer erläutert werden:

Im ersten Schritt wählt der Konstrukteur den Baugruppentyp (class) Stoßfänger aus. Das System befragt ihn zu den Abmessungen des Stoßfängers und legt hierauf basierend die Größe der Kunststoffspritzgußform fest. PICASSO beachtet in diesem Schritt die Normungsreihe für Kunststoffspritzgußformen, die sich aufgrund der Werkzeughalterungen an den Pressen und aufgrund der Größe der Halbzeuge ergeben. Gleichzeitig berücksichtigt PICASSO die hieraus entstehenden Restriktionen. Sämtliche Bauteile bzw. Baugruppen, die abmessungstechnisch bzw. von ihrer Funktion her für den gewählten Baugruppentyp nicht sinnvoll sind, werden in weiteren Konstruktionsgängen dem Konstrukteur nicht mehr zur Verfügung gestellt. Hierdurch können Fehler vermieden und die Übersichtlichkeit verbessert werden. Sollen bspw. die Führungssäulen für den Baugruppentyp Stoßfänger gewählt werden, so stellt das System nicht den gesamten Führungssäulenkatalog dar, sondern gibt nur eine kleine Auswahl von Säulen, die in ihrer Länge, ihrer Funktion, ihrer Verschleißfestigkeit usw. dem geforderten Baugruppentyp (class) entsprechen. Diese Arbeitsweise des Systems, nur tatsächlich verwend-

bare Bauteile bzw. Baugruppen zur Verfügung zu stellen, setzt sich bis zur unteren Ebene von Kleinteilen wie Schrauben, Ringe, Buchsen usw. fort. Ein weiterer Vorteil des PICASSO-Systems sind die einbeschriebenen Positionierungs- und Orientierungsregeln für Bauteile, d.h. werden bspw. passende Führungssäulen für eine Kunststoffspritzgußform ausgewählt, so weiß das System automatisch wo diese koordinatenmäßig zu positionieren sind und welche Orientierung die Säulen haben (-> Kragende einer Führungssäule immer in der Klemmplatte).

Während dieses gesamten Prozesses liefert das "Functional Tolerance Module" seine Unterstützung hinsichtlich der Toleranzauswahl. Es soll dem Problem der "Angsttoleranzen" (zu enge Toleranz gewählt, wo weitere zulässig) entgegenwirken und gleichzeitig die mögliche Toleranzauswahl einschränken. Hierdurch können erhebliche Kosten vermieden werden.

3 Das "Functional Tolerance Module"

Wie bereits erläutert sollen die einzelnen Module gegen Ende des Projektes in DUCT 5 integriert werden. Zu diesem Zweck wird das "Functional Tolerance Module" derzeit in der Programmiersprache C++ nach dem DELCAM International Programmierstandard erstellt. Die notwendige Funktionalität dieses Moduls ist durch den Endanwender Marés S.A. definiert worden (**Bild 3.1**). Folgende Hauptfunktionen sollen erfüllt sein:

- Der Konstrukteur soll mittels dieses Moduls die Toleranzen rein funktionsbasiert vergeben, d.h. das System gibt eine Liste von Funktionen, aus denen der Konstrukteur die entsprechende auswählt. Dann fragt das System nach den Abmessungen des Toleranzfalls und berechnet je nach Voreinstellungen (Werkstoff, Temperatur) die korrekte Toleranz.
- Der "Super User" soll die Anzahl der möglichen Toleranzen für eine Funktion einschränken können. Dies ist rein wirtschaftlich zu sehen, da hierdurch Werkzeuge in der Fertigung eingespart werden können.
- Der "Super User" soll eigene Funktionen definieren können. Zwar wird das System bereits mit sämtlichen bekannten Funktionen ausgeliefert, bietet aber auf diese Weise die Möglichkeit im Bedarfsfall eigene Funktionen anzufügen.
- Zukaufteile, die bereits Toleranzen durch Lieferanten gegeben haben und die mit zu fertigenden Bau-

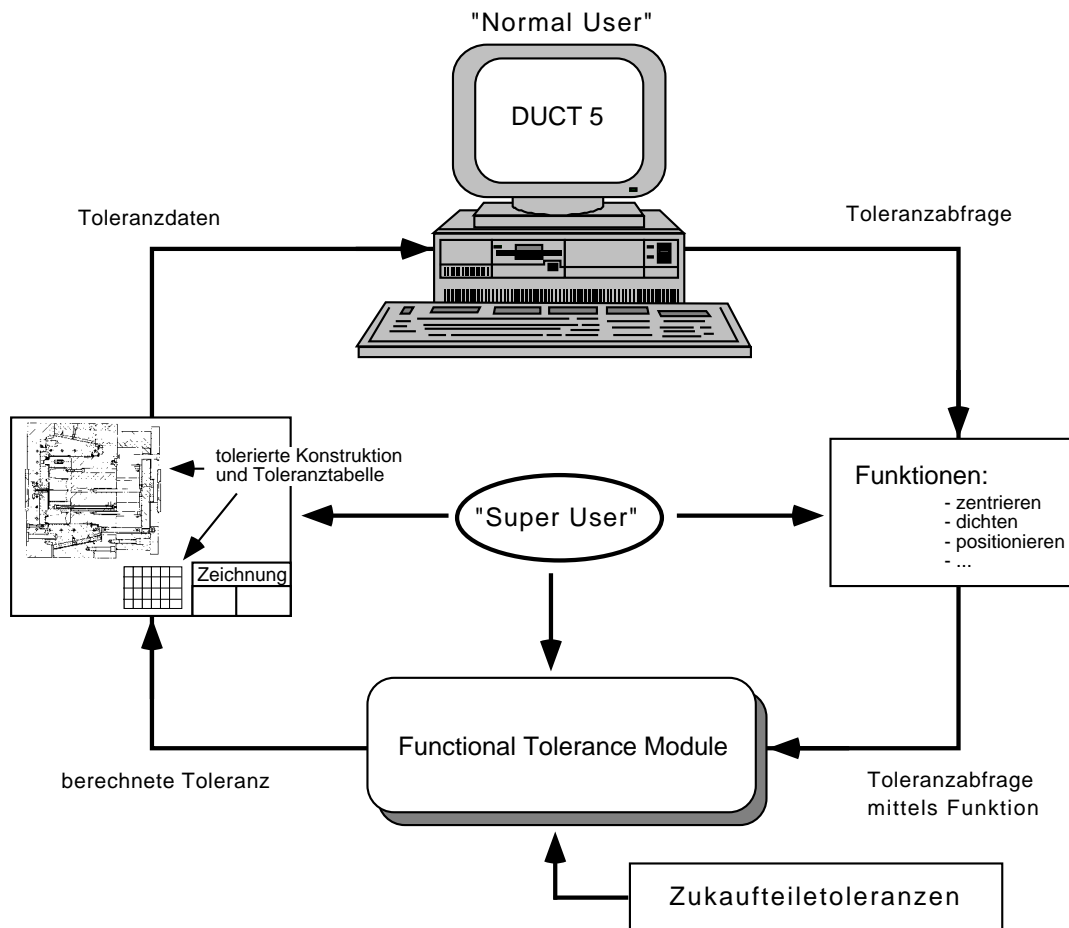


Bild 3.1 Arbeitsweise des "Functional Tolerance Module"

teilen bestimmte Toleranzfunktionen erfüllen sollen, müssen durch das System in den Toleranzberechnungen berücksichtigt werden.

- Zwecks einfacherer Prüfbarkeit sollen sämtliche Toleranzen einer Konstruktion gesondert in einer Tabelle nahe dem Schriftfeld einer Zeichnung aufgeführt werden und falls erforderlich (DIN-ISO 1101) in Plus-Minus-Toleranzen übersetzt werden.

Dies sind die Hauptfunktionen des "Functional Tolerance Module". Zusätzlich gibt es noch eine Reihe von Nebenfunktionen, die dem Konstrukteur die Arbeit mit diesem System erleichtern.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklungsarbeiten am PICASSO-System haben gezeigt, daß es sinnvoll ist, dem Konstrukteur DS-Systeme zur Unterstützung während des Konstruktionsprozesses an die Hand zu geben. Er ist mit dieser Art von Werkzeug in der Lage, Entscheidungen besser und schneller zu treffen. Gerade Konstruktionen von Kunststoffspritzgußformen oder Umformwerkzeugen, wie sie in diesem Projekt betrachtet werden,

sind für die Anwendung von DS-Systemen wegen ihres baukastenartigen Aufbaus prädestiniert. Desweiteren wird durch solche Systeme die Möglichkeit, Fehler zu machen, stark reduziert. Allgemein kann also gesagt werden, daß DS-Systeme trotz ihrer einmaligen Anpassung an das Betriebsmittelmodell eines Unternehmens und Ihrer stetig notwendigen Wartung zur Kostensenkung beitragen.

Das "Functional Tolerance Module" des PICASSO-Systems soll in der Zukunft weiter optimiert und ausgebaut werden. Es ist geplant die Berücksichtigung der Prozeßfähigkeit von Werkzeugmaschinen einzubeziehen.

Literatur

- /1/ Watson, Stuart: PICASSO-Broschüre, Birmingham 1994
- /2/ PICASSO Deliverable D 14-1 - Tolerance Determination Methodology, IMW, Clausthal 1993
- /3/ PICASSO Meeting Minutes - July '94, Liverpool 20.07.1994

Anforderungen: Erfassung, Aufbereitung und Bereitstellung für den Produktentwicklungsprozeß

Kruse, P.J.

Für das heutige, sehr stark vom Qualitätsgedanken bestimmte Verhältnis zwischen Hersteller und Kunde nehmen die Forderungen an ein zu entwickelndes Produkt eine zentrale Bedeutung ein. Ihre vollständige Erfassung, ihre problemgerechte Aufbereitung sowie ihre aufgabenspezifische Bereitstellung sind eine wichtige Voraussetzung für eine möglichst reibungslose Erstellung des Produktes und seine gute Akzeptanz durch den Kunden.

Examining the relationship between supplier and customer as it exists today, the heavy influence of quality demands becomes obvious. This imposes additional weight on the treatment of the requirements and specifications addressed towards a product. Their complete aquisition, their problem-adequate adaption and their task-specific supply are very important for a smooth development of the product and, furthermore, for a good acceptance by the customer.

1. Das Problem

Die Herstellung, Nutzung und Rückführung eines Produktes, sei es ein Kraftfahrzeug, eine Raumfähre, ein Dosenöffner oder ein Getriebe, wird durch die heute mögliche Technologie mehr oder minder beherrscht. Es gibt eine Vielzahl von Anbietern derartiger und anderer Systeme unterschiedlicher Komplexität. Das Know-How unter den Anbietern ist ähnlich, viele technische Zusammenhänge sind, durch Lehre und Forschung bedingt, inzwischen allgemein bekannt.

Trotzdem gibt es große Unterschiede in Qualität und Kundenakzeptanz dieser Systeme.

Ihre Qualität und Akzeptanz wird von vielen Einflußfaktoren bestimmt. Sie können aus folgenden Bereichen stammen:

- Dem Stand der Technik in dem betrachteten Gebiet;
- Den Erfordernissen oder dem Geschmack des

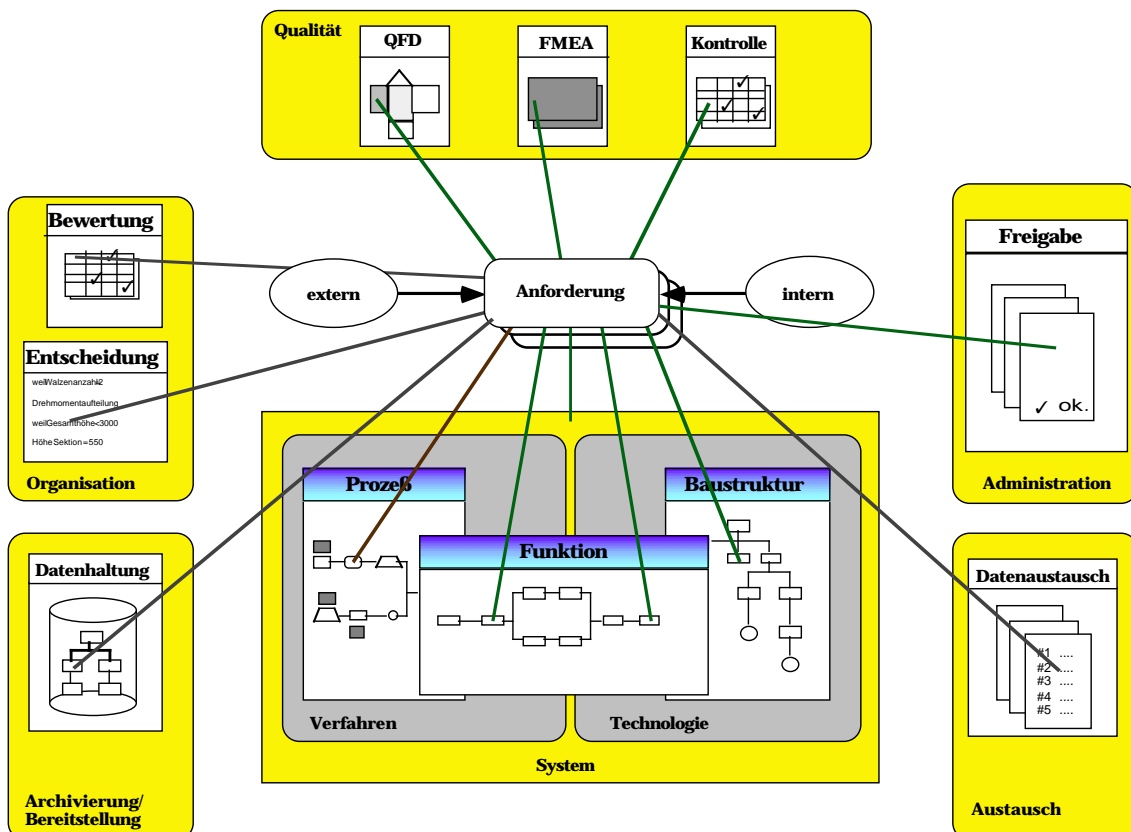


Bild 1.1: Mögliche Ziele von Anforderungen im Produktentwicklungsprozeß

- Kunden;
- den Fähigkeiten und Zielen des Unternehmens und seiner Auftragnehmer
 - den auf das System anzuwendenden Gesetzen und Richtlinien.

Aus dieser Aufzählung wird sehr schnell deutlich, wie groß die Anzahl und Vielfalt der Forderungen an ein Produkt sein kann. **Bild 1.1** zeigt die

möglichen Ziele von Forderungen im Produktentwicklungsprozeß. Um diese Forderungen nun umzusetzen und die durch sie spezifizierten Merkmale im Produkt auch wiederzufinden, ist eine vollständige Erfassung, eine aufgabengerechte Umsetzung und eine effiziente Bereitstellung aller Forderungen zwingend erforderlich.

Aus der Sicht des Qualitätsmanagements steht die Produktqualität im Mittelpunkt des Interesses. Sie bedingt eine gute Entwicklungs- und Konstruktionsqualität. Diese Bedingung kann jedoch nur erreicht werden, wenn eine hohe Informationsqualität in den Entwicklungs- und Konstruktionsteams vorhanden ist. Ein Garant der Informationsqualität ist nun die Bereitstellung einer effizienten Forderungsstruktur für die unterschiedlichen Aufgabenstellungen.

2. Heutige Anforderungsbehandlung

Das Standardhilfsmittel zur Behandlung von Produktforderungen ist die Anforderungsliste, wie sie z.B. in /1/, /2/ und weiteren Quellen beschrieben ist. Ihr Weg ins Unternehmen geht über den in **Bild 1.2** dargestellten Formularzyklus Lastenheft-Pflichtenheft-Anforderungsliste. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Erfassung der Forderungen vom Kunden, Forderungen aus den Bereichen Unternehmen und Umgebung werden nur am Rande mit erfaßt.

Zum Füllen der Liste wurden bereits Fragenkataloge und -listen entwickelt, die durch viele Assoziationshilfen alle erforderlichen Soll-Eigenschaften des Systems ermitteln sollten (z.B. /2/, /3/). Nur für die weitere Verarbeitung der Forderungen in einer Prozeßkette der Produktentwicklung ist keine methodische Unterstützung vorhanden. Die Pflege des Forderungssatzes sowie die Bereitstellung der richtigen Forderung zum richtigen Zeitpunkt an den

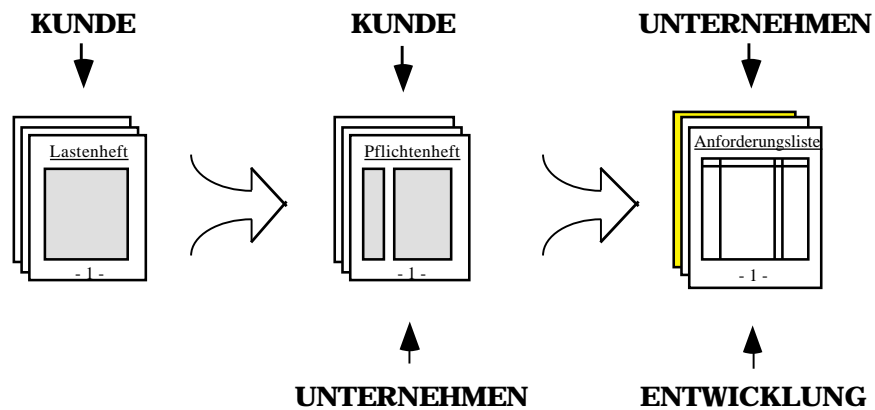


Bild 1.2: Der Weg einer Anforderung in die Konstruktion

richtigen Bearbeiter bleibt der Maßgabe des Unternehmens selbst überlassen, wird jedoch häufig vernachlässigt.

Dies wiegt umso schwerer, als im gesamten Produktlebenszyklus die Anforderung das hauptsächlichste Kommunikationsmittel bei Änderungen oder Erweiterungen der Produkteigenschaften ist. Durch wenige spezifizierte Anforderungen und dadurch fehlende Informationen kommt es von Phase zu Phase in der Prozeßkette zu Fehlinterpretationen der bestehenden Forderungen und unzutreffende Erweiterung aus Sicht der Bearbeiter. Das Ergebnis erfüllt in keiner Weise die Forderung des Kunden, und ist deshalb auch qualitativ minderwertig.

3. Die Bedeutung von Anforderungen in technischen Aufgabenstellungen

Die Erfassung, Aufbereitung und Bereitstellung zur Nutzung von Anforderungen nimmt für eine effektive Produktentwicklung eine herausragende Bedeutung ein. Ohne die Definition eines Anforderungssatzes für eine technischen Aufgabenstellung ist die erfolgreiche Lösung des Problems mehr als fraglich. Diese Anforderungen müssen mit einfachen, zeitoptimalen und dennoch effizienten Methoden von allen am Projekt beteiligten Partnern ermittelt werden.

Die Tätigkeit der *Erfassung* von Anforderungen ist während der Projektbearbeitungszeit niemals abgeschlossen, sondern muß kontinuierlich, je nach Projektstadium mit mehr oder weniger Aufwand, ihre Fortsetzung finden, um für das bestehende Projekt als Referenz, Entscheidungshilfe und Entscheidungsdokumentation zu dienen, sowie für parallele und folgende Projekte Richtlinien zu definieren und Lösungsvorschläge zur Verfügung zu stellen.

Die Anforderungen von den Projektpartnern und der

externen Einflußgrößen des Projektes werden durch eine *Aufbereitung* dann nutzbar gemacht. Der größte Teil der Forderungen ist in der Form, wie er in das Projekt hineingetragen wird, nur bedingt zu nutzen. Ein Projektteam mit methodischer Unterstützung muß die Aufbereitung durchführen, um einen Entwicklungsablauf zielorientiert durchführen zu können. Die Aktivitäten für eine solche Aufbereitung gibt der Entwicklungskontext ebenso vor wie die durch ihn bestimmten Methodenelemente.

Ein dritter und entscheidender Punkt ist die *Bereitstellung* der Forderungen für die Phasen der Produktentstehung. Jeder Mitarbeiter muß jederzeit Zugriff auf die ihn betreffenden Forderungen haben, damit seine Leistungsfähigkeit und Kreativität in die richtigen Bahnen gelenkt werden. Dazu muß er alle mit diesen Forderungen in Beziehung stehenden Anforderungen im Zugriff haben, um Wechselwirkungen zwischen Produktelementen frühzeitig festzustellen und zu bearbeiten. Diese logistische Herausforderung wird durch die in der Produktentwicklung vorherrschende Teamarbeit noch erhöht, da hier zumeist mehrere Mitarbeiter an dem gleichen Problem arbeiten und die Teilaufgabenstellung des einzelnen Mitarbeiters aus einer passend aufbereiteten Anforderungssammlung erzeugt werden muß.

Bewertungen von Teillösungen müssen über entsprechend verfügbare Anforderungen einfach und, je nach Detailgrad der Lösung, entsprechend zügig durchführbar sein.

Man sieht deutlich, daß eine Erfüllung dieser Forderungen durch die heute übliche Anforderungssammlung in Form einer vielfach unstrukturierten Liste nicht erwartet werden kann, nichtsdestoweniger jedoch gerade in ihrer Erfüllung ein beachtliches und häufig vernachlässigtes Potential für rationelle, zielgerichtete Problemlösung in allen Bereichen liegt.

Bild 1.1 zeigt die Eigenschaftsklassen eines Systems, an die Anforderungen gerichtet sein sollten. Die Bereiche unterteilen sich in:

- technische Merkmale: Merkmale der Produkt- oder Prozeßstrukturierung wie Anzahl der Bauteile, Montagevorrangfolge, Durchflußmenge oder Viskosität;
- administrative Merkmale: Festlegung z.B. von Terminen und Verantwortlichkeiten;
- organisatorische Merkmale: Bestimmung von

Arbeitsabläufen z.B. in Konstruktion oder Fertigung.

- qualitative Merkmale: Zuweisung von Methoden zur präventiven und prüfenden Qualitätserzeugung und -sicherung.
- datentechnische Merkmale: Festlegung des elektronischen Informationsaustausches zwischen den Teambereichen sowie externen Mitarbeitern (Zulieferern usw.); Festlegung der Archivierungsformate der anfallenden Daten.

Die geforderten Merkmale dieser Eigenschaftsklassen müssen über die im folgenden beschriebenen Aktivitäten so behandelt werden, daß sie in den Entwicklungsprozessen umsetzbar sind.

4. Die Erfassung von Anforderungen

Die immer vorhandenen Vorstellungen der beteiligten Partner an einer Entwicklung zu kennen, ist für den Erfolg der Projektbearbeitung von sehr großem Wert, weil daran das System spätestens in der Endabnahme gemessen wird. Es ist deshalb aus Sicht des Auftragnehmers wichtig, folgende aus verschiedenen Sichten erzeugte Fragestellungen abzuklären:

- *Auftraggeber (Markt, Kunde)*
 - Welches sind die Forderungen des Kunden an dieses System ?
 - Wie gewichtet er seine Forderungen (z.B.: Was ist unbedingt erforderlich, was wichtig; was ist Wunsch) ?
 - Aus welchem Erlebnishorizont stellt der Kunde seine Anforderungen ? (Was ist seine Sicht auf das System (Einkauf, Technische Leitung, Detailbearbeiter); welche vergleichbaren Systeme der Konkurrenz kennt er; wie ist die Stellung des Fordernden im Kundenunternehmen; usw.)
 - Welche Randbedingungen für das System muß der Kunde beachten und daher auf deren Einhaltung bestehen ?
 - Welches sind weitere Marktanforderungen, die eine gute Positionierung des Systems am Markt sicherstellen können ?
- *Eigenes Unternehmen (Unternehmensführung, Abteilungen, Mitarbeiter)*
 - Paßt das zu entwickelnde System in die mittel- und langfristige Zielplanung des Unternehmens ?
 - Welche Möglichkeiten zur Realisierung der

Kundenforderungen sind vorhanden ? (Was können wir technisch und organisatorisch ?) ;

- Welche Randbedingungen sind immer zu beachten (z.B. kein CAD; kein Fertigungszentrum; usw.) ;
- Welche Bedingungen sind speziell oder temporär zu beachten (z.B. Urlaubszeit; keine Erfahrung mit Systemkomponenten; zur Zeit hohe Auslastung; Arbeitsraum der Fräse xy begrenzt; usw.);
- Welche Erfahrungen hat das Unternehmen mit dem Kunden bereits gemacht ? (Wie wichtig ist dieser Kunde ?)
- Welche Parameter haben die Systeme der Wettbewerber ? Wie sind diese Parameter im Vergleich mit der eigenen Entwicklung (oder der Zielrichtung einer solchen) zu bewerten ?

- *Umgebung*

- Welche Normen, Richtlinien und Gesetze finden bei diesem Auftrag Anwendung ? (z.B. Technische Regelwerke, Umweltrichtlinien, Rücknahmeverordnungen)

Aus den Fragestellungen ergeben sich folgende Ansprüche an eine Erfassung von Anforderungen:

Identifizierung

Jede Forderung in einer Anforderungsstruktur muß eindeutig identifizierbar sein. Diese Identifizierung wird bei der Erstellung einer Anforderung festgelegt und darf sich während der Bearbeitung des Projektes nicht ändern, um dauerhafte Bezüge auf diese Forderung zu ermöglichen.

Terminologie

Die Aufnahme der Anforderungen muß in der "Sprache des Fordernden" erfolgen können. Dies kann in günstigen Fällen die Fachterminologie der Systemumgebung sein, deren Umsetzung in Produktmerkmale einfach zu bewerkstelligen ist; in anderen Fällen müssen jedoch auch unscharfe Forderungen wie "schön", "einfach" usw. erfaßbar sein.

Beziehungen

Es müssen bereits zum Zeitpunkt der Erfassung einer Forderung verschiedene Beziehungsarten definierbar sein. Diese Beziehungen werden jedoch zu diesem Zeitpunkt nur festgestellt und nicht erzeugt.

Bild 4.1 zeigt die möglichen Beziehungen in einer Forderungsstruktur.

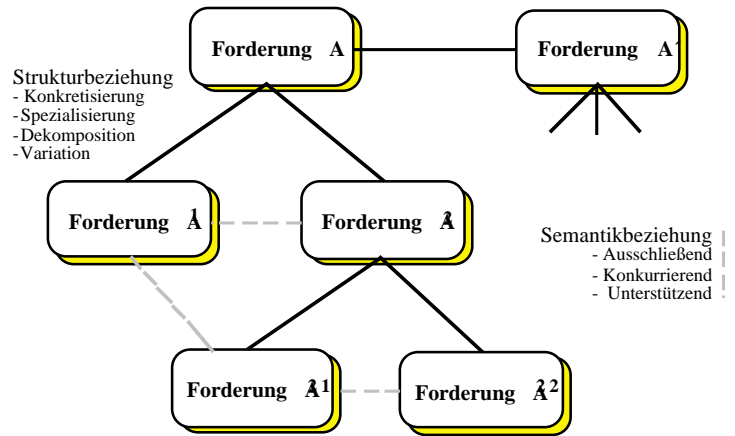


Bild 4.1: Mögliche Beziehungen zwischen Forderungen

Bezug

Die "Kundenanforderungen" können nicht 'im leeren Raum' formuliert werden, sondern müssen direkt an eine abstrakte oder konkrete Eigenschaft des Gesamtsystems, einer Systemkomponente oder eines Systemaspektes in einer bestimmten Sicht gerichtet werden. Ist, wie bei einer Neukonstruktion üblich, das bezogene Forderungsobjekt, nämlich das Bauteil oder die Baugruppe, noch nicht konzipiert, so muß ein entsprechendes Entwicklungsobjekt definiert werden, das dann eine dieser Forderung entsprechende Eigenschaft erhält. Dieses Entwicklungsobjekt muß nicht zwingend eine fertigbare Einheit beschreiben, sondern kann auch z.B. einen logischen Raum definieren. Damit wird dem Kunden die Auswirkung seiner Forderung deutlich vor Augen geführt und eine mögliche Unsicherheit bei der Forderungsdefinition erkannt und hinterfragbar.

Sicht

Für die Anforderung sollte festgehalten werden, aus welcher Sicht auf das Entwicklungsobjekt die Definition der Forderung erfolgte. Die Sichten können z.B. auf Funktionen, Lösungselemente oder Gestalteeigenschaften gerichtet sein. Die Sichten fassen durch Anforderungen definierte Eigenschaften zusammen und erlauben dadurch eine Filterung der Forderungen z.B. nach Unternehmensbereichen.

Wertigkeit

Jede vom Kunden, dem Unternehmen sowie der Umwelt definierte Forderung muß möglichst vom Fordernden sogleich bewertet werden, um sehr wichtige und weniger wichtige Erfüllungskriterien zu identifizieren.

Aufwand

Der Aufwand zur Erfassung der Anforderungen muß aus Sicht des Kunden dem System entsprechen. Zum Beispiel wäre für die Entwicklung und Produktion einer komplexen verfahrenstechnischen Anlage ein höherer Aufwand zur Anforderungsermittlung vertretbar und erforderlich als für die Anpassungskonstruktion einer Lagereinheit eines Getriebes.

5. Die Aufbereitung von Anforderungen

Ist eine Anforderung erfaßt oder in der Entwicklung, Herstellung, dem Gebrauch oder der Rückführung erzeugt, so sollte sie vor ihrer Umsetzung aufbereitet werden. Eine detaillierte Aufbereitung der Anforderungen wird dabei folgenden Hauptzielen dienen:

1. Der strukturierten Sammlung aller Anforderungen an ein System für eine möglichst vollständige und konsistente Arbeitsgrundlage sowie Vertrags- und Gewährleistungsdefinition (siehe z.B. /4/);
2. Der Erzeugung von konsistenten und in die Gesamtaufgabe integrierten Teilbereiche der Forderungstruktur als handhabbare Arbeitsmittel in den einzelnen Entwicklungsphasen;
3. Der Vermeidung von Über- oder Untererfüllung von Forderungen des Auftraggebers sowie zur Sicherstellung einer hohen Produktqualität (siehe z.B. /5/)
4. Der Festlegung eines einheitlichen Kommunikationsmediums in und zwischen allen Produktlebensphasen (Kommunikation durch Anforderungen);
5. Der Änderung der Beziehungen von

Anforderungen (siehe unten) zur Erweiterung des Lösungsraumes und damit zur Definition neuer Lösungen;

6. Der Dokumentation von Anforderungen zur Verdeutlichung und Speicherung getroffener Entscheidungen (Grundlage zur Erstellung eines Entscheidungsbaumes).
7. Der Dokumentation von Anforderungen als Suchkriterien für einen Lösungsspeicher realisierter Entwicklungsobjekte nach Art der Lösungselemente (Konstruktionsfeatures, siehe hier /6/)

Die Ansprüche an eine Aufbereitung sind analog zu den in 4. festgehaltenen Forderungen definiert; die aus der Sicht der Erfassung erstellte noch sehr unvollständige Forderungsstruktur muß hier in eine konsistente Arbeitsgrundlage der Entwicklung umgesetzt werden.

Die Aufbereitung dient der effektiven Bereitstellung von Forderungen zur Optimierung des Entwicklungsablaufes und damit der Sicherstellung der Qualität eines Systems. Für die Bestimmung der Qualität einer Anforderungsstruktur sind Beurteilungskriterien im Rahmen der Aufbereitung zu ermitteln, auf die hier jedoch nicht weiter eingegangen werden soll.

6. Die Bereitstellung von Anforderungen

Alle in den beiden vorherigen Kapiteln beschriebenen Aktivitäten zur Erfassung und Aufbereitung von Anforderungen dienen nur dem Zweck, sie im Laufe einer Entwicklung und folgenden Herstellung, Nutzung und Rückführung "verarbeiten", also realisieren, modifizieren oder zurückweisen zu können. So wird für den Kunden ein System erstellt, das seinen geäußerten Vorstellungen entspricht und damit für diesen Kunden (und hoffentlich auch für weitere) qualitativ hochwertig ist.

In **Bild 6.1** sind die Bereiche dargestellt, an die Anforderungen gerichtet sein können und die deshalb auch bestimmte Sichten auf die

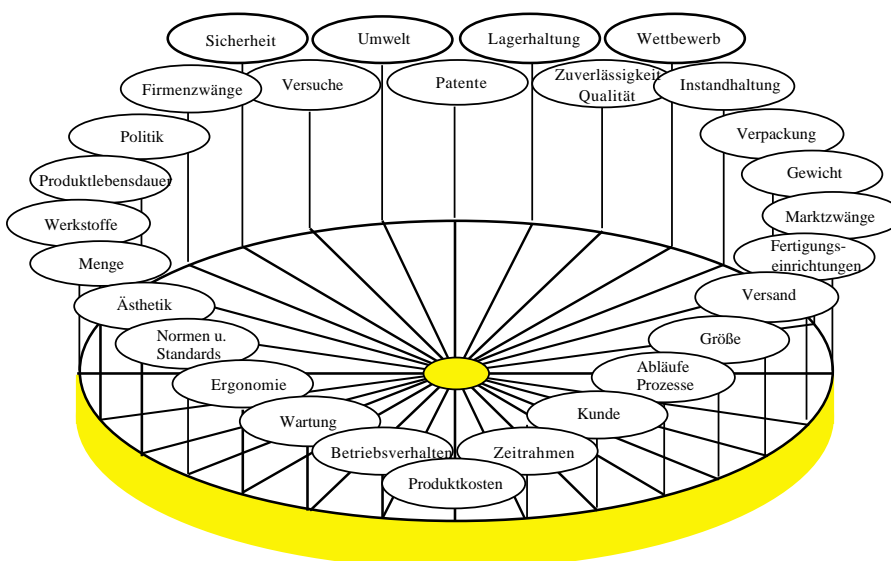


Bild 6.1: Mögliche Bereiche der Anforderungsdefinition (nach /7/)

Bereitstellung der Forderungen haben. Diese Sichten sind unterschiedlich motiviert und haben daher auch unterschiedliche Forderungen an die Bereitstellung.

Die Hauptnutzer für die aufbereiteten Forderungen sind in der *Systemerschaffungsphase*, also der Entwicklung und Herstellung, zu finden. Die in der Aufbereitung ergänzten/erzeugten Informationen und Methoden versetzen den Entwickler in die Lage, mehrere zur Zeit sequentiell ausgeführte Arbeitsschritte der methodischen Entwicklung parallel auszuführen und zu dokumentieren, ohne den so wichtigen Überblick über das Gesamtsystem zu verlieren.

Das *Projektmanagement* hat die Aufgabe, in enger Zusammenwirkung mit der Organisation des Projektes Leitungsvorgaben zu machen, die natürlich auch den "Geleiteten" schnell und aktuell mitgeteilt werden müssen. Die Anforderungsstruktur sollte eine Kommunikations- und Unterstützungsbasis für diese Aufgaben darstellen.

Die *Organisation* des Projektes muß neben der Planung des Arbeitsablaufes auch die Methoden und Methodenelemente zur Projektbearbeitung vorgeben. Um das zu realisieren, ist die Formulierung von Anforderungen, die allen Projektmitarbeitern aktuell zugänglich sind, notwendig.

Ein wichtiger Aspekt der Systementwicklung ist das Sicherstellen der *Qualität* des Systems. Da Qualität die Erfüllung der Anforderungen darstellt, ist der Bezug zur Forderungsstruktur und eine entsprechende Bereitstellung sofort transparent.

Neben der Nutzung einer Forderungsstruktur für die Teams im Hause ist es unbedingt erforderlich, durch *Datenaustausch* einem Unterauftragnehmer den Teil der Forderungsstruktur, der seine Teilaufgabe betrifft, vollständig, konsistent und redundanzfrei zur Verfügung zu stellen.

Für Mittel- und langfristig angelegte Systeme ist eine effiziente *Datenhaltung* von großer Bedeutung. Auch nach Jahren muß die Systemerstellung und deren Unterlagen noch nutzbar zur Verfügung stehen, auch wenn die Werkzeuge für ihre Erstellung geändert wurden.

6. Zusammenfassung

Die effiziente Nutzung von Anforderungen in der Erstellung eines Systems erfordert eine bestimmte Methode der Verwaltung dieser dynamischen Arbeitsgrundlage. Besonders vor dem Hintergrund präventi-

ver Qualitätsmanagementtechniken ist ein Werkzeug erforderlich, das den Mitarbeitern alle für ihre jeweilige Aufgabe erforderlichen Vorgaben und Randbedingungen zur Verfügung stellt. Die vorgeschlagene Methode der Erfassung, Aufbereitung und Bereitstellung von Anforderungen im Produkterstellungszyklus ermöglicht die Umsetzung eines solchen Werkzeuges, sowohl mit konventionellen als auch mit rechnerunterstützten Hilfsmitteln.

Literatur

- /1/ Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre, Springer-Verlag, Berlin 1993
- /2/ N.N.: VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI-Verlag, Düsseldorf 1993
- /3/ Roth, K.H.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen - Teil 1: Konstruktionsmethodik, Springer-Verlag, Berlin 1994
- /4/ N.N.: Normen zum Qualitätsmanagement und zur Qualitätssicherung - EN ISO 9000 - 9004, Beuth-Verlag, Berlin 1994
- /5/ Akao, Y.: Quality Function Deployment, Verlag Moderne Industrie, Landsberg 1992
- /6/ Schulte, M.; Stark, R.: Definition und Anwendung höherwertiger Konstruktionselemente (Design Features) am Beispiel von Wellenkonstruktionen, Schriftenreihe Produktionstechnik, Universität des Saarlandes, Saarbrücken 1993
- /7/ Dieter, G.E.: Engineering Design: A Materials and Processing Approach, McGraw-Hill, New York 1991

Die Schaffung eines offenen Teilebibliothekskonzeptes

Ort, A.; Bugow, R.

ISO 13584 "Parts Library" stellt mit seinen Spezifikationen ein Informationsmodell zum Austausch von Teilebibliotheken dar. Ziel ist es, Bibliotheken von (Wiederhol-)Teilen und deren Benutzerschnittstelle ("Bibliotheksindex") in den neutralen Produktdatenaustausch zu integrieren. Dies soll ebenfalls für einzelne Segmente der Bibliothek oder des Bibliotheksindexes gelten. In dem für Teilebibliotheken gewählten Modellierungskontext war dies nicht ohne weiteres möglich. Dieser Artikel berichtet über einen Mechanismus, der zur Lösung des Problems beiträgt

ISO 13584 "Parts Library" specifies the description of an Information Model for the exchange of Parts Libraries. A library of commonly used parts and its user interface ("dictionary") shall be made exchangeable. This shall also hold for sections of it. This article reports about a solution for the problem, since it was not an easy task to in the given context.

1. Modellierung

ISO 13584 verwendet die Spezifikationsprache EXPRESS (ISO 10303-11). Für EXPRESS ist in der selben Norm eine Abbildung auf ein Austauschformat ("physical file") definiert (ISO 10303-21). Bei der Abbildung des Modells (in EXPRESS beschrieben) auf die Instanzebene (physical file) wird jeder Instanz eine Identifikationsnummer zugewiesen, die innerhalb der Austauschdatei eindeutig ist.

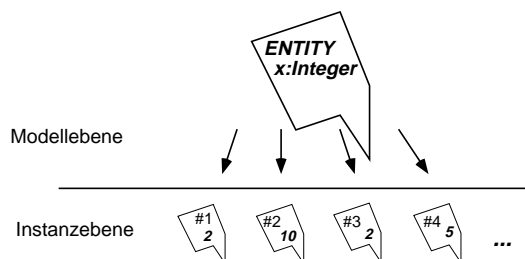


Bild 1.1 Instanziierung eines Modellobjektes in verschiedene Ausprägungen ("Instanzen")

Dies gilt solange, wie es sich um ein Modell sowie um eine Austauschdatei handelt. Es ist in der Austauschdatei nicht möglich, Instanzen in anderen Austauschdateien zu referenzieren.

Ein weiteres verwendetes Konzept ist die Vererbung. Sie ist allein für die Modellierungsebene gültig, nicht aber für die Instanzebene. Vererbung setzt eine gerichtete, azyklische Struktur von Klassen voraus. Die Klassen werden in der Regel baumartig angeordnet. Die erste Klasse (Wurzel, "root") befindet sich dabei auf oberster Ebene. Die Struktur verzweigt sich dann mit zunehmender Tiefe. Vererbt wird von der Wurzel ausgehend nach unten. Klassen in der Struktur werden Attribute (Beschreibungen) zugeordnet, die die in einer Klasse zusammengefaßten Objekte charakterisieren. Alle nachfolgenden Klassen erben diese Beschreibungen, d.h. sie übernehmen alle Beschreibungen übergeordneter Klassen. Jede Klasse kann darüberhinaus mit weiteren Beschreibungen belegt werden. Sie ist dann genauer beschrieben als die übergeordnete Klasse - sie ist spezialisiert.

Vererbung wird auf zwei Ebenen verwendet. Im Informationsmodell, das mit Hilfe von EXPRESS spezifiziert wird, kann in diesem Zusammenhang der Begriff "Entity" synonym zu "Klasse" und "Instanz" synonym zu "Objekt" verwendet werden.

Das Informationsmodell selbst erlaubt ebenfalls die Beschreibung von Klassen und Klassenbäumen im Bibliotheksindex.

2. Teilebibliothek

Für die wiederholte Verwendung von Teilen in der Konstruktion hat es sich als sinnvoll erwiesen, diese zu klassifizieren und in Bibliotheken abzulegen. Auch die Anbieter der Teile präsentieren diese in Bibliotheken oder Katalogen, die unter verschiedenen Gesichtspunkten strukturiert sein können. Derartige Bibliotheken sind bereits in verschiedenen Formen in der Anwendung. Die Strukturierung und die Repräsentation allerdings ist dabei für die verschiedenen Anbieter spezifisch und damit kein einheitlicher Standard für den Austausch vorhanden.

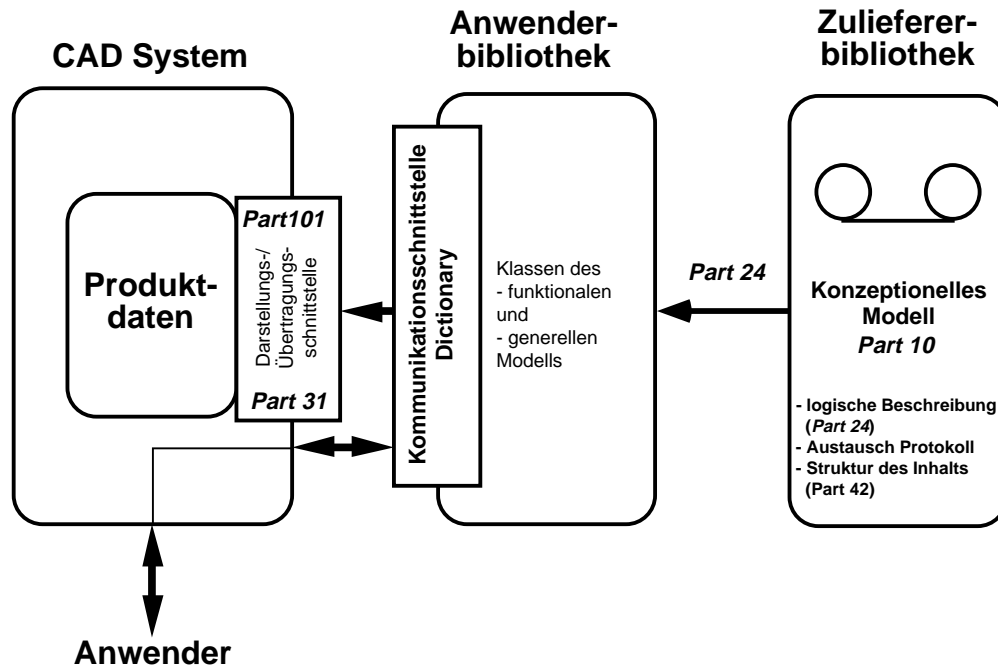


Bild 2.1 Aufbau der ISO 13584

Jede Bibliothek besitzt eine Schnittstelle, die es dem Benutzer ermöglicht, auf die in ihr enthaltenen Teile zuzugreifen. Die Schnittstelle ("Bibliotheksindex") spiegelt den Inhalt der Bibliothek in einer für Menschen erfaßbaren Struktur wieder. Zudem bietet sie eine Funktionalität, die eine Auswahl der in der Bibliothek enthaltenen Teile ermöglicht.

Ausgewählte Teile sind in die Konstruktion einzubinden. Dafür gibt es weitere Schnittstellen, die die Übertragung von Repräsentationen des Teiles aus der Bibliothek in ein Zielsystem unterstützt. Eine denkbare Schnittstelle wäre etwa die Geometriegenerierung eines Teiles für ein CAD System.

Die internationale Norm ISO 13584 beschreibt ein Informationsmodell als Grundlage zum Austausch beliebiger Teilebibliotheken. Eine Übersicht über die Norm und ihren Einzeldokumenten zeigt **Bild 2.1**.

3. Der Bibliotheksindex

In diesem Abschnitt wird das Dictionarymodell als Teil des Informationsmodells und der Bibliotheksindex als Ausprägung des Dictionarymodells näher erläutert. Der erste Teil befaßt sich mit Anforderungen an den Aufbau und die Struktur des Bibliotheksindex. Der zweite Teil erläutert, wie den Anforderungen bei der Gestaltung des Dictionarymodells berücksichtigt wurden.

3.1 Funktionen des Bibliotheksindex

Der Zugang zur Bibliothek in der ISO 13584 soll verschiedene Aufgaben erfüllen.

Er spiegelt den Inhalt der Teilebibliothek wieder. Die Repräsentation der Teile und die Organisation der Teilebibliothek wird in der Norm nicht festgeschrieben. Sie bleibt jedem einzelnen Anbieter überlassen. Dies gilt gleichermaßen für die Repräsentation und die Organisation des Dictionary. Weder der physikalische Datenträger, noch das Speicherformat oder gar die Zugriffsfunktionen werden festgelegt.

Der Teil 42 der Norm ISO 13584 /3/ beinhaltet die Beschreibung der Mechanismen für einen Zugriff auf die Teilebibliothek bzw. die Beschreibung der Struktur des Bibliotheksindex.

Das Dictionarymodell ermöglicht Auswahlmechanismen auf Teile in der Bibliothek. Die Struktur des Dictionarymodells definiert nicht die Auswahl für Teile(familien).

Sie muß aber so gestaltet sein, daß verschiedene Auswahlmechanismen wirksam werden können.

Der Bibliotheksindex bietet eine Referenzmöglichkeit für unterschiedlich strukturierte Teilebibliotheken. Werden solche Bibliotheken mit den Mechanismen des im Teil 42 beschriebenen Dictionarymodells gestaltet, so können sich Bibliotheken gegenseitig referenzieren.

Damit ist es möglich, daß Teile einer Bibliothek mit Teilen einer anderen Bibliothek als austauschbar gekennzeichnet werden. Dies erlaubt dem Benutzer des Bibliotheksindex, aus unterschiedlichen Bibliotheken auszuwählen.

Der Bibliotheksindex enthält zusätzlich Angaben über Status und Zustand (Version, Update) der Bibliothek.

3.2 Aufbau des Dictionarymodells

Es sei an dieser Stelle nochmals betont, daß das Dictionarymodell, so wie in der ISO 13584 beschrieben, keine Vorgabe für die Datenhaltung von Bibliotheksindex darstellen soll. Der hier beschriebene Aufbau des Dictionarymodells bietet eine Struktur, die zur Erfüllung der oben genannten Anforderungen hinreichend ist.

Teile werden durch Eigenschaften ("Properties"; auch Attribute oder Merkmale genannt) charakterisiert. Teile mit gleichen Merkmalen werden in Familien ("Component Classes") zusammengefaßt.

Teil 42 der ISO 13584 erlaubt die Beschreibung der Familien und der Eigenschaften. Die Beschreibungselemente werden Deskriptoren ("Descriptors") genannt, um eine Verwechslung mit Eigenschaften zu vermeiden. Eine Übersicht der Deskriptoren ist in **Tab. 3.1** angegeben.

Beispiel: *Laufrollenführungen* seien durch die Eigenschaften *Länge*, *Höhe*, *Breite*, *Material*, *Befestigungsart* charakterisiert.

Im Bibliotheksindex selbst gäbe es somit eine Familie *Laufrollenführung*. Diese Familie besäße die oben genannten Eigenschaften (Properties). Jede Eigenschaft ist mit entsprechenden Deskriptoren aus Tab. 3.1 beschrieben. Die Eigenschaft *Länge* etwa hat einen Code, einen Wertebereich (100..1000 mm), einen Kurznamen (l), etc. Die Familie *Laufrollenführung* ist ebenfalls durch Deskriptoren aus Tab 3.1 für die Klassen beschrieben.

Code (E, F)	Source Document of Definition (E)
Domain (E)	Remark (E)
Category (E)	Formula (E)
Preferred Name (E, F)	Format (E)
Short Name (E, F)	Superclass (F)
Synonym Name (F)	Simplified Drawing (F)
Preferred Symbol (E)	Date of Original Definition (E, F)
Synonymous Symbols (E)	Date of Definition (E, F)
Synonym Name (E)	Date of Last Change (E, F)
Formal Definition (F)	Version (E, F)
Definition (E, F)	Revision (E,)
Unit (E)	
Condition (E)	

Tab 3.1 Deskriptoren für eine Eigenschaften (E) und Familien (F)

Neben der Familie *Laufrollenführung* wird es noch weitere Familien in der Bibliothek geben. Im Bibliotheksindex werden die verfügbaren Familien in einem Baum angeordnet. Bei der Beschreibung wird die Vererbung ausgenutzt, d.h. Eigenschaften, die für ganze Teilbäume zutreffen, werden möglichst hoch in der Struktur vereinbart und dann von allen darunterliegenden Familien übernommen.

4. Probleme

Für den Austausch von Teilebibliotheken und deren Bibliotheksindex wird das in /1/ beschriebene Austauschformat verwendet. Die Elemente innerhalb der Datei leiten sich direkt aus der Spezifikation in EXPRESS ab. Bei der Instanziierung eines jeden beschreibenden Elementes des Dictionarymodells wird diesem Element zusätzlich eine Identifikationsnummer mitgegeben.

Diese Identifikation ist für die Übertragungsdatei eindeutig. Es ist aber nicht möglich, über mehrere Dateien hinweg eindeutig zu referenzieren. Dies hat zur Folge, daß der Austauschkontext in sich abgeschlossen sein muß. Alles, was für eine Übertragung an Verweisen zwischen einzelnen Beschreibungselementen benötigt wird, muß in der Übertragungsdatei mitgeführt werden.

Für die Übertragung eines Bibliotheksindexes bedeutet dies, daß dieser komplett übertragen werden müßte; auch dann, wenn sich nur wenige Eigenschaften für Teile oder Teilefamilien geändert hätten.

Als Zugang zu einer bestehenden Bibliothek beinhaltet der Bibliotheksindex Verweise auf Daten innerhalb einer Anwenderbibliothek. Solche Verweise müssen ebenfalls mit übertragen werden.

Da aber die Übertragungsdatei in sich abgeschlossen sein muß, hätte bei der Übertragung eines Bibliotheksindexes auch mindestens der Teil der Bibliothek mitgeführt werden müssen, auf den sich der Bibliotheksindex bezieht - de facto wäre dies die komplette Bibliothek gewesen.

Da dieser Zustand nicht akzeptabel ist, mußte ein Mechanismus geschaffen werden, der eindeutige Referenzen über den Übertragungskontext hinaus ermöglicht. Referenzierungen müssen sowohl auf eventuell später nachzuliefernde Daten als auch auf im Zielsystem bereits bestehende Daten möglich sein.

Damit wäre die Übertragung von einzelnen Datenpaketen möglich, ohne das Zusammenhänge verloren gehen.

5. Der Referenzmechanismus

In der ISO 13584 wurde unter Beteiligung der Arbeitsgruppe ISO/TC184/SC4/WG2, von Partnern des ESPRIT Projektes 8984 PLUS und unter Mitwirkung einer Arbeitsgruppe des IEC TC3 SC3D ein für beide Normungsgremien gemeinsamer Entwurf für ein Dictionarymodel /4/ entwickelt. Darin enthalten ist auch ein Referenzmechanismus, der das oben beschriebene Problem löst.

5.1 Überblick

Da die gegebene Identifikation im Austauschformat nicht ausreicht mußte der gewünschte Referenzmechanismus für die Zwecke von ISO 13584 und IEC 1360 in EXPRESS modelliert werden.

Die Idee ist, jedem Element innerhalb des Bibliotheksindexes einen zusammengesetzten Code, der als weltweit eindeutige Identifizierung für das zugehörige Element des Bibliotheksindexes fungiert, zuzuordnen. Damit sind über den Austauschkontext (z.B. Datei) hinausgehende Referenzierungen möglich.

Der Nachteil dieses Konzeptes besteht darin, daß der als einfache Zeichenkette abgelegte Code nicht zum festen Bestandteil der Syntax der Übertragungsdatei gehört. Der Code ist als Attribut in EXPRESS modelliert und muß gesondert interpretiert werden.

Elemente des Bibliotheksindexes werden immer mit einer solchen Referenz übertragen. Diese kann aber für weitere Verweise auf Elemente in anderen Übertragungsdateien oder bestehenden Bibliotheken verwendet werden, da sie einen eindeutigen Bezeichner trägt.

Ein direkter Verweis auf ein Element des Bibliotheksindexes verbietet sich; alle Verweise müssen über die zugehörige Referenz laufen. Damit erreicht das Konzept die gewünschte Flexibilität. Es wird konsequent in der ISO 13584 angewendet.

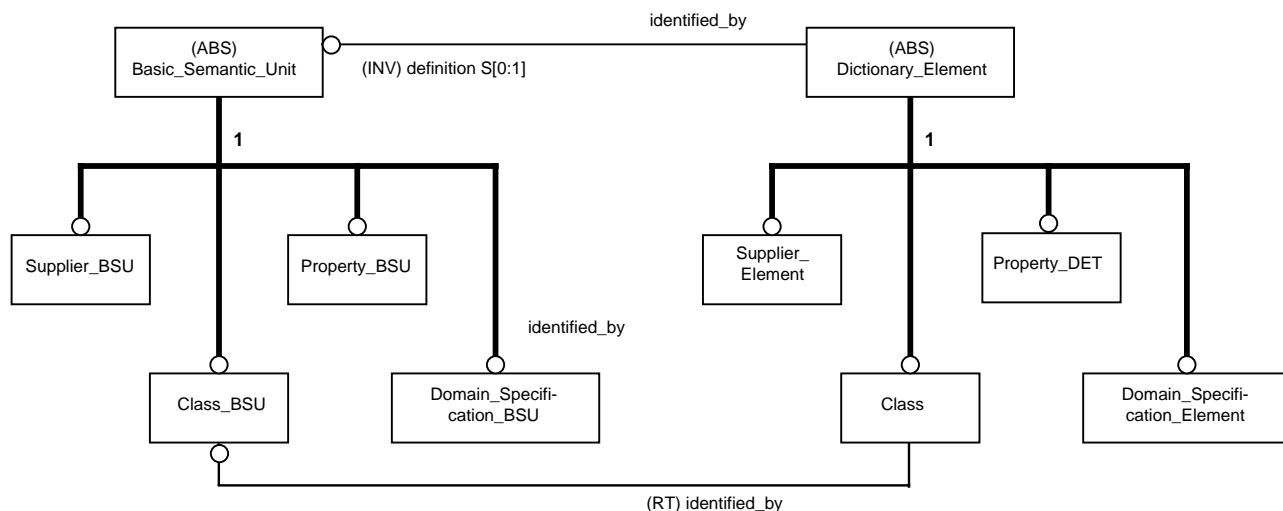


Bild 5.1 Modellstruktur im Dictionarymodell (Vereinfacht, Ausschnitt). Für die Klassen ist die Redeklaration gezeigt.

5.2. Modellierung in EXPRESS

Im Dictionarymodell sind drei Hauptgruppen enthalten: `Content_Item`, `Dictionary_Element` und `Basic_Semantic_Unit` (BSU). Alle drei sind als abstrakte Supertypen deklariert und können nicht instanziiert werden.

```
ENTITY Basic_Semantic_Unit
  ABSTRACT SUPERTYPE OF ( ONEOF (
    Supplier_BSU,
    Class_BSU,
    Property_BSU,
    Domain_Specification_BSU,
    Supplier_Related_BSU,
    Class_Related_BSU));
  code: Code_Type;
  version: Version_Type;
DERIVE
  dic_identifizier: identifizier := code + sep_cv +
    version;
INVERSE
  definition: SET [ 0 : 1 ] OF Dictionary_Element
  FOR identified_by;
  referenced_by: SET OF Content_Item
  FOR dictionary_definition;
END_ENTITY; -- Basic_Semantic_Unit
```

Bild 5.1 Die Basic Semantic Unit

`Content_Item` wird im Dictionarymodell nicht weiter spezifiziert. Es bietet einen Ansatzpunkt für die Modellierung der Bibliothek (siehe /5/). Unter `Dictionary_Element` sind alle Objekte zusammengefaßt, die im Bibliotheksindex enthalten sein können: Zuliefererrelevantes (`Supplier_Element`), Teilefamilien (`Class`, als Untertyp davon die `Component_Class`), Eigenschaften (`Property_DET`) und die Angabe des Wertebereiches für die Eigenschaften (`Domain_Specification_Element`).

In einer ISO 13584 spezifischen Erweiterung /5/ sind noch Programmbibliotheken und Dokumente eingeführt (beide als Untertyp von `Class`).

```
ENTITY Dictionary_Element
  ABSTRACT SUPERTYPE OF ( ONEOF (
    Supplier_Element,
    Class_and_Property_Elements,
    Domain_Specification_Element));
  identified_by: Basic_Semantic_Unit;
  time_stamps: OPTIONAL Dates;
  revision: Revision_Type;
END_ENTITY;
```

Bild 5.2 Die Elemente des Bibliotheksindex

Die BSU schließlich ist der bereits eingeführte Zeiger auf eine Element des Bibliotheksindex. Modelliert ist die Verzeigerung allerdings in die andere Richtung: Ein `Dictionary_Element` referenziert (`identified_by`) eine BSU. Die Eineindeutigkeit wird durch eine inverse Referenz erreicht, die von der BSU auf ein Element des Bibliotheksindex verweist (`(INV) definition[0:1]`).

```
ENTITY Content_Item
  ABSTRACT SUPERTYPE;
  dictionary_definition: Basic_Semantic_Unit;
  (* the Basic Semantic Unit to be used for
  referring to the definition in the dictionary *)
END_ENTITY;
```

Bild 5.3 Referenz zum Bibliotheksinhalt

Als Untertypen einer BSU sind nun die zum `Dictionary_Element` entsprechenden Untertypen angegeben: `Supplier_BSU`, `Class_BSU`, `Property_BSU` und `Domain_Specification_BSU`. (In der ISO 13584 spezifischen Erweiterung dann auch die BSUs für Programmbibliotheken und Dokumente.)

```
ENTITY Class
  ABSTRACT SUPERTYPE OF (Component_Class)
  SUBTYPE OF (Class_and_Property_Elements);
  SELF\Dictionary_Element.identified_by:
  Class_BSU;
  its_superclass: OPTIONAL Class_BSU;
  described_by: LIST OF Property_BSU;
  defined_types: OPTIONAL SET [ 1 : ? ] OF
  Domain_Specification_BSU;
  ...
END_ENTITY;
```

Bild 5.3 Die Klasse als zentrales Element im Bibliotheksindex

Gegenseitige Verweise zwischen der BSU und dem `Dictionary_Element` werden auf die Untertypen vererbt. Um die gewünschte Entsprechung zwischen den BSU Untertypen und den `Dictionary_Element` Untertypen zu erreichen, wird das Attribut `identified_by` redefiniert.

Die Referenz auf oberster Ebene wird somit spezialisiert und auf eine untere Ebene eingeschränkt. Damit wird durch die Modellierung eine Überprüfung der Verweistypen festgelegt, die zu einer sicheren Implementierung führt.

5.3. Identifikator

Die BSU alleine macht noch keine eindeutige Identifizierung möglich. Sie spielt lediglich den Platzhalter dafür. Die Identifikation wird im Zusammenspiel mit der Vererbung erreicht.

Jeder relevante Obertyp ist selbst mit einer Identifikation versehen. Dieser wird an alle nachfolgenden Untertypen vererbt, die wiederum einen Teil zum Identifikator beisteuern. Die einzelnen Teile werden durch Separatoren getrennt. In Ihrer Gesamtheit bilden sie einen eindeutigen und universalen Code. Es liegt eine hierarchische Identifikation vor.

Anhand eines Teiles kann das Prinzip demonstriert werden. Für die Identifikation von Teilen steht die BSU auf oberster Ebene: Das Attribut `dic_identifizier` setzt sich aus einem Code, einem "-" (`sep_cv`) und einer Versionsnummer zusammen.

Der unmittelbare Untertyp `Class_BSU` stellt diesem Identifikator einen Zulieferer spezifischen voran und trennt ihn mit einem "." (`sep_id`) ab. Dieser Zulieferer Code richtet sich nach /6/ und identifiziert den Zulieferer weltweit eindeutig.

Die Klasse selbst besitzt darüberhinaus einen eigenen Code, welcher sie innerhalb des Namensraumes des Zulieferers eindeutig macht. Zusammen lassen sich so Familien oder Teile eindeutig referenzieren.

Der Mechanismus funktioniert ähnlich für Eigenschaften von Teilen und Teilefamilien. Hier kommt hinzu, daß der Gültigkeitsbereich der Eigenschaft mit einfließt.

6. Zusammenfassung

Entwicklungen der ISO 13584 ("Parts Libraries") machen sich die Methodik und Implementierungsmechanismen der ISO 10303 zu nutze. Für den Austausch von Teilebibliotheken und deren Bibliotheksindizes werden die Konzepte der Instanziierung und Vererbung (aus der Objektorientierung) verwendet. Unzulänglichkeiten der ISO 10303 und der Bedarf nach eindeutiger und den Übertragungskontext übergreifender Referenzierung von Teilen und deren Eigenschaften führten in der ISO 13584 und IEC 1360 dazu, einen gesonderten Referenzmechanismus zu entwickeln.

Der hier vorgestellte Mechanismus entspricht dem aktuellsten Stand, der ab Anfang des Jahres 1995 ein CD Votumsverfahren durchlaufen wird.

Die Entwicklungsarbeiten wurden zu einem nicht unerheblichen Teil vom ESPRIT Projekt 8984 "PLUS" getragen, welches die Validation und Überführung der ISO 13584 in die industrielle Anwendung zur Aufgabe hat.

Das IMW ist an den Spezifikations- und Validationsaufgaben beteiligt. Für den Teil 42 der ISO 13584 zeichnet das IMW als Projektleiter und Editor verantwortlich.

Literatur

/1/ ISO/TC184/SC4: "Product data representation and exchange - Part 21: Clear Text Encoding of the Exchange Structure"; DIS, ISO, 1993.

/2/ ISO/TC184/SC4: "Product data representation and exchange - Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual"; DIS, ISO, 1992.

/3/ ISO/TC184/SC4: "Parts Library - Part 42: Methodology for the Structuring of Parts Library Families"; CD, ISO, 1994.

/4/ ISO/TC184/SC4/WG2 N202: "Common ISO / IEC Dictionary Schema", 1994

/5/ ISO/TC184/SC4: "Parts Library - Part 24: Logical Model of Supplier Library", CD, ISO, 1994.

/6/ ISO/TC184/SC4: "Parts Library - Part 26: Supplier Identification", CD, ISO, 1994.

Konstruktionssystematische Grundlagen für funktions- und produktionsgerechte Feinblechstrukturen

Penschke, St.

Seit Juli letzten Jahres ist an der TU Clausthal und der Universität Hannover der Sonderforschungsbereich (SFB) 362 "Fertigen in Feinblech" eingerichtet. Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Schaffung von Grundlagen für den vermehrten Einsatz des Halbzeuges Blech. Es sollen neue Perspektiven zur Kombination von Umform- und Fügeprozessen sowie für funktions- und produktionsgerechte Feinblechkonstruktionen eröffnet werden. Dazu kooperieren unterschiedliche ingenieurwissenschaftliche Fachbereiche wie Umformtechnik, Schweißtechnik, Werkstofftechnik, Konstruktionslehre und Betriebsorganisation.

Since July of last year the TU Clausthal and the University of Hannover have been grant recipients for the government sponsored special research project 362 "processing of thin sheet metal". The aim of this project is to provide the basics promoting the increasing use of sheet metal. Through the planned research, new possibilities for the combination of forming and joining, as well as new applications for sheet metal are being sought that meets the requirements of function and production. Therefore research departments of metal forming, welding engineering, material science, design theory and logistics are cooperating.

1 Projektumfeld

Feinblech ist heute dank moderner Stahlerzeugungsverfahren ein außerordentlich hochwertiges Halbzeug. Hier sei auf die Weiterentwicklung der metallurgischen Technik und Prozeßführung mit ihrer erheblichen Verbesserung des Reinheitsgrades, die Möglichkeiten zur Einstellung einer bestimmten Mikrostruktur während der Blechherstellung sowie eine mögliche kontinuierliche Prozeßführung beispielsweise bei der Kaltband-Herstellung hingewiesen.

Das Halbzeug Blech besitzt den großen Vorteil, daß eigenschaftsbestimmende Werkstoffherstellung und Formgebung in getrennten Fertigungsschritten erfolgen. Bei der heutigen umfangreichen Verfügbarkeit von Blech läßt sich dadurch eine hohe Qualitätssi-

cherheit und Formflexibilität erzielen. Fertigungstechnisch lassen sich Blechbauteile mit komplexer Gestalt realisieren. Eine exakt auf die jeweiligen Beanspruchungen zugeschnittene Bauteilstruktur ist möglich. Als Ersatz für herkömmliche Konstruktionen sind das Schichten von Feinblechen zur Auflösung großer Werkstoffquerschnitte, dünnwandige tragwerkartige Leichtbaustrukturen oder die Nutzung der Sandwichbauweise denkbar.

Nicht zuletzt besitzt Stahlblech aus ökologischer Sicht wegen seiner sehr guten Eigenschaften bezüglich des Recyclings erhebliche Vorteile. Kein anderer Werkstoff besitzt bereits heute eine so hohe Recyclingrate wie Stahl. Auch aus diesem Grund bietet sich Feinblech für die vermehrte Nutzung anstelle schwer recycelbarer Kunststoffe und anderer knapper Rohstoffe an.

So ergeben sich aus der technischen Entwicklung von Blechherstellungs- und verarbeitungsverfahren /1/ neue Möglichkeiten und Perspektiven, die das Halbzeug Blech besonders interessant machen.

2 SFB 362 "Fertigen in Feinblech"

Der oben beschriebenen Entwicklung Rechnung tragend, will der SFB die wissenschaftlichen Grundlagen der werkstoff- und prozeßtechnischen Vorgänge beim Umformen und Fügen von Feinblech sowie deren Auswirkungen auf ausgewählte Bauteileigenschaften untersuchen. Der SFB ist ein Gemeinschaftsprojekt mit der Universität Hannover unter Federführung der Technischen Universität Clausthal. Er wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) in Bonn gefördert.

Der SFB gliedert sich in drei Projektgruppen. Die erste Gruppe untersucht Werkstoffverhalten und Stofffluß beim Umformen und Fügen. Rechnergestützte Modellierungs- und Berechnungsverfahren sollen die experimentell gewonnenen Erkenntnisse übertragbar und allgemein verwendbar machen. Gegenstand der zweiten Gruppe ist die Ermittlung optimaler Prozeßabläufe beim Fertigen in Feinblech, sowohl unter technologischen, als auch unter organisatorischen

Gesichtspunkten. Schwerpunkt bildet die Kombination von Umformen und Fügen (Umformen gefügter Zuschnitte, tailored blanks). Für die Untersuchungen bevorzugte Bearbeitungsverfahren sind das Laser- und Quetschnahtschweißen sowie das Streck- und Tiefziehen. Die dritte Gruppe befaßt sich mit der Ermittlung von Feinblechbauteileigenschaften. Hier steht die Überwachung von Qualitätsmerkmalen während des Bearbeitungsprozesses und am fertigen Feinblechbauteil sowie die Konzeption entsprechender Analyse- und Korrekturverfahren im Mittelpunkt. Dazu zählen die sichere Vermessung langwelliger Gestaltabweichungen und die Überprüfung von Festigkeitseigenschaften an gefügten und umgeformten Bauteilen einschließlich der Definition geeigneter Probenabmessungen.

Das gesamte Arbeitsprogramm besteht aus 14 Teilprojekten, welche von 9 Instituten bearbeitet werden. Die Forschungsergebnisse speziell der werkstofftechnischen und technologischen Untersuchungen sollen die Grundlage für eine Ableitung neuer, qualitativ hochwertiger konstruktiver Lösungen bilden. Wesentliches Anliegen ist es, unter Berücksichtigung der neuen Verarbeitungseigenschaften und -möglichkeiten und der daraus resultierenden Produktqualitäten, die Anwendung des Halbzeuges Feinblech in allen Bereichen des Maschinen- und Apparatebaus durch die Erschließung neuer Einsatzgebiete sowie durch die Substitution anderer Werkstoffe zu fördern.

3 Teilprojekt B4 "Feinblechkonstruktion"

Das Teilprojekt B4 wird vom Institut für Maschinenwesen und dem Institut für Werkstoffumformung der TU Clausthal bearbeitet. Im Rahmen dieses Teilprojektes sollen Werkzeuge zur Konstruktionsunterstützung entwickelt werden. Im Mittelpunkt steht die Erarbeitung konstruktionssystematischer Grundlagen für die produktionsgerechte Entwicklung von innovativen Feinblechkonstruktionen.

Die Konstruktion im Spannungsfeld zwischen Marktanforderungen, Fertigungsmöglichkeiten und Kosten ist entscheidender Faktor für den Erfolg eines Produktes. Ziel muß es daher sein, den Konstrukteur in die Lage zu versetzen, ein Produkt zu definieren bzw. zu gestalten, das sowohl den Funktionsanforderungen entspricht, als auch ein Optimum hinsichtlich der Produktion darstellt. Wie **Bild 1** zeigt, ist die Realisierung optimaler Blechkonstruktionen nur durch eine ganzheitliche Betrachtung der Teilaspekte Produkthanfor-

derungen, Produktfunktionen, Füge- und Umformparameter sowie die Einbindung in Fertigungsstrukturen möglich.

Aus diesen Zusammenhängen zwischen Konstruktions- und Produktionsdaten ergeben sich drei Fragenkomplexe, die im Rahmen des Forschungsvorhabens langfristig zu beantworten sind:

- In welcher Weise sind Anforderungsliste und Funktionsstruktur aufzubereiten, damit geometriebezogene Informationen aus Materialeigenschaften und Fertigungstechnologie in der Konstruktion genutzt werden können? Können die bekannten Methoden der Anforderungs- und Funktionsanalyse /2,3,4/, die sich meist auf globale Aufgabenstellungen mit der abstrahierenden Suche nach physikalischen Wirkprinzipien beziehen, für die hier vorliegenden Aufgaben im Bereich der Gestaltung und Dimensionierung angewendet werden oder müssen neue Analysemethoden gefunden werden?
- Nach welchen Gesichtspunkten und mit welchen Methoden sind technologische Informationen zur Gestaltung von Blechteilen bereitzustellen? Welche Strukturierungs- und Beschreibungsmöglichkeiten gibt es für diese Informationen? Sind die bekannten Methoden für eine technologisch ausgerichtete Unterstützung des Konstruktionsprozesses anwendbar?
- In welcher Form müssen die oben genannten Daten bereitgestellt werden? Welche rechnergestützten Präsentationsmöglichkeiten sind zweckmäßig, um die Informationen anwendungsbezogen darzustellen?

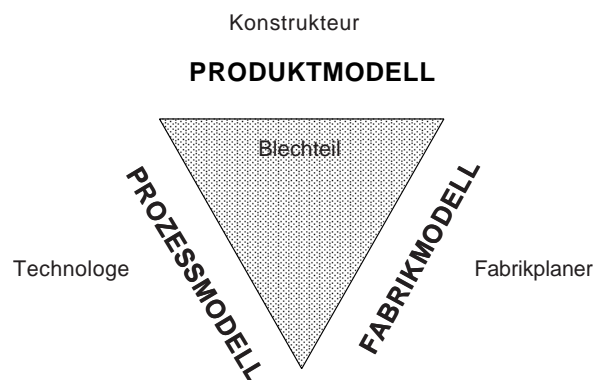


Bild 1 Sichtweisen auf ein Feinblechbauteil

Die besondere Problematik der Aufbereitung und Darstellung von konstruktionsrelevantem Wissen liegt darin begründet, daß konkrete Informationen zur Fertigungstechnologie an die Produktgestalt geknüpft sind, wogegen der Konstrukteur im allgemeinen funktionsbezogen arbeitet. Die gegenwärtig übliche Form der Darstellung von Konstruktionsregeln zum blechgerechten Konstruieren ist eine Gegenüberstellung günstiger und ungünstiger Beispiellösungen in Verbindung mit verbal formulierten Regeln. Um ein Produkt zu optimieren, muß der Konstrukteur die Regeln sequentiell durcharbeiten, abstrahieren und auf sein konkretes Blechteil anwenden. Dieses Vorgehen kann erheblich effektiviert werden, wenn die Informationen zu Fertigungsprozessen und -strukturen der Problemstellung angepaßt bereitgestellt werden können.

Aufbauend auf einer systematischen Erfassung und Strukturierung des konstruktionsrelevanten Wissens und der anschließenden Beschreibung in Informationsmodellen, soll eine Systematik entwickelt werden, die den Übergang von der Funktion zur Gestalt des Funktionsträgers ermöglicht. Anknüpfungspunkt bilden dabei blechspezifische Formelemente, die durch geometrische, funktionale und technologische Merkmale beschrieben werden /5/. Durch den Vergleich von funktionsbezogenen und produktionsbezogenen Merkmalen der Formelemente können dem Konstrukteur Vorschläge für die Gestaltung unterbreitet werden. Für die Verknüpfung der Formelemente

wird ein Regelwerk zur Verfügung gestellt.

Bild 2 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines langfristig zu realisierenden Konstruktionsinformationssystems bestehend aus einer Bibliothek von Formelementen, die durch die oben genannten Merkmale beschrieben sind, einem Regelwerk zur Verknüpfung der verschiedenen Formelemente und einer Dialogkomponente.

Aus den beschriebenen Aufgaben leiten sich die folgenden Arbeitsschritte ab:

- 1 Analyse des Untersuchungsbereiches
 - Produkte (Funktion, Aufgaben, Komplexität)
 - Verfahren
 - Fertigungsstrukturen
- 2 Bewertung und Auswahl von Referenzprodukten, -verfahren und -fertigungsstrukturen
- 3 Entwicklung eines Szenarios
 - 3.1 Beschreibung des Konstruktionsprozesses und der Referenzvorgehensweise
 - 3.2 Extraktion der Informationen und Regeln
 - 3.3 Anpassung der Funktionsanalyse
 - 3.4 Beschreibung und Modellierung der Informationsobjekte, Attribute und Relationen
- 4 Prototypentwicklung für ein Informationssystem

4 Projektstart

In der Projektstartphase wurde entsprechend den geplanten Arbeiten zunächst damit begonnen den Untersuchungsbereich zu analysieren. Um einen möglichst großen Praxisbezug zu gewährleisten, wurde

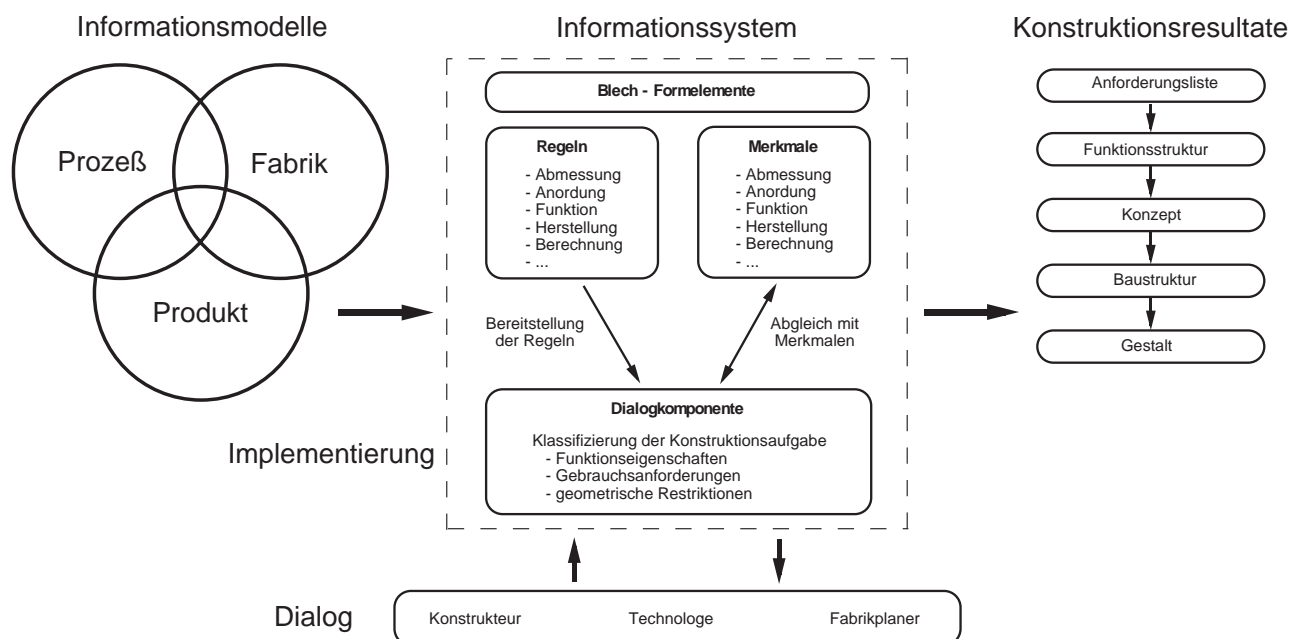


Bild 2 Struktur eines Konstruktionsinformationssystems für die Feinblechkonstruktion

eine Industriebefragung durchgeführt.

Dazu wurde ein zweiteiliger Fragebogen entwickelt, der die spezifischen Gebiete des Untersuchungsgebietes abdeckt. Im ersten Teil werden Angaben zum Unternehmen abgefragt:

- allgemeine Daten, wie Branche, Charakter (Zulieferer, Hersteller von Endprodukten etc.), Größe und Gliederung des Unternehmens;
- Angaben zur Organisation des Unternehmens, wie Organisationstypen, Fertigungsarten und Unternehmensphilosophie;
- produktbezogene Daten, wie verwendete Bearbeitungsverfahren, verwendete Blechwerkstoffe, -dicken und -plattenabmessungen.

Im zweiten Teil wird um die Beschreibung mehrerer, für das Unternehmen typischer bzw. besonders interessanter Beispielteile gebeten. Hier wird unter anderem nach Ausgangsmaterial, Funktion, produzierter Stückzahl und Kostenanteilen gefragt. Um die Beschreibung des kompletten Bearbeitungsablaufes für die gewählten Teile zu vereinfachen, wurde eine Matrix bereitgestellt.

Zur Durchführung der eigentlichen Befragung haben im Vorfeld Recherchen in Fachzeitschriften, Lieferkatalogen und -verzeichnissen stattgefunden, als deren Ergebnis eine Adressendatenbank von ca. 300 Blechbearbeitern angelegt und zur Versendung des Fragebogens genutzt wurde.

Die zurückgelaufenen Daten wurden entsprechend aufbereitet und für die Berücksichtigung bei der weiteren Projektarbeit ausgewertet. Es stehen Daten von Blechbearbeitern mit einem Teilespektrum von etwa 20 000 verschiedenen Blechbauteilen zur Verfügung. Die Ergebnisse der Befragung, die in **Bild 3** auszugsweise dargestellt sind, bilden die Grundlage für eine Auswahl von Referenzteilen, an denen die weiteren Untersuchungen exemplarisch durchgeführt werden sollen. Dabei wurden Bauteilstrukturen und Bearbeitungsverfahren berücksichtigt, die häufig Anwendung finden und den gegenwärtigen Stand der Technik repräsentieren.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Aus den Ergebnissen der Industriebefragung wurden Rückschlüsse für die weiteren Forschungsarbeiten gezogen. Nach der Bewertung und Auswahl von Referenzteilen und -verfahren wird gegenwärtig an der Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise für die Konstruktion in Feinblech gearbeitet. Dazu laufen

Untersuchungen zu Spezifika im Konstruktionsprozeß beim Konstruieren in Blech, zur Bauteileklassifizierung und -beschreibung und zu Besonderheiten bei der Umkonstruktion von Bauteilen für eine Herstellung in Blech (Substitution anderer Werkstoffe).

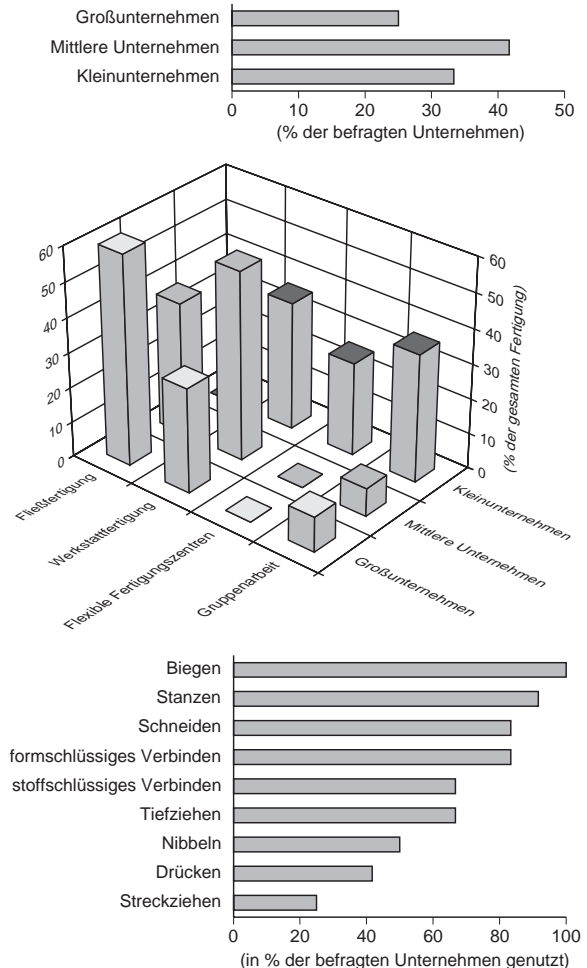


Bild 3 Teile der Auswertung der Industriebefragung

Literatur

- Siegert, K.: Neuere Entwicklungen in der Blechumformung, DGM-Informationsgesellschaft, Oberursel 1994
- Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre, 2. Auflage, Springer-Verlag 1986
- Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Springer-Verlag 1982
- VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Düsseldorf, VDI-Verlag 1986
- Schulte, M.; Stark, R.: Definition und Anwendung höherwertiger Konstruktionselemente (Design Features) am Beispiel von Wellenkonstruktionen, Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD, 1993

Informationssysteme im Konstruktionsprozeß

Prengemann, U.

Der Konstruktionsprozeß steht am Anfang der Prozeßkette von der Idee zum fertigen Produkt. Bekanntermaßen werden hier die Eigenschaften des späteren Produkts festgelegt. Das Ergebnis dieses Prozesses sind Informationen über das zukünftige Produkt; verarbeitet werden Ideen und konkrete Anforderungen, also Informationen. Daher kann der Konstruktionsprozeß als Informationsverarbeitungsprozeß angesehen werden.

Verbunden mit der Erzeugung von Informationen sind Entscheidungsprozesse. Diese Entscheidungen beeinflussen alle die Eigenschaften des späteren Produkts. Daher sind für diese Entscheidungen Hilfsmittel bereitzustellen.

Der folgende Artikel zeigt, wie Informationssysteme diese Entscheidungsprozesse unterstützen können. Dazu wird zunächst eine generelle Sicht auf Informationssysteme eingeführt. Abschließend werden die laufenden Projekte im IMW in diese Sicht eingeordnet.

In the design process as the starting point in the process chain from the idea to the final product most of the features of the later product will be fixed. Input information, Ideas and requirements will be processed and output information about the future product will be created. Therefore design can be considered as an information processing process.

Decision are closely linked to the process of building information. The need of decision support is evident because of the impact of the design decisions on the later product.

This paper shows how information systems can support decision processes. A general view on information systems is introduced. Finally the link to the running IMW projects is established.

Konstruktion als Informationsverarbeitungsprozeß

Bei der Betrachtung von Unternehmensprozessen kann zwischen Informationsfluß und Materialfluß unterschieden werden. Entsprechend können die ein-

zelnen Prozesse diesen zugeordnet werden. Es ist zu beobachten, daß die Prozesse im Informationsfluß auf die Optimierung der Materialflußprozesse gerichtet sind. Viele Prozesse bei der Gestaltung von Produkten können als reine Informationsverarbeitungsprozesse angesehen werden.

Dabei ist speziell der Konstruktionsprozeß durch umfangreiche Tätigkeiten zur Informationsbeschaffung gekennzeichnet. Das betrifft alle Phasen des Konstruierens. So beginnt nach VDI 2221 der Konstruktionsprozeß mit dem Klären der Aufgabenstellung, wobei das Wort Klären die Informationsbeschaffung impliziert. Die ständig notwendige Bewertung von Lösungsvarianten verlangt ebenso nach Informationen als Bewertungsgrundlage wie jegliche Simulationen, seinen sie nun auf die Funktion, die Festigkeit oder dem Betriebs- und Verschleißverhalten gerichtet.

Generell sind die Informationsverarbeitungsprozesse während des Konstruierens durch die Elemente Informationsbeschaffung, Bewertung, Entscheidung und Informationserzeugung gekennzeichnet. Bei dieser Einteilung wird davon ausgegangen, daß jede Entscheidung weitere Informationen über das betrachtete Produkt festlegt und damit Produktinformationen erzeugt.

Konstrukteur am Anfang der Prozeßkette

Vielfach wurde die Tatsache bekräftigt, daß der Konstrukteur aufgrund seiner Position am Anfang der Prozeßkette in der technischen Auftragsabwicklung einen großen Einfluß auf das spätere Produkt hat. Dies trifft nicht nur auf die Kosten, sondern auch auf alle Aspekte der Qualität bis hin zur Termintreue zu. An dieser Stelle soll der Aspekt hervorgehoben werden, daß am Anfang Entscheidungen aufgrund wenig vorliegender Informationen getroffen werden, die sehr weitreichende Folgen haben. Daher ist eine größtmögliche Unterstützung des Konstrukteurs mit geeigneten Informationssysteme anzustreben. Man kann dieses Ziel auch unter dem Motto zusammenfassen: So viel Informationen wie möglich so früh wie möglich zur Verfügung stellen.

Arbeitsteilung

Das oben genannte Motto kann natürlich zu der Schlußfolgerung verleiten, daß wir beabsichtigen, den Konstrukteur mit Informationen zu überhäufen. Zur Verfügung stellen bedeutet jedoch nicht, mit Informationen überhäufen. Vielmehr soll nur die Information den Konstrukteur wirklich erreichen, die für seine aktuelle Entscheidung relevant ist. Dennoch werden dies zweifellos mehr Informationen sein, als heute verfügbar sind. An dieser Stelle sind dann Fragen zum zukünftigen Berufsbild des Konstrukteurs zu beantworten. Wie ändert sich sein Tätigkeitsprofil durch die weitere Verkürzung von Entwicklungszeiten und durch die Einführung von prozeßorientierten Organisationsstrukturen? Welche Rückwirkungen ergeben sich auf den Konstruktions- und Entwicklungsprozeß und damit wieder auf die benötigten Informationssysteme? Auch diese Fragestellungen im Zusammenhang mit Informationssystemen zu betrachten.

Informationssysteme

Als Informationssystem werden eine Vielzahl von zum Teil völlig unterschiedlichen Systemen bezeichnet, deren einzige Gemeinsamkeit der Umstand zu sein scheint, daß sie Informationen bereithalten. Einige Beispiele sollen diese verdeutlichen. Im weiteren Sinn sind sowohl der Karteikasten mit allen Lesern einer Dorfbibliothek, das Ringbuch mit den gesetzlichen Regelungen zum Baurecht, ein populärwissenschaftliches Lexikon, ein Lagerkatalog auf CD-ROM, ein Auswahlprogramm für Welle-Nabe-Verbindungen und die Navigationssoftware zum Zugriff auf verschiedene Rechnerknoten in einem globalen Netzwerk Informationssysteme wie das Kundenauftragsarchiv. Wir wollen hier unter dem Begriff Informationssystem alle Systeme zusammenfassen, die Informationen für einen bestimmten Zweck sammeln, speichern und bereitstellen.

Zur Unterscheidung von Informationssystemen kann man neben dem grundsätzlichen Kriterium Zweck die Kriterien Medium, Aktualität, Spezialisierungsgrad, Abfragesteuerung, Informationsaufbereitung verwenden.

Entsprechend der Definition sind beim Aufbau von Informationssystemen nach der Festlegung des Ziels die Bereiche Informationsgewinnung, Informationsaufbereitung und Nutzung zu betrachten (**Bild 1**).

Informationsgewinnung

Bei der Informationsgewinnung sind die Aspekte der Lokalisierung der Informationen und das Konzept zur Sammlung zu beachten. Generell sollte die Informationsgewinnung mit dem geringstmöglichen Aufwand erfolgen. Hier ist eine klare Kosten-Nutzen-Abschätzung erforderlich. Dabei kann heute die ständig wachsende elektronische Verfügbarkeit vieler Informationen die Kosten für die Informationsgewinnung stark reduzieren.

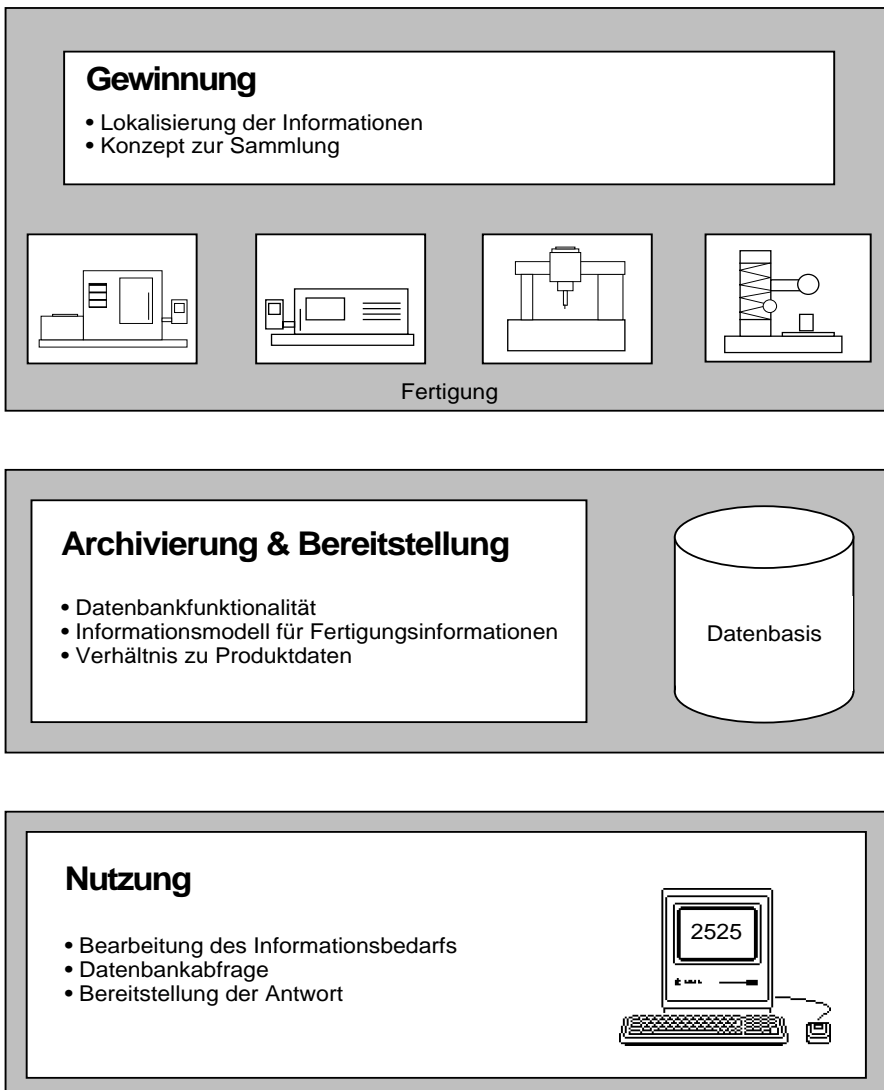


Bild 1: Beispiel: Informationssystem für Fertigungsinformationen /2/

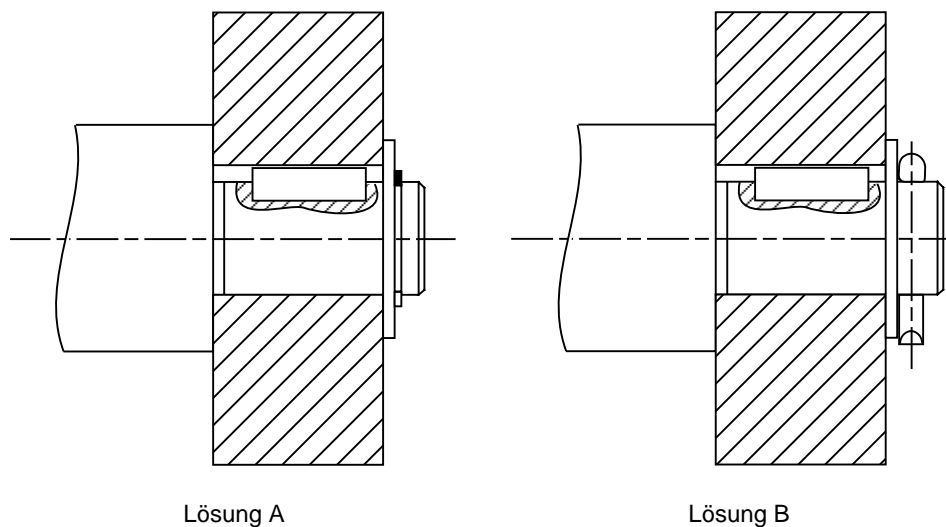


Bild 2: Vergleich konstruktiver Lösungen (axiale Sicherung)

Die Lokalisierung der Informationen verlangt eine Analyse der Prozesse und Systeme, die die benötigten Informationen erzeugen. Das Sammlungskonzept muß aus den Ergebnissen dieser Analyse abgeleitet werden. So kann z.B. eine Verdichtung von Daten nötig werden. Auch sind zeitliche Aspekte zu berücksichtigen - werden die Informationen z.B. ereignisgesteuert gesammelt oder in einen bestimmten zeitlichen Intervall.

Informationsaufbereitung

Die Informationsaufbereitung umfaßt die Aktivitäten zur Archivierung und Bereitstellung von Informationen. Zunächst ist ein Informationsmodell zu schaffen, das die betrachteten Informationen in einen semantischen Zusammenhang bringt. Das IMW nutzt hier weitestgehend die Modellierungssprache EXPRESS /1/, die als ISO-Norm vorliegt. Dazu ist weiterhin eine entsprechende Datenbankfunktionalität bereitzustellen. Hier sollen Funktionen wie Speichern und Abfragen, Aktualisieren und Zugriffssteuerung genannt werden.

Nutzung

Das Nutzungskonzept wird durch den Zweck, den das Informationssystem erfüllen soll, bestimmt. Dazu ist zunächst die Benutzerschnittstelle zu betrachten. Ein bestimmter Informationsbedarf muß erfaßt und dahingehend bearbeitet werden, daß er durch Datenbankabfrage auf die gespeicherten Informationen zu befriedigen ist. Auch die gewonnenen Informationen sind so zu transformieren, daß sie in das Umfeld, aus dem das Informationsbedürfnis stammt, passen. Ein Beispiel ist in **Bild 2** dargestellt. Zwei konstruktive

Lösungen, die die gleiche Funktion erfüllen (axiale Sicherung), sind hinsichtlich ihrer Herstellungskosten zu vergleichen. Dazu werden eine Vielzahl von Fertigungsinformationen untersucht; der abfragende Konstrukteur erhält am Ende jedoch lediglich die Antwort: Lösung A ist besser. Nur auf Nachfrage kann er auf die genutzten Informationen zugreifen.

Informationssysteme als Bestandteil der unternehmensweiten Informationsverarbeitung

Bei der Betrachtung der verschiedenen Informationssysteme scheint es sinnvoll, eine unternehmensweite Betrachtung einzuführen. Hier kann man zwischen Informationen und Funktionen unterscheiden. Die Informationen lassen sich prinzipiell in Produktinformationen, Fertigungsinformationen und betriebswirtschaftliche Informationen unterscheiden. Produktinformationen beschreiben danach alle Informationen für ein geplantes Produkt, d.h. alle Spezifikationen, Zeichnungen, Arbeitspläne usw. Hier gibt es mit der ISO 10303 STEP einen wesentlichen Ansatz zur systemneutralen und redundanzfreien Beschreibung der Produktinformationen. Fertigungsinformationen beschreiben sowohl die vorhandenen Ressourcen als auch die erzielten Resultate: realisierte Produkte und Prozesse. Betriebswirtschaftliche Informationen stellen schließlich den Bezug zu den Kosten her. Dazu gehören auch die logistischen Informationen. Zwischen diesen Informationen bestehen vielfältige Zusammenhänge.

Auf all diese Informationen werden verschiedenen Funktionen angewendet. Sie sind heute durch eine Vielzahl von Anwendungssystemen gekennzeichnet. So erstellt ein CAD-System wesentliche Teile der Produktinformationen, NC-Programmiersysteme nutzen diese Produktinformationen und erweitern sie, PPS-System vereinigen in sich alle drei Informationskategorien. In diesem Zusammenhang sind auch Informationssysteme zu sehen - sie schaffen eine besondere Sicht auf die im Unternehmen verfügbaren Informationen.

Auch externe Informationen werden über Funktionen

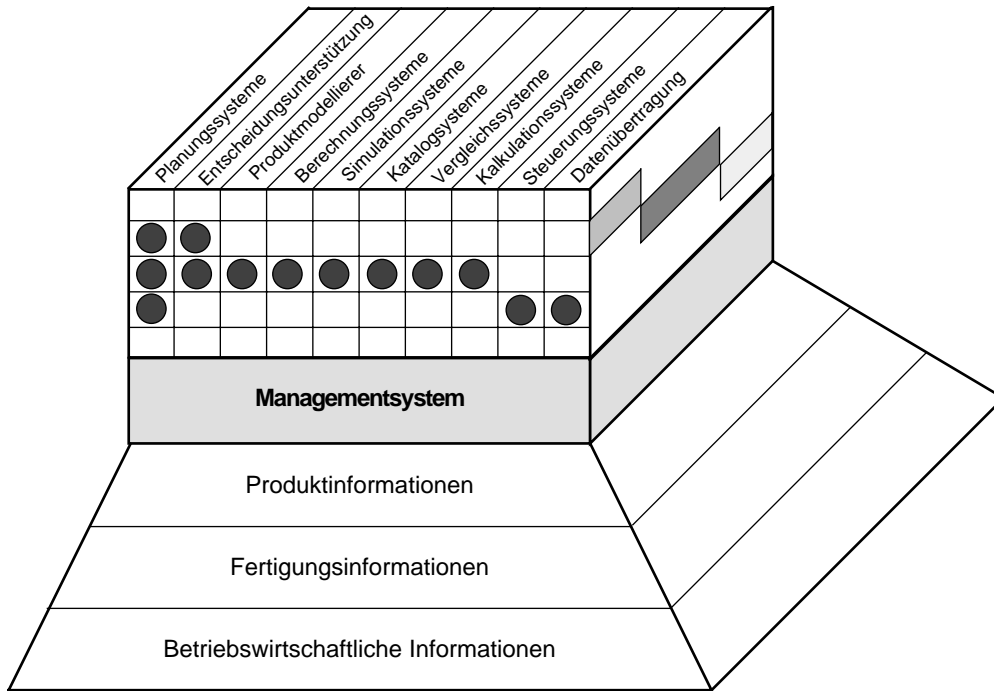


Bild 3: Komponenten der unternehmensweiten Informationsverarbeitung /2/

in diese Informationsarchitektur eingebunden. Zwischen den Informationen und den Funktionen muß eine entsprechende Steuerungsebene dafür sorgen, daß die benötigten Informationen gefunden werden, die erzeugten Informationen richtig eingeordnet werden und die Konsistenz gewahrt bleibt. Diese Ebene wird als Managementsystem bezeichnet. Die vorgestellte Architektur ist in **Bild 3** dargestellt.

Projekte im Themenbereich Informationssysteme

Mit dem Thema Informationssysteme für die Konstruktion befassen sich im IMW zur Zeit fünf Projekte. Das Projekt AMANIS (Advanced Manufacturing Information System for the Designer) entwickelt einen Ansatz für die Bereitstellung von Fertigungsinformationen für die Konstruktion. Der Schwerpunkt des Projekts liegt auf die Sammlung und das Bereitstellen von Fertigungserfahrungen. Sie sollen für Konstruktionsentscheidungen genutzt werden. Damit schafft AMANIS die Grundlagen für ein unternehmensspezifisches Informationssystem. Bei der Sammlung und Aufbereitung der Informationen wird nach Lösungen gesucht, die zusätzlichen personellen Aufwand vermeiden.

Das Projekt PICASSO (Practical and Intelligent CAD for Assembly Objects) hat die Entwicklung einer wissensbasierten Konstruktionsumgebung für Kunststoffspritzguß- und Umformwerkzeuge zum Ziel. Dabei hat das IMW ein STEP-konformes Informations-

modell zur Beschreibung funktionsorientierter Toleranzen entwickelt und schreibt einen entsprechenden Softwaremodul zur Festlegung der Toleranzen.

Auch im Projekt EQUIP (Design Methodology for Quiet Products) wird Wissen über Akustik modelliert und der Zusammenhang zu Produktinformationen hergestellt. Ziel ist auch hier eine Funktion - die Vorhersage und Analyse des akustischen Verhaltens von Produkten.

Im Projekt PLUS (Parts Library usage and Supply) werden Aufbau und Austausch von Strukturen für Teilbibliotheken untersucht und umgesetzt.

Das Projekt "Rechnerunterstützte Anforderungsermittlung und Funktionsanalyse verfahrenstechnischer Maschinen" behandelt die Produkt- und prozßgerechte Erfassung und Bereitstellung der Anforderungen und Funktionsstrukturen und entwickelt dazu ein Vorgehens- und Informationsmodell.

Alle Projekten befassen sich mit dem Produktmodell als Grundlage für die produktbezogene Informationsdarstellung. Dazu werden verschiedene anwendungsbezogene Aspekte tiefer untersucht und damit die Produktbeschreibung weiter angereichert und vervollständigt. Es werden Funktionen entwickelt, die auf diese Informationen angewendet werden.

Aufgrund der oben angeführten Architektur lassen sich weitere Funktionen integrieren.

Literatur

- /1/ ISO DIS 10303-11: Product Data Representation and Exchange - Part 11: The EXPRESS Language Reference Manual. Gaithersburg 1992
- /2/ Prengemann, U.: Fertigungsinformationen im Konstruktionsprozeß. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994

Fertigungsinformationen für die Fertigungsplanung

Schiedeck, N.

Die Qualität der Fertigung wird maßgeblich durch die Fertigungsplanung bestimmt. Zur Verbesserung der Produktqualität sind dem Fertigungsplaner die Ergebnisse und Folgen mitzuteilen, die sich aus der Fertigung gemäß des Arbeitsplanes ergeben. Dem Gedanken der Qualitätsregelkreise folgend werden Istinformationen aus der Fertigung zurückgeführt. Durch Auswertung der Istinformationen können die Arbeitspläne hinsichtlich ihrer Fertigungsprozesse optimiert und eine Wiederholung von in der Vergangenheit aufgetretenen Fehlern vermieden werden. Im folgenden wird ein Konzept über die Art der rückzuführenden Informationen vorgestellt. Es handelt sich hierbei um ein Teilergebnis des Arbeitskreises "Modelle für die Fertigungsplanung" des QCIM-Projektes, das von den Instituten FhG-IPK Berlin, WZL Aachen und IMW Clausthal gemeinsam erarbeitet wurde.

The production quality is strongly determined by the production planning. For the improvement of the product quality the production planner needs information about the results are made manufacturing in accordance to the process plan. Following the idea of quality control loops there must be a feedback of actual information from the shop floor. The interpretation of these information will help to optimize processes and avoid the repetition of already appeared faults. In this paper a concept of an information model about actual information will be shown.

1 Einleitung

Die zielgerichtete und wirtschaftliche Entwicklung qualitativ hochwertiger Produkte setzt genaue Kenntnis über die Möglichkeiten der Fertigung voraus [1]. Die Planung des Fertigungsprozesses im Rahmen der Arbeitsplanerstellung muß darauf abzielen, nicht nur zeit- und kostenbewußt, sondern auch robust und qualitätsorientiert den Fertigungsprozess zu gestalten. Dies bedeutet, daß Korrekturen von Planungsvorgaben in der Fertigung sowie Nachbearbeitungen

von Werkstücken weitestgehend vermieden werden sollen. "Qualität planen und produzieren" ist der Leitgedanke moderner Fertigungsplanungskonzepte. Ein wesentlicher Faktor, der für eine Optimierung von Planungsvorgaben immer stärker an Bedeutung gewinnt, liegt in der Rückführung aussagekräftiger Informationen über Fertigungsergebnisse und -abläufe aus den direkt wertschöpfenden Unternehmensbereichen in den Fertigungsplanungsbereich. Die kontinuierliche Rückmeldung erzielter Fertigungsergebnisse sowie tatsächlich angewandter Technologieparameter lassen Schlußfolgerungen auf die Qualität der planerisch ermittelten Sollvorgaben für die Fertigung zu, so daß im Rahmen künftiger, ähnlicher Planungsaufgaben fehlerhafte Entscheidungen vermieden werden.

Fragestellungen, die sich mit der Form und dem Umfang von aus der Fertigung zur Optimierung der Fertigungsplanung zurückzuführenden Informationen befassen, sind noch weitgehend ungeklärt.

2 Konzept der Istdaten-Rückführung

Ziel der Arbeiten ist es, Mechanismen zur Integration der Fertigungsplanung in Qualitätsregelkreise zu entwickeln. Die Struktur eines Qualitätsregelkreises läßt sich prinzipiell durch die Aktivitäten Planen einer Sollvorgabe, Ausführen der Planvorgaben, Erfassen der Ausführungsergebnisse und Bewerten der Soll-Ist-Abweichungen beschreiben. Übertragen auf einen Qualitätsregelkreis zwischen Fertigungsplanung und Fertigung entspricht die Aktivität Planen der Fertigungsplanung, die Solldaten in Form eines Arbeitsplanes bereitstellt. Die Ausführung obliegt der Fertigung, in der beispielsweise mit Hilfe von Prüfeinrichtungen und Betriebsdaten-Erfassungssystemen produktbezogene Istdaten aufgenommen werden. Nach Rückführung dieser Istdaten in die Fertigungsplanung erfolgt eine Bewertung von Soll-Ist-Abweichungen, die ihrerseits wieder in den Planungsprozeß einfließen, **Bild 1**.

Zur Beurteilung der Qualität von Fertigungsplanungsvorgaben können folgende Kriterien herangezogen

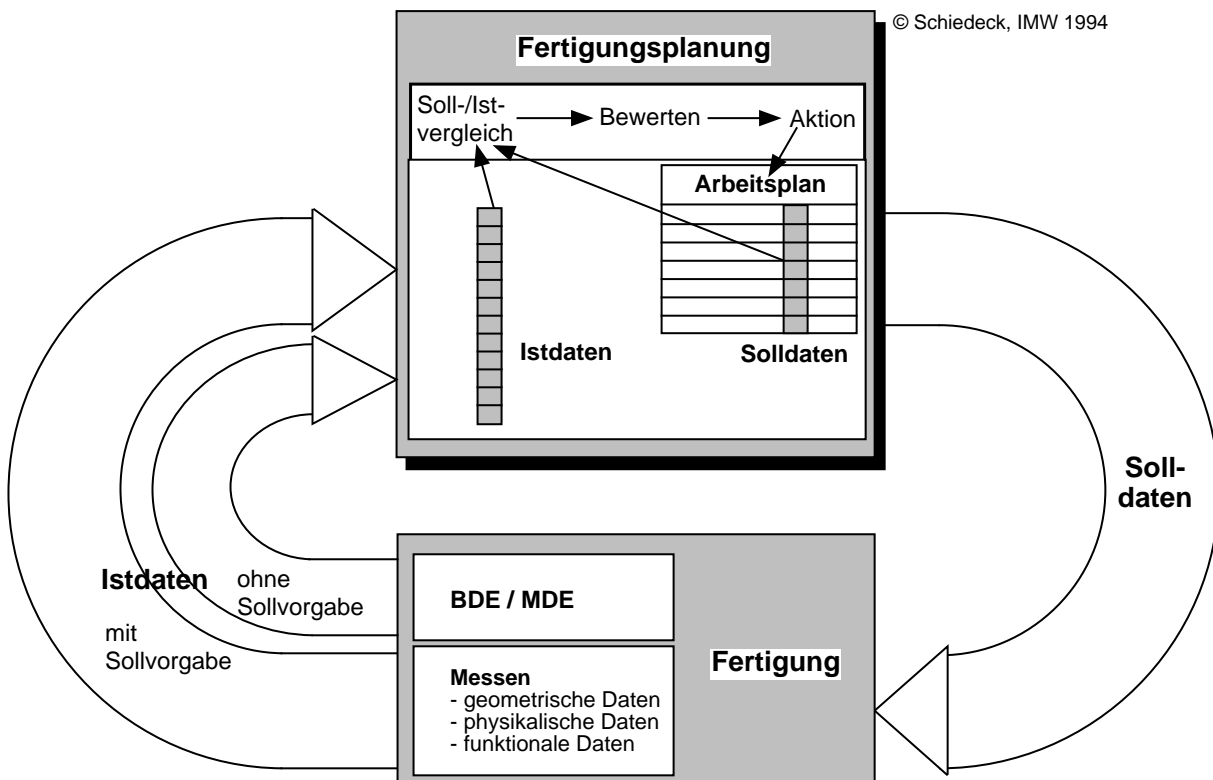


Bild 1 Datenfluß im Qualitätsregelkreis Fertigungsplanung - Fertigung

werden:

- Grad der Übereinstimmung der gefertigten Produkte mit den Produktspezifikationen
- Modifikation von Planungsvorgaben in der Fertigung
- Übereinstimmung der kalkulatorischen mit den erzielten Größen
- Auftreten durch die Fertigungsplanung beeinflusbarer Störungen

Um diese Fragestellungen informationstechnisch zu unterstützen sind demzufolge Ist-daten über erzielte physikalische und geometrische Produkteigenschaften sowie Prozeßdaten erforderlich, die insbesondere die real angewandten Fertigungstechnologieparameter und benötigten Fertigungszeiten beschreiben.

3 Ist-Datenmodell als Element des NC-Planungsmodells

Zur Optimierung der Fertigungsplanung relevante Ist-daten lassen sich grundsätzlich in die Kategorien produktbezogene und prozeßbezogene Ist-daten einteilen, Bild 2. Produktbezogene Ist-daten spiegeln Produkteigenschaften wider. Unter dem Oberbegriff prozeßbeschreibende Daten werden Informationen zusammengefaßt, die den technischen Prozeß direkt charakterisieren, wie beispielsweise verwendete Technologiewerte. Weiterhin gehören Informationen

über den Fertigungsablauf in diese Kategorie, wie beispielsweise Zeiten, aber auch nicht geplante Ereignisse bzw. Störungen, die durch eine maschineninterne Regelung kompensiert nicht werden.

Produktbezogene Ist-daten können in direkt meßbare Größen und funktionale Ist-daten untergliedert werden. Durch die Repräsentation funktionaler Ist-daten des Produktes ergeben sich Referenzen auf eine Beschreibung der Anforderungen an das Produkt. Zur Auswertung produktbezogener Ist-daten ist die Kenntnis von Sollwerten, beispielsweise in Form von Bauteiltoleranzen, notwendig.

Funktionale Ist-daten beziehen sich auf die Funktion des Werkstücks im konkreten Anwendungsfall. Ein Bauteil kann je nach Einsatzfall unterschiedliche Funktionen erfüllen, bzw. die gleiche Funktion in verschiedenen Anwendungen. Je nach Anwendungsfall sind auch unterschiedliche Qualitäten der Funktionserfüllung möglich. Ein Beispiel für ein funktionales Ist-datum ist die Gleichförmigkeit der Übersetzung eines Zahnrades im Zusammenspiel mit einem Gegenrad. Für prozeßbezogene Ist-daten wird eine Unterteilung in Ist-daten mit Sollvorgabe und ohne Sollvorgabe vorgenommen. Prozeßbezogene Ist-daten mit Sollvorgabe beziehen sich auf Technologiedaten und Zeitvorgaben für einzelne Arbeitsvorgänge. Insbesondere Technologievorgaben, wie Schnittwerte, werden

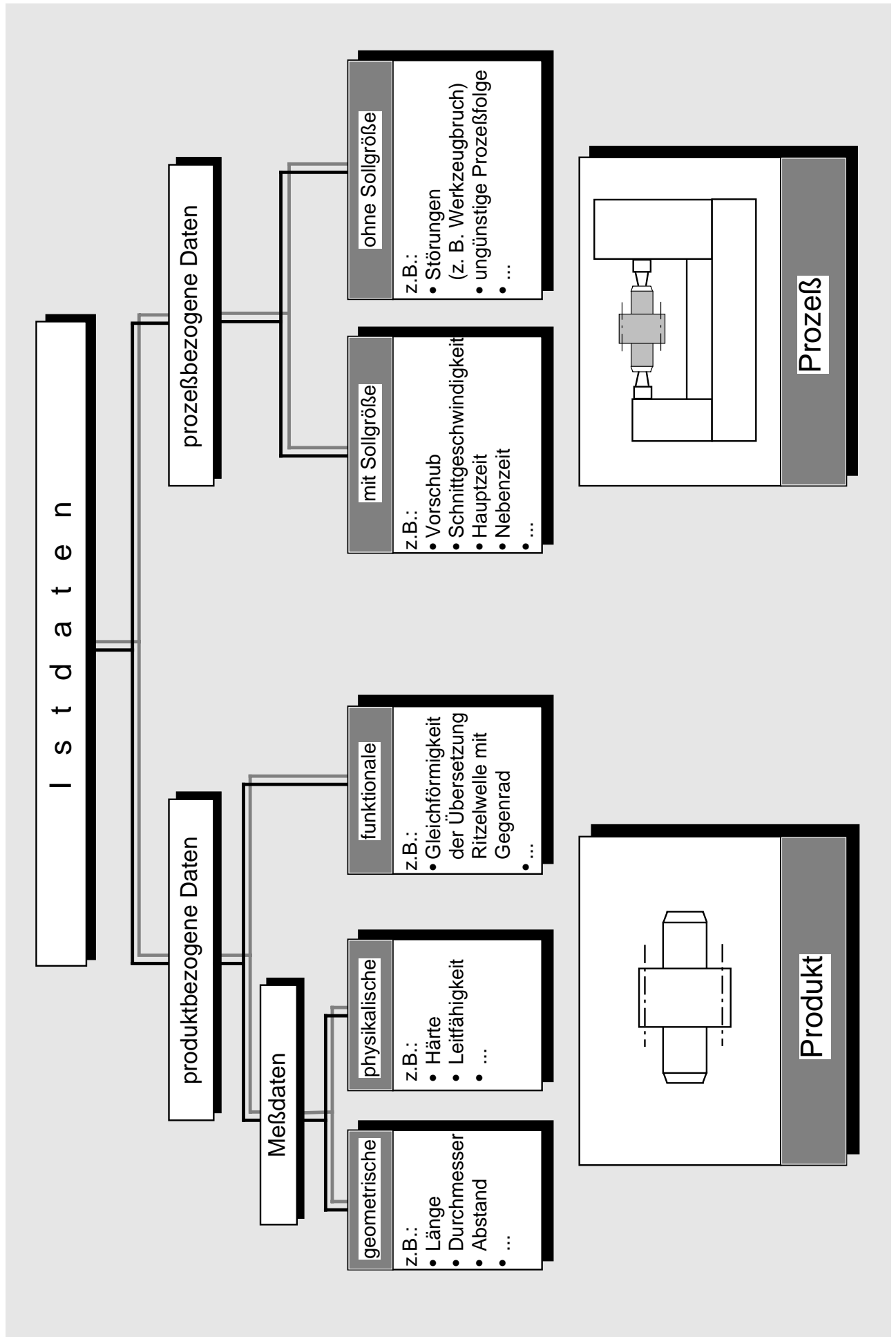


Bild 2 Konzept zur Untergliederung der Istdaten

häufig an der Maschine korrigiert. Hierin spiegelt sich die Erfahrung von Mitarbeitern aus der Fertigung wider. Ziel sollte es demzufolge sein, das Erfahrungswissen dieser Mitarbeiter aufzubereiten und der Fertigungsplanung zur Verfügung zu stellen.

Prozeßbezogene Istdaten können direkt den Arbeitsvorgängen und, sofern vorhanden, korrespondierenden Soll- oder Istdaten zugeordnet werden. Unter prozeßbezogenen Istdaten ohne Sollvorgabe werden Informationen über Fertigungsereignisse verstanden, die durch den Arbeitsplan nicht abgedeckt werden. Darunter fallen Störungen in der Fertigung, wie das Rattern einer Werkzeugmaschine oder ein Werkzeugbruch.

4 Auswertung von Istdaten in der Fertigungsplanung

Durch eine gezielte Auswertung produktbezogener Istdaten kann festgestellt werden, inwieweit das Fertigungsergebnis die spezifizierten Produkteigenschaften erfüllt. Bei Nichterfüllung geforderter Produkteigenschaften sind die gewählten Verfahrensparameter und Technologien zu hinterfragen. Änderungen von Prozeßparametern und /oder Betriebsmitteln oder eine Korrektur der Prozeßfolge können als Maßnahmen zur Optimierung des Prozeßergebnisses abgeleitet werden. Sind die spezifizierten Produkteigenschaften erfüllt, kann eine Überprüfung der wirtschaftlichen Auslegung des Fertigungsprozesses durch Informationen über Istzeiten erfolgen. Werden Spezifikationen, wie beispielsweise Toleranzen übererfüllt, kann durch Auswahl alternativer Prozesse oder durch Änderungen von Prozeßparametern ein qualitativ ebenfalls zufriedenstellendes Ergebnis jedoch mit günstigeren wirtschaftlichen Faktoren erzielt werden. Darüberhinaus werden produktbezogene Istdaten in der Bearbeitungsplanung zur Aktualisierung von Zerspanungsvolumen für nachfolgende Bearbeitungsprozesse verwendet.

Zur Bewertung von Produkteigenschaften durch Auswertung von Meßergebnissen sind neben den Meßwerten und einer Spezifikation der Meßeinheit, Informationen über den angewandten Meßprozeß erforderlich. So muß bei der Gestaltprüfung auf Koordinatenmeßgeräten die verwendete Meß- und Auswertestrategie berücksichtigt werden. Wird beispielsweise ein Werkstück durch die Einspannung in der Werkzeugmaschine verformt, können bedingt durch eine

Rückfederung des Werkstücks nach der Entnahme aus dem Spannmittel, unrunde Bohrungen entstehen. Diese Formabweichungen können durch Koordinatenmeßgeräte entdeckt werden, sofern bei der Auswertung nicht nur ein Durchmesser nach Gauss, sondern auch die Parameter entsprechender Hüll- oder Pufferchelemente bestimmt werden.

Für die Rückführung prozeßbezogener Istdaten in die Fertigungsplanung sind die Störungen von Interesse, deren Ursachen voraussichtlich in falschen Planungsvorgaben begründet liegen. So wird das Rattern einer Maschine in der Regel durch ungünstig gewählte Schnittwerte hervorgerufen. Zufallsereignisse können durch die Fertigungsplanung hingegen nicht beeinflußt werden. Durch die Dokumentation von Istdaten kann Aufschluß darüber gewonnen werden, inwiefern es sich im Falle von Störungen um Zufallserscheinungen oder systematisch auftretende Fehler handelt.

5 Fazit

Mit der Entwicklung eines Informationsmodells zur Abbildung von Istdaten der Fertigung und deren Integration in das NC-Planungsmodell der KCIM im DIN /2/ wurde die Zielsetzung verfolgt, die Informationsrückführung in die Fertigungsplanung zu unterstützen. Mit Hilfe dieser Feedback-Informationen lassen sich Aussagen über die Qualität der Vorgaben der Fertigungsplanung ableiten und diese gezielt optimieren. Neben einer qualitativen Optimierung von Planungsergebnissen wird die Grundlage zu einer langfristigen Sicherung des unternehmensspezifischen, fertigungstechnischen Know-hows gelegt. Desweiteren wird dadurch ein Instrumentarium geschaffen, um Maßnahmen der Qualitätsregelung zu begründen und im Rahmen der Produktdokumentation und -haltung eine Archivierung entwicklungs- und fertigungsrelevanter Informationen vorzuhalten.

6 Literatur

- /1/ Prengemann, U.: Fertigungsinformationen im Konstruktionsprozeß. 1994, Dissertation am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal
- /2/ Eversheim, W.; Müller, G.; Katzy, B. R.: NC-Verfahrenskette. Hrg. H.-J. Warnecke, R. Schuster und DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich 1994. ISBN 3-410-12921-9

Sammlung und Aufbereitung von Fertigungserfahrungen für die Konstruktion

Schmitt, R.

Die Konstruktion legt etwa 70 - 80 % der Produktkosten fest. Ein erheblicher Teil dieser Kosten wird in der Fertigung in Abhängigkeit von den konstruktiven Festlegungen verursacht. Ein Informationssystem, das Fertigungserfahrungen in geeigneter Form zur Verfügung stellt, könnte dem Konstrukteur eine wirksame Unterstützung bieten, durch seine konstruktiven Entscheidungen fertigungsgerechte und damit kostengünstigere Produkteigenschaften zu erzeugen.

Das Forschungsprojekt AMANIS (Advanced Manufacturing Information System for the Designer) hat die Entwicklung einer entsprechenden wissensbasierten Umgebung zum Ziel. Das Projekt wird von der europäischen Gemeinschaft im Rahmen des Programms Brite-EuRam II über drei Jahre gefördert und vom IMW koordiniert. Im folgenden werden die Ergebnisse nach Ablauf des zweiten Projektjahres vorgestellt.

Within the design about 70 - 80 % of the final product costs are fixed. Depending on the design determinations, a significant share of these costs is caused in the manufacturing. An information system which is able to provide manufacturing experience in a convenient way, could be an efficient decision support tool helping the designer to improve the manufacturing properties and thus to reduce the costs of the designed product.

The research project AMANIS (Advanced Manufacturing Information System for the Designer) aims for the development of a corresponding knowledge based environment. As part of the programme Brite-Eu-Ram II, the project is funded by the European Communities for a period of three years and is coordinated by IMW. In the following the results after two project years are presented.

1. Einleitung

AMANIS verfolgt das Ziel, einen allgemeinen Ansatz zur Bereitstellung von Fertigungserfahrungen in der Konstruktion zu entwickeln. Dabei sollen Methoden

der automatischen Wissensakquisition eingesetzt werden. Das Konsortium dieses europäischen Grundlagenforschungsprojektes setzt sich entsprechend zusammen. Neben dem IMW als Koordinator sind die *National Technical University of Athens - Department of Electrical and Computer Engineering* mit Erfahrungen auf den Gebieten Datenbank-Management- und Expertensysteme sowie die *University of Wales College of Cardiff - School of Engineering* mit den Forschungsschwerpunkten neuronale Netze, Fuzzy Logic und Bilderkennung beteiligt. Ein Systemprototyp (s. Bild 1), der sich zur Zeit in der Implementierungsphase befindet, konzentriert sich auf die Bereitstellung von Informationen über spanabhebende Fertigungsprozesse wie Fräsen, Drehen und Bohren. Die Systemarchitektur ist geeignet, im Rahmen zukünftiger Entwicklungen weitere Fertigungsverfahren zu integrieren.

2. Der "Fertigungsfall"

Ausgehend von einer Analyse der Informationsflüsse in Konstruktion und Fertigung mit Hilfe der *Structured Analysis and Design Technique (SADT)* wurde ein objektorientiertes Modell zur Abbildung relevanter Daten entwickelt. Als Modellierungssprache diente EXPRESS. Das Modell wurde später als Datenbankstruktur in eine objektorientierte Entwicklungsumgebung (*Kappa*) übernommen.

Diese Struktur wurde wesentlich von der Methode des fallbasierten Schließens beeinflusst. Nach [3] versteht man beim fallbasierten Schließen unter einem Fall ein System, das aus einem Problemteil und einem Lösungsteil besteht. Mathematisch gesehen versteht man darunter eine Abbildung der Elemente einer Lösungsmenge auf die Elemente einer Problemmenge. Besteht ein Problem aus mehreren Teilproblemen und setzt sich die Lösung aus mehreren Teillösungen zusammen, so kann ein Fall wiederum aus mehreren voneinander abhängigen oder unabhängigen Fällen bestehen. Ziel des fallbasierten Schließens ist, bei zukünftigem Auftreten gleicher oder ähnlicher Probleme Aussagen über deren Lösung treffen zu können.

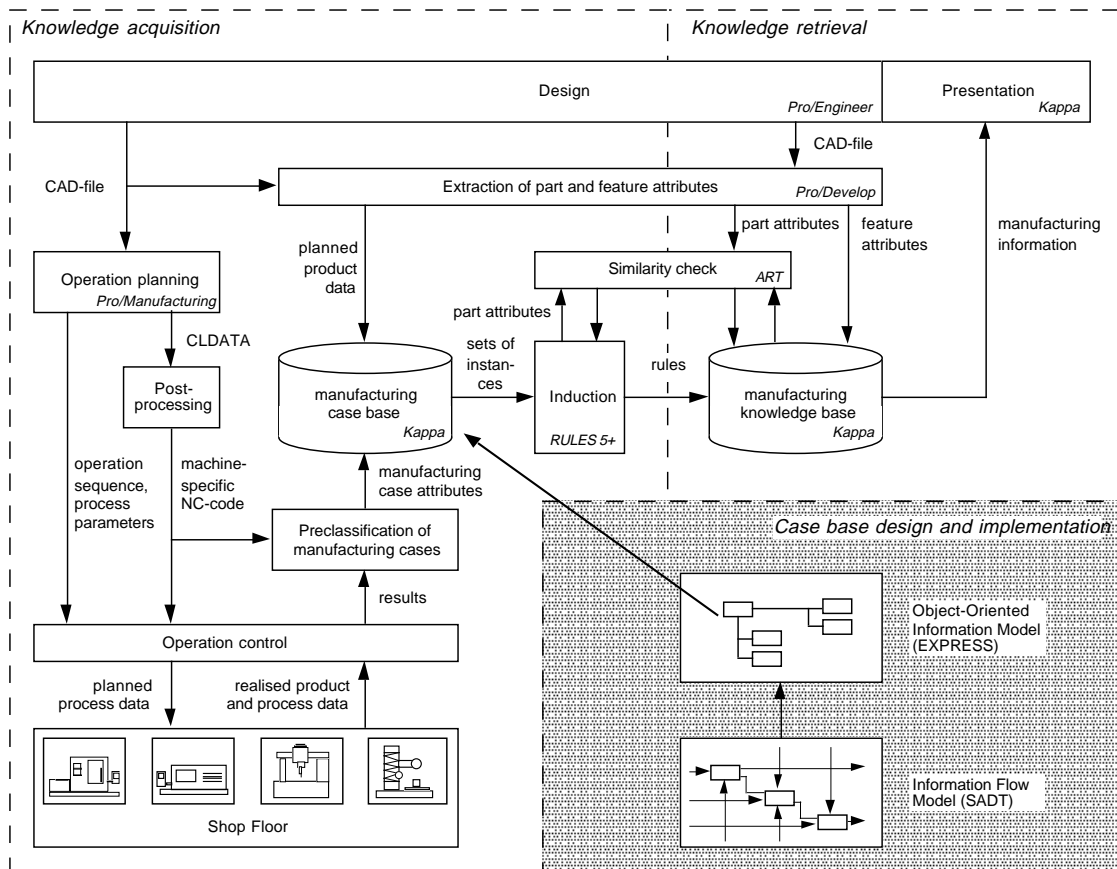


Bild 1 Architektur des Systemprototypen (in der Implementierungsphase)

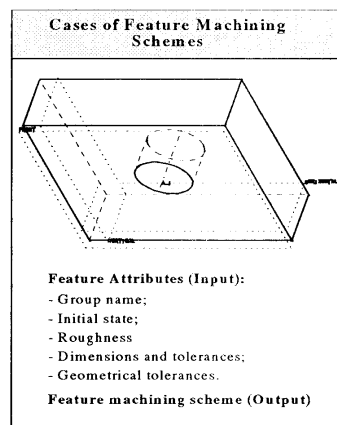
Übertragen auf die Belange von AMANIS bedeutet dies, daß sich bei der Betrachtung eines Fertigungsfalls (*manufacturing case*) der Problemteil aus den Vorgaben der dispositiven Aktivitäten innerhalb der technischen Auftragsabwicklung in Form von Solldaten (*planned data*) und der Lösungsteil aus den Resultaten der operationellen Aktivitäten in Form von Ist-daten (*realised data*) ergibt. Der Problemteil besteht hierbei aus zwei Teilproblemen; zum einen aus den Soll-Produktdaten (*planned product data*) in Form von Festlegungen auf Seiten der Konstruktion bzgl. Bauteilgeometrie, Toleranzen, Werkstoffeigenschaften etc.; zum anderen aus den Soll-Prozeßdaten (*planned process data*) bestehend aus Vorgaben der Arbeitsplanung und -steuerung wie Arbeitsvorgangsfolge, Prozeßparameter, Vorgabezeiten, NC-Programmen und dergleichen. Analog ergeben sich als Teillösungen Ist-Produktdaten (*realised product data*) die über die Qualitätsdatenerfassung dokumentierbar sind sowie Ist-Prozeßdaten (*realised process data*), die in Systemen zur Maschinen- und Betriebsdatenerfassung (MDE/BDE) abgebildet werden. Die schematische Struktur eines Fertigungsfalls ist in Bild 2 dargestellt.

Ein Fertigungsfall gilt als abgeschlossen, wenn sich entweder auf der dispositiven oder auf der operativen Seite Randbedingungen, die sich auf die Fertigungsergebnisse entscheidend auswirken, ändern. Zu diesen Randbedingungen zählen im operativen Bereich insbesondere Rüstvorgänge, die mit einem Loswechsel verbunden sind. Ein Werkzeugwechsel oder eine Ablösung des Maschinenbedieners gehören nicht dazu.

Häufig gelten die Vorgaben aus Konstruktion und Arbeitsplanung über einen längeren Zeitraum, ohne verändert zu werden. Dem gegenüber fallen auf der Basis dieser Vorgaben bei Großserien- und Massenfertigung kontinuierlich sowie bei Fertigung kleiner und mittlerer Serien in regelmäßigen Abständen große Mengen Daten über Fertigungsergebnisse an.

Um die Datenfülle im Zusammenhang mit einem Fertigungsfall zu begrenzen, sind statistische Auswertungen notwendig. Bei kleineren und mittleren Losen können Daten über Fertigungs- und Ausfallzeiten bzw. Störungsursachen für das gesamte Los zusammengefaßt werden. Bei großen Losen müssen die Ergebnisse innerhalb definierter Zeitintervalle statistisch ausgewertet werden.

schiedliche, kontinuierliche oder diskrete Werte annehmen können. Hierzu zählen beispielsweise der Durchmesser, die Länge, der zu zerspanende Werkstoff oder die geforderte Oberflächenqualität. Wenn die Fertigung dieses Featuretyps mit jeweils unterschiedlichen Attributwerten als Bestandteil verschiedener Bauteile geplant und durchgeführt worden ist, und die Fertigungsergebnisse feature-bezogen vorliegen,



Induction



Machining Scheme Selection Rules:	
Rule_1:	IF Feature_group = HO_#1 AND Initial state = "Solid" AND d = [1..28] AND d_tol (IT) = [9..11] AND Ra = [2.5..10] THEN 1) Center drill; 2) Drilling; 3) Reaming
Rule_2:	IF Feature_group = HO_#1 AND Initial state = "Solid" AND d = [28..50] AND d_tol (IT) = [11..13] AND Ra = [5..20] THEN 1) Drilling; 2) Boring;
	...

Bild 4 Durch "induktives Lernen" können aus Resultaten Regeln erzeugt werden

dann ist RULES 5+ in der Lage aus diesen Resultaten "Wenn/Dann"-Regeln zu generieren und diese in einer Wissensbasis abzulegen. Wie diese Regeln für eine Durchgangsbohrung aussehen können, ist in Bild 4 dargestellt. Neben den Informationen zu alternativen Arbeitsvorgangsfolgen können diese Regeln auch Aussagen über Prozeßparameter, Zeiten oder Fehlerwahrscheinlichkeiten enthalten.

Auf der Bauteilebene ist der Vorgang des induktiven Lernens schwieriger, da eine eindeutige Identifikation gleichgearteter Fertigungsfälle nicht - wie bei Features - über eine Typen-Kennung möglich ist. Deswegen wird auf dieser Ebene ein Ähnlichkeitsvergleich über wesentliche Attribute mit Hilfe des neuronalen Netzes *Adaptive Resonance Theory (ART)* durchgeführt. Diese Netzarchitektur ermöglicht es, über definierbare Ähnlichkeitskriterien eingehende (auch unvollständige oder unscharfe) Informationen bestehenden Klassen zuzuordnen. Sollte keine passende Klasse vorhanden sein, wird eine neue angelegt. Der Nachteil von ART besteht allerdings in der notwendigen Beschränkung auf binäre Eingangswerte.

4. Bereitstellung der Fertigungsinformationen

Während der Konstrukteur ein Bauteil mit Feature-Struktur auf dem Bildschirm des CAD-Systems erzeugt, werden in Abhängigkeit von den festgelegten Attributwerten relevante Fertigungsinformationen aus der Wissensbasis mit dem Bauteil und den einzelnen Features verknüpft. Die zugeordneten Fertigungsinformationen können durch betriebswirtschaftliche Daten, wie z.B. Kostensätze oder Termine ergänzt werden. Analog zum Vorgang der Induktion erfolgt auch hier die Identifikation der relevanten Informationen auf Feature-Ebene über die Typen-Kennung und auf Bauteilebene über ART.

Auf diese Weise ist der Konstrukteur in der Lage, jederzeit feature- oder bauteilbezogene Informationen über Arbeitsvorgangsfolgen, notwendige Betriebsmittel, Fertigungszeiten und -kosten abzurufen. Das System wird darüber hinaus in der Lage sein, dem Konstrukteur Veränderungen von Attributwerten (z.B. Toleranzvorgaben) vorzuschlagen, wenn dadurch Fertigungszeiten und/oder -kosten reduziert werden können.

5. Zusammenfassung

Der hier beschriebene Ansatz einer featurebasierten Erfassung von Fertigungsergebnissen, in Verbindung mit den Methoden des fallbasierten Schließens und des induktiven Lernens bietet die Möglichkeit, Fertigungserfahrungen in komprimierter Form als Bestandteil eines Fertigungsarchivs abzulegen. Ein solches Archiv ist nicht nur für die Unterstützung im Konstruktionsbereich geeignet, sondern bildet auch eine ausgezeichnete Basis für automatische Arbeitsplangenerierungs- oder feature-basierte Vorkalkulationssysteme.

Literatur

- /1/ Prengemann, U.: Fertigungsinformationen für die Konstruktion bereitstellen, *ZwF* 88 (1993) 7-8
- /2/ Prengemann, U.; Schmitt, R.: AMANIS - Fertigungsinformationen für die Konstruktion, Mitteilung aus dem Institut für Maschinenwesen Nr. 18, TU Clausthal, 1993
- /3/ Börner, K.; Jantke, K. P.; Schönherr, S.; Tammer, E.-Ch.: Lernszenarien im fallbasierten Schließen *FA-BEL-Report* No. 14, Sankt Augustin 1993 (Gesellschaft für Mathematik und Datenverarb. mbH)
- /4/ Kolodner, J.: *Case-Based Reasoning*, San Mateo, 1993 (Morgan Kaufmann Publishers)

Untersuchungen zum Abbauverhalten von Kunststoffen durch den Einsatz von überkritischem Wasser als Reaktionsmedium im Batch-Betrieb

Neumann, U.

Für das chemische Recycling von Kunststoffen gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Ideen und Vorgehensweisen. Eine Idee ist es, die reaktiven Eigenschaften von überkritischem Wasser, die z.B. bei der Dekontamination von Böden zu erstaunlichen Ergebnissen geführt haben, für das Recycling von Kunststoffen zu nutzen. Ziel dieser Idee ist es, durch den Einsatz von überkritischem Wasser aus Kunststoffabfällen als Recyclingprodukt eine ölarartige Substanz zu erhalten.

1. Aufbau der Versuchsanlage

Um Versuche zu dem Abbauverhalten von Polymeren unter Einsatz von überkritischem Wasser durchführen zu können, wurde im Institut für Maschinenwesen in Zusammenarbeit mit dem Institut für Schweißtechnik eine einfache Versuchsanlage aufgebaut. In **Bild 1** ist die betriebsbereite Versuchsanlage abgebildet.

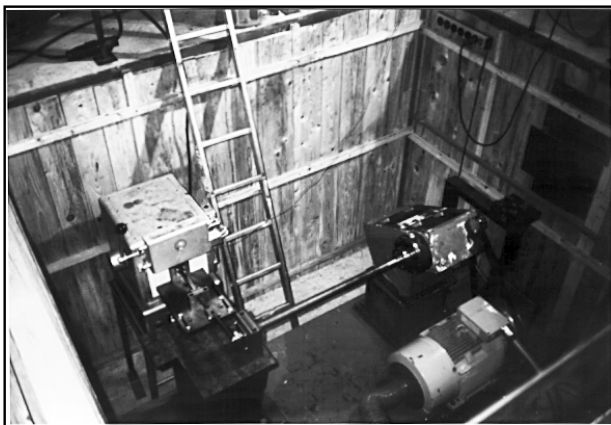


Bild 1: Versuchsanlage für den Abbau von Polymeren durch überkritisches Wasser

Wie in **Bild 1** zu erkennen ist, wird durch einen Motor ein Kurbeltrieb angetrieben, der die Rotationsbewegung der Antriebswelle in eine in horizontaler Ebene oszillierende Bewegung umsetzt. Diese oszillierende Bewegung wird durch eine zweifach gelagerte Schubstange auf den an ihrem freien Ende verschraubten Batch-Reaktor übertragen, der sich in ei-

nem Ofen befindet. In diesem Batch-Reaktor befindet sich Wasser, das abzubauen Polymer, je nach Versuchsplanung ein Katalysator und zwei als Rührelemente eingesetzte Stahlkugeln. Während der Versuche rotiert die Antriebswelle mit 200 min^{-1} , dabei wandelt der Kurbeltrieb die Drehbewegung in eine oszillierende Bewegung mit einem Hub von 100 mm um. Durch diesen Hub bei der genannten Frequenz tritt in dem Batch-Reaktor der gleiche Effekt wie in einer Spraydose auf, die Stahlkugeln vermischen den Inhalt des Reaktors. Durch diesen Aufbau wird vermieden, daß sich während der Aufheizphase Anbackungen an den Reaktorwänden bilden. Zum besseren Verständnis des Aufbaus der Versuchsanlage ist diese noch einmal schematisch in **Bild 2** dargestellt.

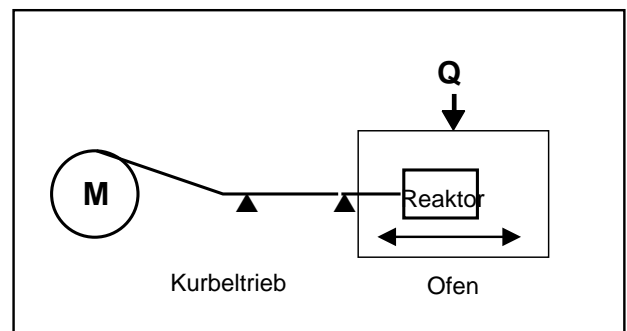


Bild 2: Schematische Darstellung der Versuchsanlage

Der Ofen wird für die ersten Versuche auf eine Endtemperatur deutlich oberhalb der kritischen Temperatur von Wasser aufgeheizt. Die Ofentemperatur wird dabei durch ein im Abstand von 5 mm von dem Batch-Reaktor installiertem Thermoelement überwacht. Um die Aufheizung des Reaktionsraums des Batch-Reaktors kontrollieren zu können, wurde bei einem Versuch ein Thermoelement in einer Bohrung im Batch-Reaktor installiert, deren Tiefe und Randabstand die Position des Reaktionsraums simulierte. Aus Dichtigkeits- und Sicherheitsgründen wurde keine direkte Temperaturmessung im Reaktionsraum vorgenommen. Die Ergebnisse der Temperaturmessung während der ersten Versuche sind in **Bild 3** zusammengefaßt.

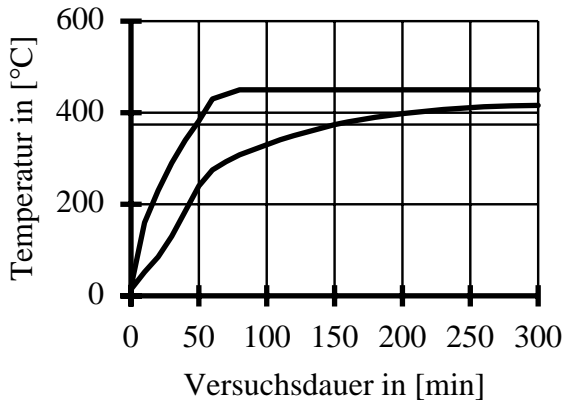


Bild 3: Verläufe der Ofen- und der Reaktorinnentemperatur bei den ersten Versuchen

Wie die Temperaturverläufe in **Bild 3** verdeutlichen, erreicht im Gegensatz zu der schnell ansteigenden Ofentemperatur die Reaktorinnentemperatur bei dieser Versuchsanordnung erst nach ca. 160 min die kritische Temperatur von Wasser.

Wenn ein Gefäß ein konstantes Volumen besitzt, mit Wasser gefüllt wird und auf eine Temperatur von 374,15°C aufgeheizt wird, so ergibt sich ein Innendruck von 225,65 bar, d.h., der kritische Punkt von Wasser ist erreicht /1/. Theoretisch müßte es nun ausreichend sein, den Parameter Temperatur in den überkritischen Bereich hinein zu verändern, um überkritisches Wasser zu erhalten. Praktische Erfahrungen haben jedoch gezeigt, daß eine einfache Temperaturerhöhung häufig nicht ausreichend ist, um Wasser im überkritischen Zustand zu erhalten. Vielmehr besteht bei dieser Vorgehensweise die Wahrscheinlichkeit, daß die Temperaturerhöhung entlang der Dampfdruckkurve von Wasser verläuft, ohne daß der Zustand überkritisch wird. Um dies zu vermeiden, hat es sich bewährt, bereits bei Raumtemperatur vorverdichtetes Wasser für diese Art von Versuchen einzusetzen /2/.

Diese für die Versuche notwendige Vorverdichtung wird durch eine entsprechende konstruktive Ausführung des Batch-Reaktors erreicht. In **Bild 4** ist einer der eingesetzten Batch-Reaktoren abgebildet. Wie zu erkennen ist, wird der Deckel des Reaktors mit sechs Schrauben fixiert. Durch Einsatz dieser hohen Anzahl von Schrauben und der Auswahl eines geeigneten Dichtungswerkstoffes in Zusammenhang mit einer speziellen Dichtungsgeometrie wird ein versuchsfertig befüllter Reaktor wasser- und druckdicht

verschlossen und gleichzeitig auf einen Innendruck von ca. 10 MPa gebracht. Durch diese Vorgehensweise ist gewährleistet, daß unter den Versuchsbedingungen nach Erreichen einer Reaktorinnentemperatur oberhalb der kritischen Temperatur von Wasser überkritisches Wasser im Reaktor vorliegt.



Bild 4: Eingesetzter Batch-Reaktor

2. Versuchsergebnisse

Ziel der Untersuchungen war es, nachzuweisen, daß durch den Einsatz von überkritischem Wasser ein Abbau der langkettigen Kunststoffmoleküle erreicht werden kann.

Material	prozentualer Anteil im Hausmüll
PE	45,5%
PP	19,5%
PS	15,0%
PVC	10,0%
Sonstige	10,0%

Tab.1: Zusammensetzung der Kunststoffabfälle /3, 4/

Die Untersuchungen wurden, entsprechend ihrer Anteile im Hausmüll (vergleiche Tab.1) mit den Kunst-

stoffen PE (Polyethylen), PP (Polypropylen), PS (Polystyrol) und PVC (Polyvinylchlorid), die als Rohgranulat zur Verfügung standen, durchgeführt. Durch den hohen Anteil von PE im Hausmüll wurden die ersten Versuche ausschließlich mit diesem Kunststoff durchgeführt. In Rahmen dieser Versuche konnte gezeigt werden, daß der Abbau von Kunststoffen durch den Einsatz von überkritischem Wasser möglich ist, und welchen Einfluß die Zugabe eines Katalysators auf den Reaktionsablauf, bzw. auf die entstehenden Produkte hat.

Der Einsatz von PE und Wasser als Edukte ohne den Zusatz eines Katalysators führte zu einem sehr hohen Anteil eines gasförmigen, leicht brennbaren Produkts, zu einem geringen Anteil (ca 15Vol.%) einer wasserhellen Flüssigphase, bestehend aus überstöchiometrischem Wasser und leichtsiedenden Kohlenwasserstoffverbindungen sowie einer schwarzen, pastenartigen und brennbaren Substanz. Diese Produktpalette entspricht jedoch nicht der Zielsetzung, einen möglichst hohen Anteil einer ölartigen Substanz als Abbauprodukt zu bekommen.

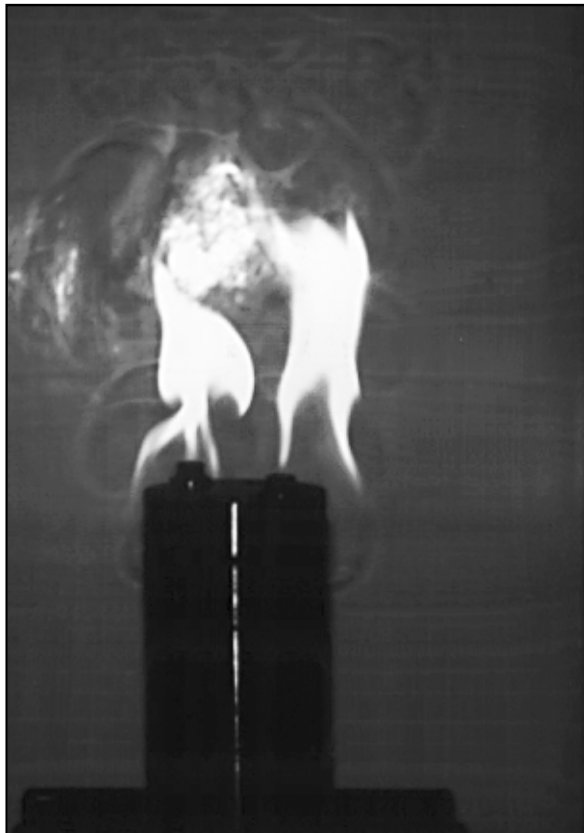


Bild 5: Austragen der brennbaren Gase beim Öffnen des Reaktors

Durch die Zugabe eines Katalysators konnte festgestellt werden, daß sich die Produktpalette in Richtung

Flüssigphase verschiebt. Trotzdem entstand auch bei dieser Versuchsanordnung zunächst ein hoher Anteil eines gasförmigen, leicht brennbaren Produkts. Die dabei entstandene Flüssigphase besteht aus einem niedrigviskosem Öl und einem Gemisch, bestehend aus überstöchiometrischem Wasser und leichtsiedenden Kohlenwasserstoffverbindungen, die sich mit dem Katalysator und den schwarzen, pastenartigen Abbaustoffen des PE intensiv vermischt hat.

Durch gezieltes Verändern der Temperatur und der Massenanteile der Edukte, konnte erreicht werden, daß sogar beim Einsatz eines Kunststoffgemischs bestehend aus 58% PE, 24% PP und 18% PS (Diese Mengenanteile wurden entsprechend Tab.1 berechnet) als Produkte nur eine Gasphase, eine Ölphase und eine Wasserphase entstehen. Das Entstehen fester Abbauprodukte konnte vermieden werden.

Um einen größeren Praxisbezug zu erreichen, wurde die Versuchsanordnung dahingehend verändert, daß bei gleichbleibendem Kunststoffgemisch (58% PE, 24% PP, 18% PS) kein Kunststoffgranulat mehr eingesetzt wurde, sondern Kunststoffabfälle, wie sie im Gelben Sack vorliegen. Um den Einsatz der Kunststoffabfälle im Batch-Reaktor zu ermöglichen, wurden diese vor Versuchsbeginn zerkleinert. Grundsätzlich zeigte sich das gleiche Ergebnis wie bei den Versuchen mit Kunststoffgranulat, jedoch hatten die in den Kunststoffabfällen enthaltenen Farbstoffe zu einem Anteil an verkokten Partikeln in der Ölphase geführt.



Bild 6: Bestandteile des Gelben Sacks

Als Abschluß der Untersuchungen im Batch-Betrieb wurde erneut ein Granulatgemisch eingesetzt, jedoch mit veränderter Zusammensetzung. Um den Einfluß des in manchen Hinsichten umstrittenen Kunststoffes PVC zu ermitteln, wurde ein Gemisch mit der Zusam-

mensetzung 50,6% PE, 21,7% PP, 16,7% PS und 11% PVC (Diese Mengenanteile wurden entsprechend Tab.1 berechnet) eingesetzt. Als Abbauprodukte entstanden bei diesem Versuch wie bei den Versuchen zuvor eine brennbare Gasphase, eine Öl- und eine Wasserphase. Zudem trat ein geringer Anteil an verkockten Partikeln auf. Eine Analyse der erzeugten Abbauprodukte und des Werkstoffes des Batch-Reaktors wird zeigen, ob und in wie weit der normale, im Hausmüll anliegende PVC-Anteil die Produktpalette beeinträchtigt und/oder zu besonderen Werkstoffanforderungen führen wird.

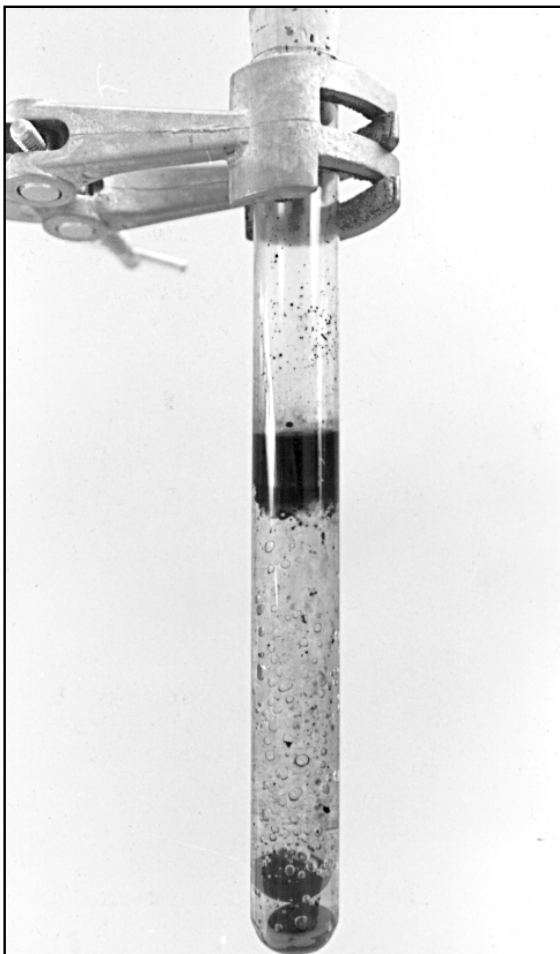


Bild 7: Die entstandene Ölphase schwimmt auf dem mit Gasblasen versetzten Wasser. Unten sind die Rührkugeln zu erkennen

3. Zusammenfassung und Ausblick

In Batch-Versuchen konnte nachgewiesen werden, daß durch den Einsatz von überkritischem Wasser hervorragende Ergebnisse bei dem Abbau von Kunststoffen erzielt werden. Die Anforderung, als Abbauprodukt eine ölarartige Substanz, zu erhalten, wurde

vollständig erfüllt. Mit diesen Untersuchungen ist ein erster Schritt zu einem zukunftsträchtigem Recyclingkonzept für vermischte Kunststoffabfälle getan, bei dem der Aufgabestoff zu 100% aus Kunststoffabfällen besteht. Durch den Einsatz von Wasser als Reaktanden bietet sich eine weitaus billigere Alternative zu dem teuren, bisher eingesetzten Wasserstoff. Die bei allen Versuchen entstandene Gasphase spielt auch für die Planung kontinuierlich zu betreibender Anlagen eine große Rolle, da durch ihre energetische Nutzung für den Prozeß eine sehr günstige Gesamtenergiebilanz einer solchen Anlage entsteht. Die gewonnene Ölphase kann in bereits bestehenden petrochemischen Anlagen zu völlig neuen, auch höherwertigen Produkten weiterverarbeitet werden, was dem Grundgedanken des Recycling-Konzeptes entspricht, während überstöchiometrisches Wasser im Kreislauf geführt werden kann.

4. Literatur

- /1/ Ernst Haage Apparatebau GmbH & Co KG
Flüssigkeitsfüllung von Druckbehältern
- /2/ Dipl.-Ing. A. Firus
Unv. Unterlagen
Technische Universität Hamburg-Harburg
Arbeitsbereich Thermische Verfahrenstechnik
- /3/ VKW Staufen-Folien Vereinigte Kunststoffwerke GmbH
7805 Bötzingen a.K.
Firmenprospekt 1993
- /4/ Klaus Kannoffsky,
BASF Presseinformation "PVC und seine wirtschaftliche Bedeutung", 3. Dez. 92

SIMDES - Ein neues Konzept zur Steuerung und Regelung verfahrenstechnischer Anlagen

Romann, M.

Im Projekt SIMDES soll am Beispiel eines Entschwefelungsprozesses die Eignung neuronaler Netze für die Überwachung und Regelung verfahrenstechnischer Anlagen geprüft werden. Der untersuchte Prozeß ist relativ unkompliziert und kann daher in einem Rechnermodell nachgebildet werden. Das Rechnermodell trainiert zunächst das neuronale Netz, bis dieses in voergleichbarer Weise auf die Eingabegrößen reagiert. Im zweiten Schritt modelliert das Netz den realen Prozeß. Die Differenz zwischen der Modellrechnung und dem realen Prozeß wird als Regeldifferenz auf einen Regler zurückgeführt, der wiederum die Stellglieder der Anlage bedient. In diesem Testbetrieb zeigt sich, ob das Modell des Prozesses ausreicht, ein Netz zu trainieren und ob das neuronale Netz anschließend "lernt" mit dem realen Prozeß und dem Regler zurechtzukommen. Und: wird ein neuronales Netz imstande sein, den Prozeß zu optimieren?

The project SIMDES will show the suitability of neural nets for the control of process engineering machinery. The investigated example process is a less complicated chemical desulphurisation process of an exhaust gas. The first step includes the running of the process to gain the real process parameters and their behaviour. After this a neural net based model of the process is worked out and is trained with the results of the real process. The output of the working model will be compared with the real values of the process and the difference will be the feedback for the regulator of the entire process. SIMDES reaches its goal if the model and the regulator collaborates clearly in order to reach a stable running of the chemical process for desulphurisation.

1. Einleitung

Die moderne Verfahrenstechnik verwirklicht Prozesse, die eine immer größer werdende Zahl aufeinanderfolgende Verfahrensschritte erfordern. Die Anlagen zu diesen Prozessen bilden hochkomplexe Systeme des Energie- und Stofftransports, in denen zu-

nehmend Teilströme zurückgeführt werden, oft aus Gründen der Wiederverwertung von Hilfsstoffen oder zur effektiveren Nutzung von Energie. Eine Beschreibung und Modellierung derartiger Systeme ist nur dann vollständig möglich, wenn die nichtlinearen und vorallem rückgekoppelten Strukturelemente und deren Interdependenzen vorhanden und verstanden sind. sind alle notwendigen Parameter bekannt und deren Wechselwirkungen untereinander ausreichend beschreibbar, dann ist ein deterministischer Programm in der Lage, die Anlage zu regeln.

Eine derartige, vollständige Beschreibung mag für jede einzelne Prozeßstufe gelingen, eine Entkopplung aller Prozeßstufen voneinander, z. B. durch Einfügen von Speicherbehältern, reduziert im Extremfall den Steuerungs- und Regelungsaufwand auf die einzelnen Stufen, das Verfahren wird jedoch unflexibel und lagert große Materialmengen. Ein optimal und flexibel gesteuerter Prozeß erfordert daher die Betrachtung der Anlage als Gesamtsystem.

Ein entsprechend komplizierter Prozeß entzieht sich jedoch oftmals einer vollständig automatisierten Steuerung. Es ist zwar möglich, mithilfe einer hochentwickelten Meß- und Regelungstechnik den stabilen Betrieb einer Anlage zu automatisieren, dennoch greift der Betriebsleiter korrigierend ein, wenn beispielsweise die Qualität des Produkts nachzulassen beginnt, die Steuerungstechnik jedoch nicht in der Lage ist, eine optimale Möglichkeit zur Korrektur auszuwählen und umzusetzen.

Die „Erfahrung“ des Betriebsleiters und dessen „Gefühl“ für den Prozeß bleiben unverzichtbare Elemente einer optimalen Prozeßführung. Die Entwicklung der Informationstechnologie in den letzten Jahren zeift jedoch, daß selbst diese Felder nicht auf den menschlichen Beobachter beschränkt bleiben müssen. Eine Nachbildung menschlicher Eigenschaften erlauben neue Softwaretechnologien, die unter den Bezeichnungen „Fuzzy Logic“ und „neuronaler Netze“ bekannt wurden und zunehmend Eingang in die Industrie finden.

2. Entschwefelung

Am Institut für Energieverfahrenstechnik an der TU Clausthal besteht seit einigen Jahren fundiertes Know-How in der Entschwefelung von Rauchgasen /1/. Hier wird anhand einer Technikumsanlage ein schwefeldioxidhaltiges Rauchgas simuliert, das anschließend einer Entschwefelung mit Feststoffadditiven auf Calciumbasis unterzogen wird.

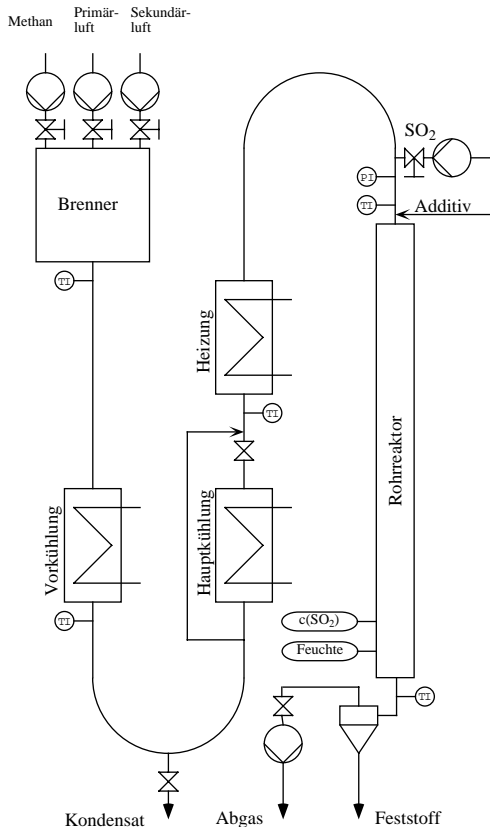


Bild 1: Technikumsanlage

Die Anlage verfügt über einen Methangasbrenner, in dem je Stunde ca 5 m³ Erdgas verbrannt werden und damit eine thermische Leistung von 50 kW erbringt. Die Konditionierung des Rauchgases geschieht über 2 hintereinandergeschaltete Wärmetauscher, eine Tauchrohrheizung und einen Bypass um den zweiten Wärmetauscher. Diese Anlagenteile ermöglichen die Einstellung der Temperatur und der Feuchte des Rauchgases, bevor es in den Rohrreaktor eintritt. Vor dem Eintritt in die Reaktionszone wird soviel Schwefeldioxid beigemischt, so daß im Rauchgas eine Konzentration von 900 bis 1000 ppm erreicht wird. Das Rauchgas durchströmt einen statischen Mischer und wird gleich danach mit dem Additiv in innigen Kontakt gebracht. Die Zufuhr des feinkörnigen Additivs leistet ein Injektor, der nach dem Diffusionspumpenprinzip arbeitet und die Partikel mithilfe von Preßluft dispergiert und in die Gasströmung einbläst.

Nach 2m Reaktionsstrecke, die typisch in 1,8 Sekunden zurückgelegt werden, scheidet ein Zyklon den Feststoff aus der Gasströmung ab. Hernach zieht ein Saugzuggebläse das entschwefelte Rauchgas durch ein Feinfilter. Entschwefelt und entstaubt tritt das Rauchgas ins Freie.

Am Ende der Reaktionsstrecke befindet sich die Probenahmestelle, an der die Feuchte und die Zusammensetzung des Rauchgases überwacht werden. Zur Bilanzierung der Anlage werden zusätzlich sämtliche Massenströme bestimmt, sowie an mehreren Stellen die Temperaturen überwacht /2/. Alle Meßgrößen bilden später den Input für ein Neuronales Netz, dem die Steuerung und Regelung dieses Beispielprozesses obliegt.

3. Anforderung an die Steuerung

Die Entschwefelung des Rauchgases sollte energetisch und wirtschaftlich möglichst optimal arbeiten. Das bedeutet, daß minimale Mengen zusätzlicher Chemikalien benötigt werden und möglichst wenig Energie für den Entschwefelungsprozeß aufgewendet werden soll. Die resultierende Konzentration von Schwefeldioxid im entschwefelten Rauchgas hängt von mehreren Prozeßparametern ab, insbesondere von der Temperatur, der Feuchte, dem Druck und dem molaren Verhältnis Additiv zu Schwefel. Die Schwefeldioxidkonzentration ist also eine mehrdimensionale Funktion, die unterschiedliche Optima aufweisen kann, daneben aber auch Restriktionen unterliegt, wie z. B. den Grenzen der Prozeßparameter und physikalischen Gesetzen. Durch Reihenversuche, bei denen jeweils der Einfluß eines Prozeßparameters untersucht wird, können günstige Betriebszustände aufgefunden werden.

Eine einfache Meß- und Regelungstechnik ermöglicht den stabilen Betrieb der Anlage. Betriebsschwankungen oder -störungen können jedoch nur begrenzt aufgefangen werden. Hierzu soll ein neues Konzept verfolgt werden, das eine weitergehende Steuerung und Regelung des Prozesses ermöglicht: eine Anwendung neuronaler Netze /3/.

4. Neuronale Netze

Die moderne Informationstechnologie hat in den letzten Jahren gezeigt, daß es möglich ist, einige Aspekte von Funktionen des menschlichen Gehirns auf Computern zu simulieren. Dabei hielt man sich eng an die Erkenntnisse der Biologie, die das Neuron als eines

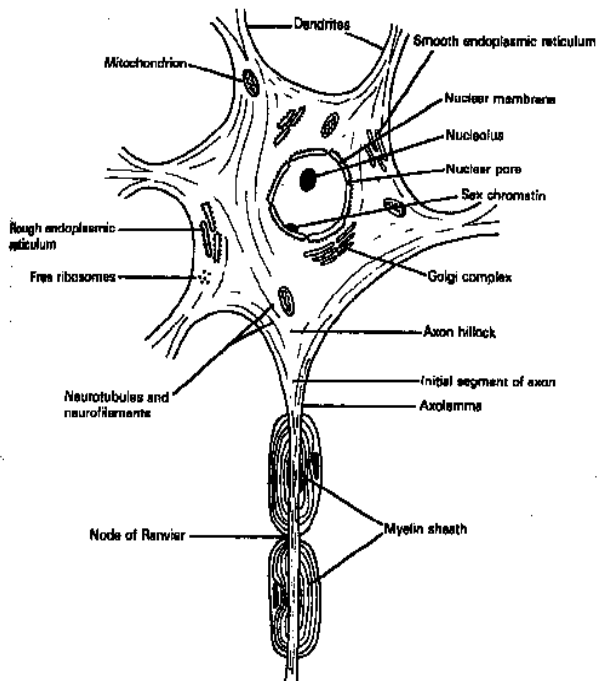


Bild 2: Neuron

der Grundelemente des Gehirns erkannt hatte.

4.1 Das Neuron

Der typische Aufbau eines Neurons ist in **Bild 2** gezeigt. Die Dendriten bilden die Eingänge zu der Gehirnzelle, deren Axon den einzigen Ausgang bildet. Der Axon selbst verzweigt sich in viele Äste, die über Synapsen wiederum mit den Dendriten anderer Neuronen in Verbindung stehen. Diese vereinfachte Darstellung zeigt den prinzipiellen Aufbau des neuronalen Netzes im Gehirn, das in Wirklichkeit noch eine Reihe weiterer Strukturelemente umfaßt. Welche Leistung von einem neuronalen Netz erwartet werden kann, zeigt ein Vergleich der Leistung von Gehirnzellen und Computern: Die Signalgeschwindigkeit im Axon beträgt ca 100 m/s und die minimale Zeit zwischen zwei Impulsen beträgt ungefähr 1 Millisekunde /4/. Die

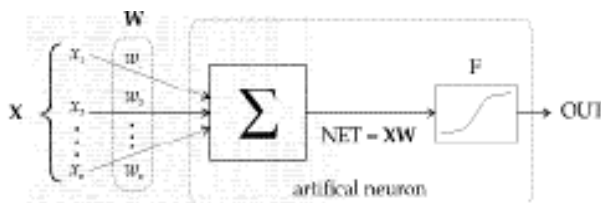


Bild 3: Modell eines Neurons

Signalgeschwindigkeiten in Mikrochips liegen hingegen einige Zehnerpotenzen höher. Es ist zur Zeit jedoch ausgeschlossen, ein neuronales Netz mit mehr als 100 Milliarden Neuronen rechnergestützt zu simulieren.

Bild 3 zeigt ein künstliches Neuron, wie es in der Programmieretechnik eingesetzt wird. Der Vektor x stellt die Eingangsgrößen dar, die von außen an das Neuron herangeführt werden. Jede Eingangsgröße wird gewichtet. Der Vektor w mit den Gewichten stellt dabei den variablen Teil des Neurons dar, da diese Gewichte während der Trainingsphase des Netzes immer wieder verändert werden. Die Summe aus den Produkten von Eingangsgrößen mal deren Gewichte ergibt den Eingangsparameter der Funktion F , deren Wert den Ausgang des Neurons widerspiegelt. Eine gebräuchliche Ausgangsfunktion F mit dem Eingangsparameter NET und dem Funktionswert OUT für ein künstliches Neuron ist beispielsweise in der Form

$$OUT = \frac{1}{(1 + e^{-NET})}$$

gegeben.

Ein einzelnes Neuron ist somit in der Lage, einen gewichteten Entscheidungswert abhängig von einer Anzahl Eingangsparameter zu liefern. Die Entscheidung beruht dabei auf „Erfahrungswerten“, die in dem Gewichtungsvektor und der Ausgangsfunktion gespeichert sind. Damit lassen sich bereits sehr einfache Aufgaben erfüllen. Die eigentliche Leistung erwächst aber erst aus einem Netz von Neuronen.

4.2 Netztopologie

Der Aufbau eines einfachen neuronalen Netzes zeigt **Bild 4**. Dieses Netzwerk setzt sich aus einem Eingangs- und einem Ausgangs-layer zusammen. Der Eingangs-layer liefert jedem Neuron des Ausgangs-layers einen gewichteten Eingangswert, er verteilt damit die Eingangswerte. Die Neuronen des Ausgangs-layers wiederum gewichten ebenfalls ihre Ein-

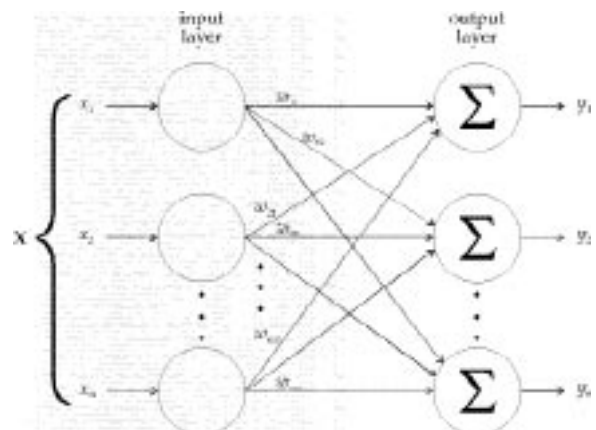


Bild 4: Neuronales Netz aus 2 Layern

gangswerte, so daß w nunmehr eine Matrix bildet. Das Netz ist voll untereinander vernetzt, d. h. daß alle Neuronen untereinander verbunden sind. Eine volle Vernetzung wird jedoch selten verwirklicht, da der Programmier- und Rechenaufwand mit steigender Zahl von Neuronen überproportional zunimmt /5/.

5. Modellbildung

Zur Bildung des Modells müssen Experimente mit der Entschwefelungsanlage durchgeführt werden, um experimentelle Daten zu sammeln, auf deren Basis das neuronale Netz trainiert wird /6/. Während des Trainings „lernt“ das Netz den Entschwefelungspro-

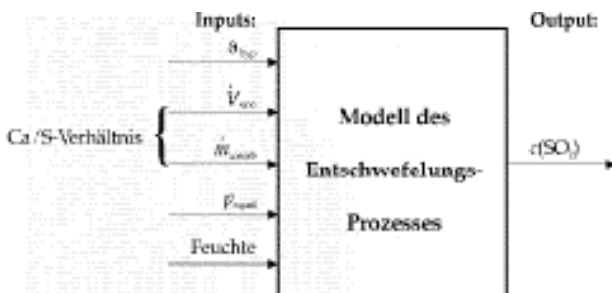


Bild 5: Black-Box-Modell

zeß zu simulieren, indem es die Elemente der Gewichtungsmatrix w in einem ständig wiederholten Durchlauf neu festlegt, bis letztlich der Output des Modells sich dem Output des realen Prozesses annähert.

6. Anbindung an einen Regler

Die Differenz zwischen dem Output des Modells und dem tatsächlichen Prozeßparameter kann als Regeldifferenz über einen Filter auf einen Regler zurückge-

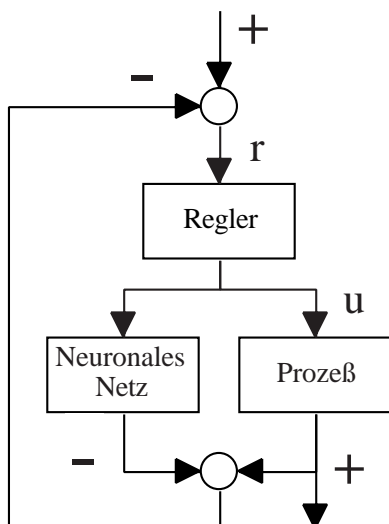


Bild 6: Anbindung des neuronalen Netzes

geben werden /7/. **Bild 6** zeigt eine einfache Möglichkeit, wie ein neuronales Netz im Verbund mit einem Regler arbeiten kann. Der Regler selbst kann ebenfalls auf einem neuronalen Netz basieren, aufgrund des hohen Aufwands ist das aber bisher nur selten realisiert worden.

SIMDES hat sich zum Ziel gesetzt, die Anbindung eines neuronalen Netzes in einen Regelkreis zu erarbeiten.

7. Zusammenfassung

In diesem kurzen Überblick wurde die zukünftige Arbeit im Projekt SIMDES, das gerade angelaufen ist, in ihren Grundzügen umrissen. Die Anwendung neuronaler Netze ist bereits in einigen Labors erfolgreich realisiert worden, wo abstrakte Vorgänge, wie z. B. die Muster- oder Bilderkennung, rechnergestützt automatisiert werden konnten. Neuronale Netze werden in Zukunft auch Gebiete der industriellen Anwendung erschließen.

Literatur

- /1/ Th. Hünlich, R. Jeschar, R. Scholz
Sorptionsskinetik von SO_2 aus Verbrennungsabgasen bei niedrigen Temperaturen
Zement-Kalk-Gips 39 (1986), Nr. 5, S. 251-258
- /2/ Robert H. Perry
Perry's Chemical Engineers' Handbook
Sixth Edition, MacCraw-Hill, 1984
- /3/ Mitsuru Takeshita, Herminé Soud
FDG Performance and experience on coal-fired plants
London, IEA Coal Research 1993
- /4/ Wilkinson, J. L.
Neuroanatomy for medical students
London, Boston, Singapore, Sydney, Wright 1986
- /5/ Pham, D. T.
Neural Networks in Engineering, Cardiff
- /6/ Liu, Xing
System identification and prediction using neural networks
Thesis at the Intelligent Systems Research Laboratory of the University of Wales, College of Cardiff, 1993
- /7/ Yang, Y. Y., Linkens D. A.
Adaptive neural-network-based approach for the control of continuously stirred tank reactors.
IEEE Proceedings Control theory and applications, Vol. 141, 1994, pp. 341-349

Trägheitslose Messung von Temperatur, Massen- und Volumenfluß in Gasen durch Ultraschall

Barth, H.-J.; Jeschke, D.

Die Schallgeschwindigkeit ist eine charakteristische physikalische Stoffgröße. In Gasen läßt die Schallgeschwindigkeit Rückschlüsse auf die Temperatur zu. In Kombination mit einem Druckaufnehmer läßt sich eine Meßanordnung aufbauen, die kontinuierlich und trägheitslos Temperatur, Volumen- und Massenstrom bestimmt. Dem Benutzer sind so die wichtigsten thermodynamischen Zustandsgrößen des Gases zugänglich.

The sound velocity is a physical value for any kind of material. Especially in gases the sound velocity will allow to make conclusions about the temperature. In combination with a manometer it is possible to measure temperature, volume flow rate and mass flow rate continuously and without time lag.

1. Einleitung

Die meßtechnische Erfassung dynamischen Gasverhaltens erfordert eine schnelle Meßwerterfassung von zwei der drei Größen aus der allgemeinen Gasgleichung:

$$pv = RT$$

Die Gesamtdauer gasdynamischer Änderungsvorgänge liegt im Millisekundenbereich. Eine geeignete Meßwerterfassung muß in der Lage sein, mit einer deutlich niedrigeren Ansprechzeit zu arbeiten. Die Druckmessung bereitet in dieser Hinsicht keinerlei Probleme. Hier werden Antwortzeiten bis zu 0,1ms erreicht /1/. Das spezifische Volumen und das absolute Volumen lassen sich zwar zuverlässig bestimmen, aber nicht mit der erforderlichen Genauigkeit und Geschwindigkeit.

Damit bleibt eine Lösung des Problems der Temperaturmessung überlassen. Hierfür wird üblicherweise ein Referenzkörper oder eine Referenzflüssigkeit auf

die Temperatur des zu messenden Objektes gebracht. Durch die Ausdehnung kann dann anhand einer Eichkurve die Temperatur abgelesen werden. Nachteilig ist die Trägheit solcher Systeme, die trotz einer Minimierung der Referenzmasse im Sekundenbereich liegt.

Eine Verbesserung wird durch den Einsatz von sogenannten Thermoelementen erreicht. Hier wird durch die Temperatur eine Spannung an einer Lötstelle mit zwei unterschiedlichen Materialien verursacht. Der Einsatz von 0,045mm dicken Sensordrähten ergibt eine Antwortzeit von 35ms /2/.

Im folgenden soll der Ansatz einer Temperaturmessung über die Schallgeschwindigkeit weiter verfolgt werden und zu einer Volumen- und Massenflußmessung ausgebaut werden.

2. Theorie

2.1 Temperaturbestimmung

Die Schallgeschwindigkeit hängt bei idealen Gasen nur von der Temperatur ab.

$$a = \sqrt{\kappa RT}$$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

Um die Ergebnisse allgemeiner verwenden zu können, wird die Herleitung für vollkommene Gase gemacht /3/. Das bedeutet **konstante spezifische Wärme**. Luft als Arbeitsmedium der Pneumatik erfüllt diese Voraussetzungen.

Die Umformung des **1. Hauptsatzes der Thermodynamik für einen stationär durchströmten Kontrollraum** führt zu dem sogenannten Energiesatz von Bernoulli:

$$c dc + \frac{dp}{\rho} = 0$$

$$\frac{c^2}{2} + \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho} = 0$$

$$\int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$

$$\Rightarrow c^2 = \frac{2\kappa}{\kappa-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]$$

Der Werte c entspricht der Strömungsgeschwindigkeit des Fluides.

Die Schallgeschwindigkeit, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer **kleinen** Störung im Gas, ist definiert durch:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\partial \rho(p, S)}{\partial p} \rightarrow a^2 = \left(\frac{dp}{d\rho} \right)_{S=const.} = \kappa \frac{p}{\rho}$$

Unter der Bedingung einer isentropischen Zustandsänderung ergibt folgenden Zusammenhang zwischen Druck, spez. Dichte und Temperatur:

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\kappa = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

Damit errechnet sich die Schallgeschwindigkeit aus folgendem Zusammenhang:

$$\kappa \frac{p_0}{\rho_0} - \frac{\kappa-1}{2} c^2 = \kappa \frac{p_0}{\rho_0} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$a^2 = \kappa \frac{p_0}{\rho_0} - \frac{\kappa-1}{2} c^2$$

Dieser Ausdruck, der die Schallgeschwindigkeit beschreibt, wird nun in die Bernoullische Gleichung eingesetzt.

Die Verwendung der allgemeinen Gasgleichung ersetzt Druck und spez. Dichte durch die Temperatur und ergibt eine Gleichung, bei der nur noch die Schallgeschwindigkeit und die Geschwindigkeit des Fluids als Meßgrößen vorkommen. Die Gaskonstante und Kappa sind feste Größen, die nicht von Druck oder Dichte abhängen. Die geforderte Meßgröße **Temperatur** läßt sich jetzt mit folgender Formel berechnen:

$$T = \frac{a^2}{\kappa R} + \frac{\kappa-1}{2\kappa R} c^2$$

Für Luft als Einsatzmedium ergeben sich folgende Werte für die Konstanten:

$$\kappa = 1,405$$

$$R = 287,1 \frac{m^2}{s^2 K}$$

2.2 Bestimmung des Massenflusses

Die Bestimmung der Temperatur in einem Fluid über die Schallgeschwindigkeit erfordert die gleichzeitige Ermittlung der Fluidgeschwindigkeit. Wenn jetzt noch parallel dazu der Druck im Fluid gemessen wird, kann man aus der allgemeinen Gasgleichung sowohl den Volumenfluß als auch den Massenfluß berechnen.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= Ac \\ p v &= RT \\ p &= \rho RT \\ \rho &= \frac{p}{RT} \\ \dot{m} &= \frac{pAc}{RT} \end{aligned}$$

3. Meßanordnung

Die Messung der Schallgeschwindigkeit erfolgt in einer schräg zur Fließrichtung des Mediums angebrachten Anordnung der Ultraschallsender/-empfänger (**Bild 3.1**).

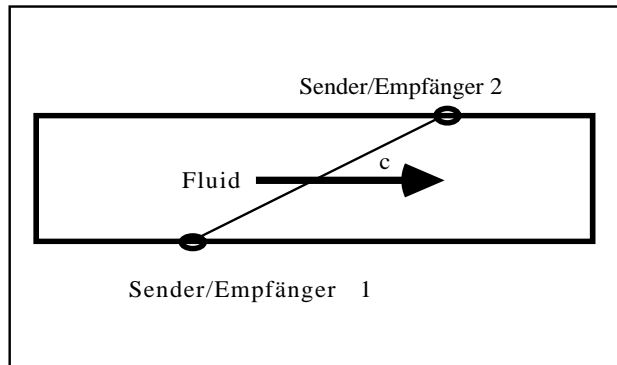


Bild 3.1 Meßanordnung für die Temperaturmessung

Der Vorteil dieser Meßanordnung liegt darin, daß Schallgeschwindigkeit und Geschwindigkeit des Fluides durch die gleiche Messeinrichtung bestimmt werden können. Durch einen Vergleich der beiden Laufzeiten ist es auch möglich, die Fließrichtung des Mediums zu bestimmen.

In einem Meßumformer werden dann die Laufzeiten, einmal in Fließrichtung und einmal gegen die Fließrichtung, verwendet, um Schallgeschwindigkeit und Fluidgeschwindigkeit zu berechnen. Zusätzlich wird der Meßwert des Druckaufnehmers verwendet, um den Volumenstrom bzw. den Massenstrom zu ermitteln.

Am Institut für Maschinenwesen entsteht zur Zeit eine Meßstrecke nach obigem Meßprinzip. Dazu wurde ein geeignetes Ultraschallmeßgerät beschafft und modifiziert, so daß jetzt die Fluidgeschwindigkeit und die Schallgeschwindigkeit synchron ausgegeben werden. Zusätzlich wurde in die Prüfstrecke eine Druckmeßdose eingebaut. Zur Kontrolle ist ein Pt100-Thermoelement eingesetzt worden, mit dem auch die Eichung durchgeführt wird. Die Meßwerte für Schallgeschwindigkeit, Fluidgeschwindigkeit, Druck und

Temperatur werden an eine Meßwerterfassungskarte übermittelt und dort aufbereitet. Aus den Laufzeiten des Ultraschallsignals werden die Schallgeschwindigkeit und die Fluidgeschwindigkeit ermittelt. Mit diesen Ergebnissen lassen sich dann die Temperatur und, unter Einbeziehung des Druckwertes, der Massenstrom berechnen.

Das Meßgas ist normale Druckluft. Sie kann in einem geschlossenen Rohrsystem gefahren werden. Umwälzgeschwindigkeit und Temperatur können, in einem bestimmten Rahmen, variiert werden. In einer anderen Anordnung expandiert die Druckluft über einen Druckminderer und das Meßgerät ins Freie. Zur Eichung des Gerätes und zur Ermittlung der Eckdaten werden sich die ersten Versuch auf stationäre Zustände beschränken und durch das Pt100-Thermoelement kontrolliert. Nach diesen vorbereitenden Maßnahmen werden dann dynamische Vorgänge gemessen. Im einzelnen bieten sich an:

- Druckminderer im Lastwechsel
- Öffnungsvorgänge bei Ventilen
- Aufprägen gezielter Störungen in einem Druckluftsystem
- Druckluftzylinder
- etc.

4. Zusammenfassung

Sowohl die theoretische Herleitung als auch erste Versuche deuten darauf hin, daß es möglich ist, sowohl die Temperatur als auch den Massenfluß von Fluiden auf die oben geschilderte Art und Weise zu messen. Der Meßvorgang bewegt sich im Mikrosekundenbereich und läßt hoffen, daß dynamische Vorgänge in der Pneumatik, wie zum Beispiel der Öffnungsvorgang eines Ventils, vollständig gemessen

werden kann.

Das angestrebte Meßverfahren bietet im Vergleich zu anderen Verfahren zur Temperatur- bzw. Massenstrommessung folgende Vorteile:

- keine Rückwirkungen auf das Fluid,
- gleichzeitige Messung von Schall- und Fluidgeschwindigkeit,
- trägheitslose Massenstrom- und Temperaturmessung
- weite Temperaturbereiche erfaßbar

In Kombination mit einer Druckmessung läßt sich dann eine vollständige Beschreibung des Gaszustandes in einem bestimmten Bereich machen. Diese Beschreibung beinhaltet Temperatur, Druck, Geschwin-

digkeit und sich daraus ergebende Größen wie Massenfluß und Dichte. Die Genauigkeit der dynamischen Messung hängt wesentlich von der Laufzeitmessung ab, die jedoch in einem schon industriell genutzten Bereich bleibt.

5. Literatur

- /1/ Strohmann, G.: atp-Marktanalyse, Druckmeßtechnik. atp 6/93, 7/93, 8/93
- /2/ Philips: Firmenbroschüre
- /3/ Sauer, R.: Einführung in die theoretische Gasdynamik. Springer Verlag: Berlin, Göttingen, Heidelberg: 1960

Maschinenakustische Maßnahmen zur Reduktion der Körperschallübertragung

Engel, K.; Schmidt, A.

Abstract:

Innerhalb dieser Veröffentlichung wird ein am IMW verfolgter neuartiger Ansatz zur Entwicklung lärmarmen Maschinenkomponenten beschrieben. Dabei steht der Einsatz von Ganzfeldmeßverfahren und die Einbeziehung wellentheoretischer Gesichtspunkte im Vordergrund.

Until now integration of wave-theoretical issues in machine-acoustics was missing. The application of special designed boundary faces for reflection, scattering, diffraction and interference of sound waves in structures is a new approach followed by the IMW for low noise design. The main idea of this approach is completely different from an ordinary application of dampers to mechanical devices, which normally not only influences damping properties but sometimes also its mechanical function. In this respect wholefield-measurement methods, applied to models of real mechanical components, are used to optimize its acoustic behavior.

1. Einleitung

Die Wettbewerbssituation, Vorschriften und Verordnungen des Gesetzgebers und zunehmendes Umweltbewußsein, seitens der Konsumenten stellen das Verkaufargument "lärmarm" zunehmend in den Vordergrund. Damit tritt die Forderung nach Geräuscharmheit neben die bekannten Restriktionen der Wirtschaftlichkeit, der Funktionserfüllung und der Sicherheit.

Bedenkt man, daß allenfalls ein Prozent der mechanisch in der Maschine umgesetzten Leistung als Schall abgestrahlt wird, so erahnt man, welche Anstrengungen und aufwendigen Nachbesserungen für nur kleine Verbesserungen des Geräuschniveaus unternommen werden müssen. Im Folgenden wird eine bei der Konstruktion der Maschine ansetzende Methode zur Verringerung des Geräuschniveaus auf dem Gebiet der Körperschalleitung durch dynamische, optische Modellversuche vorgestellt.

2. Geräuschemission

Die Geräuschentwicklung von Maschinen wird entscheidend von den Geräuschquellen und der Weiterleitung des Körperschalls auf abstrahlungsfähige Gehäuseteile bestimmt.

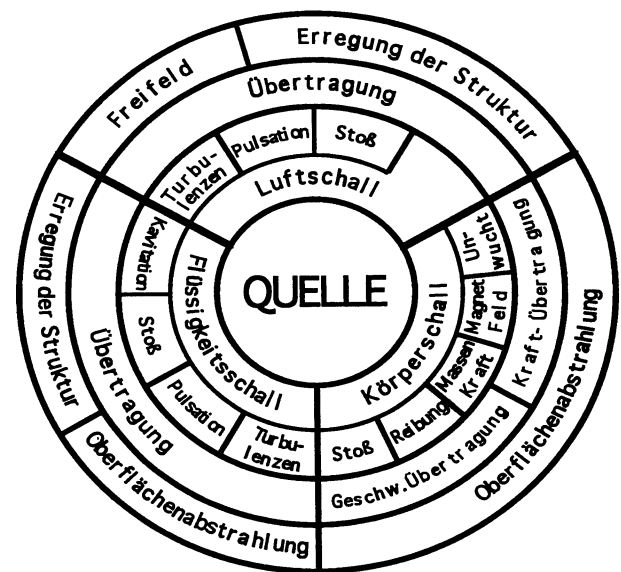


Bild 2.1: Schallentstehungskette /1/

Bekannte Maßnahmen zur Verringerung der Körperschallübertragung bilden die Körperschalldämmung und -dämpfung. Unter Dämmung werden alle Mittel zur Reflexion und Beugung der Körperschallwellen an Sprungstellen der mechanischen Impedanz, hervorgerufen durch lokale Änderung von Masse und Federsteifigkeit, zusammengefaßt (elastische Zwischenschichten, Sperrmassen). Die Körperschalldämpfung hingegen nutzt bei der Reduktion des Schallpegels die innere Dämpfung der Werkstoffe sowie die Grenzflächenreibung verbundener Bauteile aus.

Die Betrachtung der Körperschalleitung erfolgte bislang häufig unter rein mechanischen und schwingungstechnischen Gesichtspunkten. Durch die Einbeziehung der Wellentheorie in die Körperschalleitung werden am IMW neue Ansatzpunkte für die Lärminderung in Antriebssträngen und Maschinenstrukturen gesucht. Die Wirksamkeit der bekann-

ten Maßnahmen der Dämpfung und Dämmung von Körperschallwellen wird durch optische Modellversuche analysiert und in konstruktive Gestaltungsmaßnahmen umgesetzt. In diesem Zusammenhang besteht die Notwendigkeit der gezielten Auslegung von Übertragungselementen in Abhängigkeit von Frequenzbereich, Dämpfungsvermögen und Anforderungen an die Kraftgrößenübertragung.

3. Analytische Vorgehensweise

Eine exakte analytische Lösung der Körperschalleitung in komplexen Strukturen ist auf absehbare Zeit nicht zu erwarten. Hingegen werden bei der hier beschriebenen experimentellen Methodik auch im Bereich oberhalb 100 Hz befriedigende Ergebnisse erzielt.

Für die Durchführung der Untersuchungen wird die Tatsache genutzt, daß Körperschallwellen den physikalischen Gesetzen und Eigenschaften aller mechanischen Wellen unterliegen. Die Betrachtungen können somit auf dem Niveau mechanischer Wellen mit merklichen Spannungs- und Verformungswirkungen durchgeführt und auf die Körperschallübertragung der Strukturen angewendet werden. Im Vordergrund steht neben physikalischen Grundlagenuntersuchungen der Einfluß konstruktiver Parameter auf das Körperschallverhalten.

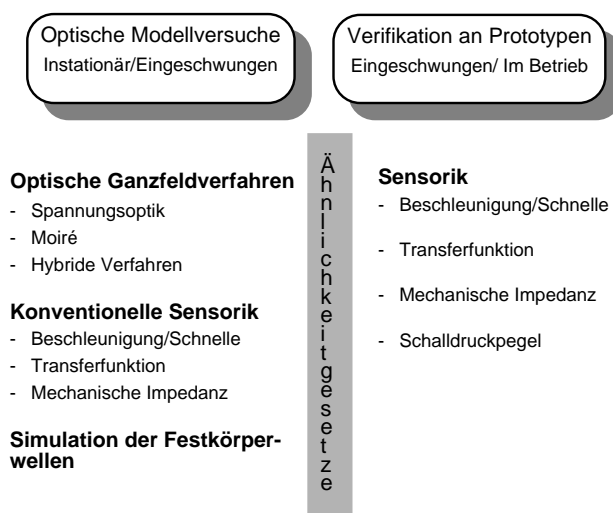


Bild 3.1: Untersuchungsmethodik

Die Untersuchungen erfolgen unter Einsatz optischer Ganzfeldmeßtechniken (Dynamische Spannungsoptik und In-plane Moiré) sowie punktuell messender Körperschallsensoren an ebenen Modellen. Die Ganzfeldmeßtechniken gestatten es hochdynamische Beanspruchungsvorgänge im Rahmen ebener Problemstellungen zu analysieren. Ein typisches Anwendungsbeispiel bilden Aggregateträger, Verbindungsflansche in Antriebssträngen sowie geradzahnte Getriebe. Die innerhalb dieser Baugruppen zu analysierenden Beanspruchungen sind durch einen ebenen Spannungszustand beschreibbar und können somit an ebenen Scheibenmodellen simuliert werden.

Eine vollständige Auswertung des dynamischen Spannungs- und Verformungszustands gibt letztendlich Aufschluß über die Körperschallausbreitung und -übertragung in Maschinenbauteilen.

4. Ähnlichkeitsmechanischer Ansatz

4. Ähnlichkeitsmechanischer Ansatz

Mit den Mitteln der Ähnlichkeitsmechanik können aus den Modellversuchen auf reale Bauteile übertragbare Ergebnisse erarbeitet werden. Hierzu sind bei der Versuchsdurchführung folgende Bedingungen ein zu halten:

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

Aus den Grundmaßstäben können weitere Maßstäbe für die Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verschiebung, Spannung sowie Maßstäbe zur Beschreibung von Stoß und Schwingungsvorgängen durch Dimensionsbetrachtungen abgeleitet werden. Auf eine detaillierte Darstellung der Ähnlichkeitsgesetze wird in diesem Rahmen verzichtet.

Vollkommene mechanische Ähnlichkeit liegt vor, wenn alle am Prozeß beteiligten Größen wie Wege, Zeiten, Kräfte, Spannungen, Geschwindigkeiten, Drücke usw. entsprechend den physikalischen Gesetzen übertragen werden können. In vielen Fällen läßt sich diese strenge Ähnlichkeit durch werkstoffbedingte Abweichungen zwischen Modell und Realisierung oder durch die Vielzahl der am Prozeß beteiligten Einflußgrößen nicht realisieren. Eventuelle Abweichungen können durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden. Häufig beschränkt man sich auf die Ähnlichkeit der bei einem Vorgang dominierenden Größen und erhält somit die Möglichkeit, den Einfluß einzelner Parameter im Rahmen der Körperschallübertragung zu analysieren.

Die Werkstoffkenngrößen Elastizitätsmodul E und Dichte ρ haben keinen Einfluß auf die Spannungsverteilung, sind aber maßgebend für das Frequenzverhalten. Insbesondere verdient die Frequenz- und Temperaturabhängigkeit des E -Moduls der verwendeten Modellwerkstoffe besondere Beachtung. Die geringfügig unterschiedlichen Poissonzahlen von Modell und Hauptausführung beeinflussen die Verteilung der Spannung innerhalb der Struktur nur unbedeutend, besonders im Bereich der Schwingungsknoten mit Amplituden nahe Null kann daher der Einfluß der Poissonzahl mit guter Näherung vernachlässigt werden.

Bauteilgeometrie, Schwingungsform und -amplitude beeinflussen sowohl die Spannungsverteilung, als auch deren Höhe. Die Schwingung eines elastischen Körpers ist eine Funktion der Parameter E -Modul, Dichte, Länge, Frequenz und Poisson-Zahl. Unter Wahrung der strengen Ähnlichkeit mit der Forderung nach gleichen Poisson-Zahlen in Modell und Realteil läßt sich aus einer Dimensionsanalyse folgende Beziehung für den Frequenzzusammenhang herleiten:

$$f_m = f_h \cdot L_k \cdot \sqrt{\frac{\rho_k}{E_k}} = f_h \frac{L_h}{L_m} \sqrt{\frac{\rho_h E_m}{\rho_m E_h}} \quad (4-1)$$

Die Übertragung der Frequenzen f der Realausführung (Index h) auf das Modell (Index m) ist demnach von dem Längenmaßstab L_k und den Werkstoffkenngrößen Dichtemaßstab ρ_k und Maßstab der Elastizitätsmoduli E_k abhängig. Die versuchstechnisch schwierig zu realisierende Nachbildung der Ankopplung hoher Frequenzen an zu untersuchende Werkstücke kann somit in niedrigere Frequenzbereiche verlagert werden.

5. Wellensimulationsprogramm

Zeitveränderliche äußere Kräfte oder Schwinggeschwindigkeiten rufen in Festkörpern zeitveränderliche Verformungen hervor, die sich in Form von Wellen endlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit in Bauteilen fortpflanzen /4/. Man unterscheidet im allgemeinen zwischen zwei Wellenarten, den Körperwellen (Longitudinal-, Transversalwellen), die sich im Inneren einer Struktur fortpflanzen und den Oberflächenwellen, die sich an dessen Oberfläche bewegen (Rayleigh-Wellen, Biegewellen). Im Festkörper treten neben den Longitudinalwellen, Trans-

versalwellen und Rayleighwellen auf. Die Longitudinalwelle bewirkt eine Volumenänderung der Masselemente (Kompression oder Dilatation). Schwingungsrichtung und Ausbreitungsrichtung sind parallel zueinander.

Die Transversalwelle, eine Schubspannungswelle, bewirkt eine Verdrehung der Massenelemente. Die Schwingungsrichtung steht senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung.

Beide Wellenarten breiten sich im Bauteilinnern kreisförmig um den Stoßpunkt aus.

Das alleinige Auftreten von Longitudinal- und Transversalwellen ist auf den theoretischen Fall unendlichausgedehnter Scheiben beschränkt.

An Bauteilränder kommt es zu einer Reflexionen beider Wellenarten, mit einer aus der Reflexion hervorgehenden gleichartigen und einer ungleichartigen Wellenfront, so daß hier Umwandlungsreaktionen zwischen beiden Wellenarten auftreten.

Für die rechnerische Simulation im instationären Beanspruchungsfall wurde ein Wellensimulationsprogramm auf der Basis einer schrittweisen Ausbreitung elastischer Wellen /2/ entwickelt.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellenarten ist eine werkstoffspezifische Konstante. Die Reflexion gehorcht dem Snellius'schen Brechungsgesetz und die Amplitudenabhängigkeit der reflektierten Wellenfronten ist im Bereich der Festkörperphysik analytisch beschrieben worden /5/.

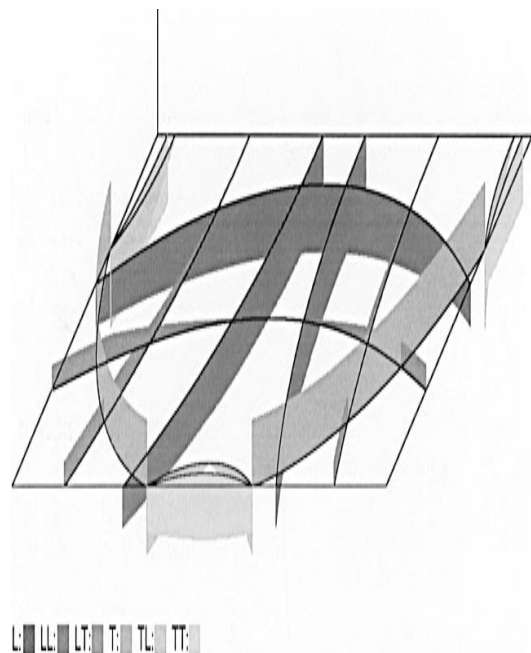


Bild 5.1: Simulation der Wellenausbreitung in einer rechteckigen Scheibe ohne innere Störungsstellen

Das Programm simuliert die Ausbreitung und Reflexion von Longitudinal-, Transversal- und Rayleighwellen und berechnet die Amplitudenverteilung zu beliebigen Zeitpunkten s. **Bild 5.1**.

Alle für die Berechnung nötigen Werkstoffparameter sind für die untersuchten Modellwerkstoffe in Eingabefiles abgelegt. Werkstoffparameter und zu berechnende Zeitintervalle können durch direkten Zugriff auf der Programmoberfläche verändert werden. Der Stoßpunkt kann beliebig gewählt werden. Zur besseren Gegenüberstellung des Reflexionsverhaltens unterschiedlicher innerer Diskontinuitäten wird eine auf die einmalige Durchlaufzeit der Longitudinalwelle normierte Ausbreitungszeit T durch die Kontur verwendet. Für $T=1$ hat die Longitudinalwelle den Körper einmal durchlaufen.

Die mit dem Wellensimulationsprogramm theoretisch ermittelten Verläufe geben einen Überblick über die Bereiche des Modells, in denen es zu Interferenzerscheinungen der unterschiedlichen Wellentypen kommt und damit zu möglichen Auslöschungen oder Verstärkungen der Schwingwege. Durch gezieltes Einbringen von Diskontinuitäten in den Schallübertragungsweg können die Körperschallwellen gestreut, gebeugt, reflektiert und interferiert werden. Die Energieverteilung in dynamisch belasteten Bauteilen und an deren Fugestellen kann gegenüber einer Geometrie ohne Störstellen frequenzselektiv optimiert werden.

6. Modelluntersuchungen

Bei der Analyse schwingungsfähiger Systeme muß zwischen einem instationären und einem eingeschwungenen Zustand unterschieden werden. Während der instationäre Zustand durch die von der Anregungsstelle ausgehende Ausbreitung von Spannungswellen charakterisiert ist, bildet sich im eingeschwungenen Zustand ein Feld stehender Wellen aus.

Die instationäre Wellenausbreitung wird durch aufbringen einer stoßartigen Belastung versuchstechnisch nachgebildet. Der eingeschwungene Zustand hingegen ist durch die Anregung der Modelle mit diskreten Einzelfrequenzen darstellbar.

Anhand von ebenen spannungsoptischen Modellen wird der Einfluß von Diskontinuitäten innerhalb eines Maschinenbauteils und freien Bauteiloberflächen auf das Körperschallübertragungsverhalten analysiert.

Bild 6.1 zeigt den Prüfstands Aufbau für das hybride Meßverfahren, bestehend aus dynamischer Spannungsoptik und Körperschallmessung.

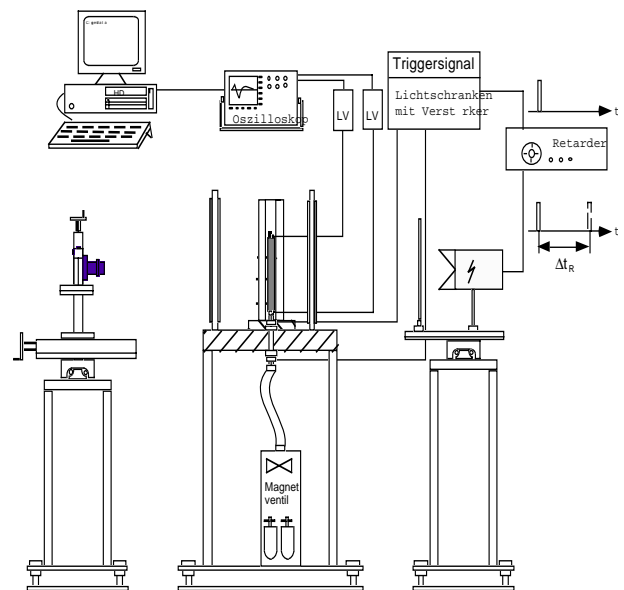


Bild 6.1 Prüfstand zur Körperschallanalyse mit hybrider Meßtechnik

Mittels einer pneumatische Schießvorrichtung wird ein Impuls von ca. 50 μ sek Dauer in die kürzere, untere Kante der freigeführten rechteckigen Modelle eingeleitet. Die Erfassung des sich innerhalb der Struktur einstellenden Spannungsfeldes erfolgt durch Einsatz des "Verfahrens der verzögerten Einzelblitze" /6/, gleichzeitig werden die Schwingbeschleunigungen an Scheibenober- und Scheibenunterkante gemessen.

Wesentliche Einflußgrößen auf die Körperschalleitung einer Struktur bilden das Dämmungs- und Dämpfungsverhalten. Während die Dämpfung eine allein werkstoffspezifische Größe darstellt, ist die Dämmung von der Bauteilgeometrie abhängig. Eine gezielte Beeinflussung des Körperschalls kann folglich sowohl über die Werkstoffwahl als auch über konstruktive Maßnahmen erfolgen. Eine effektive Ausnutzung der Dämpfungseigenschaften eines Werkstoffes im Hinblick auf die Körperschallamplituden ist durch möglichst lange Schallausbreitungsstrecken zu realisieren. Konstruktive Maßnahmen zur Verlängerung der Ausbreitungsstrecke können darin bestehen eine Vielzahl von Oberflächen innerhalb eines Maschinenträgers zu schaffen, an deren Grenzflächen Körperschallwellen reflektiert bzw. gebeugt werden. Gelingt es diese

künstlich erzeugte Oberflächen so zu gestalten, daß Körperschallwellen in unkritische Bereiche reflektiert werden oder gar infolge Interferenzerscheinungen ausgelöscht werden, so erhält man ein Maschinenelement, welches die Weiterleitung und Ausbreitung von Körperschallwellen behindert. Ansätze zur Entwicklung eines solchen mechanischen Filters sollen anhand verschiedener Diskontinuitätsgeometrien und -anordnungen analysiert werden. Stellvertretend für die Vielzahl der denkbaren Geometrien konstruktiv eingebrachter Störstellen werden nachfolgend am Beispiel von kreisförmigen Bohrungen die Ergebnisse der Körperschallanalyse präsentiert.

Für die Untersuchungen werden vier rechteckige Scheibe gleicher äußerer Abmessungen und Materialstärke aus Araldit B herangezogen. Während eine ungebohrte Scheibe als Referenzstruktur dient, werden die übrigen drei Modelle mit kreisrunden Bohrungen verschiedener Anordnung und Größe versehen. Nach der Anzahl der Bohrungen wird nachfolgend zwischen einer 1-Lochscheibe, einer 20-Lochscheibe und einer 201-Lochscheibe unterschieden.

Die **Bilder 6.3 bis 6.6** zeigen einige charakteristische Isochromatenaufnahmen der einzelnen Modelle zu unterschiedlichen Belichtungszeitpunkten. Dabei bedeutet T die auf die Durchlaufzeit der schnellsten Körperschallwelle innerhalb der Referenzstruktur bezogene Zeit. Spannungswellen (Longitudinal- und Transversalwellen) werden vom Stoßpunkt, der in der Mitte des unteren Scheibenrandes der jeweiligen Struktur liegt, ausgelöst und breiten sich von dort kreisförmig in das Modellinnere aus. Im weiteren Verlauf der Wellenausbreitung kommt es an den Modellrändern sowie an den eingebrachten Löchern zu Reflexions- und Wellenumwandlungserscheinungen, wobei jeder Reflexionspunkt Ausgangspunkt einer neuen Wellenfront ist (Huygen'sches Prinzip), die sich nach den Reflexionsgesetzen bewegt, **Bild 6.2**.

Unter Zuhilfenahme der in Abschnitt 3 beschriebenen Wellensimulation, können somit einzelne Wellentypen und Interferenzerscheinungen innerhalb der Isochromatenaufnahmen detektiert werden. Im Referenzmodell breiten sich Spannungswellen ungestört bis $T < 0,5$ aus, **Bild 6.3**. Zu späteren Zeitpunkten treten aufgrund von Randreflexionen Interferenzerscheinungen auf, die Zonen höherer Span-

nungen symmetrisch zur Mittellinie zur Folge haben.

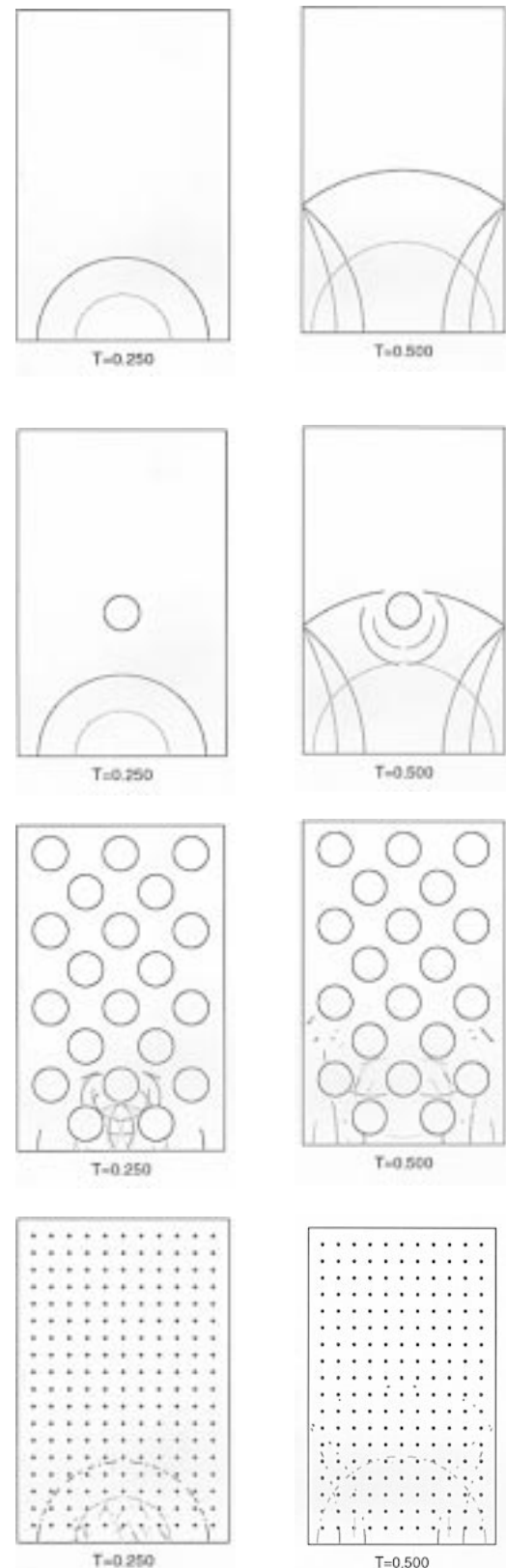


Bild 6.2: Wellenausbreitungsvorgang

Die Geschwindigkeit der Spannungsmaxima entspricht in etwa der der Transversalwelle, infolgedessen muß sie für den eigentlichen Energietransport innerhalb einer Struktur verantwortlich ge-



T= 0,25



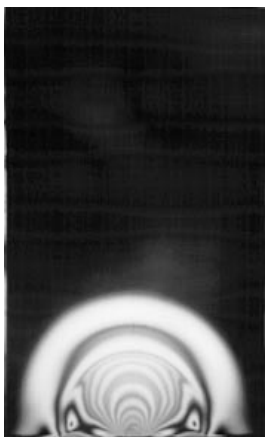
T= 0,5



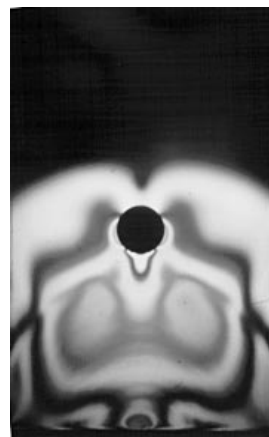
T= 0,75



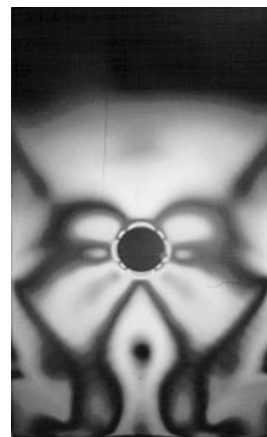
T= 1

Bild 6.3

T= 0,25



T= 0,5



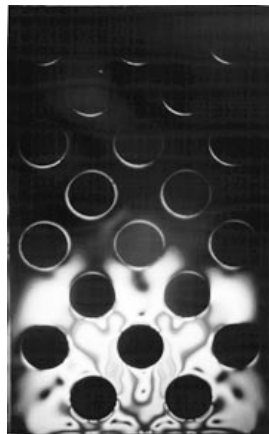
T= 0,75



T= 1

Bild 6.4

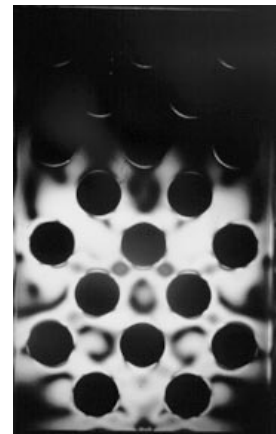
T= 0,25



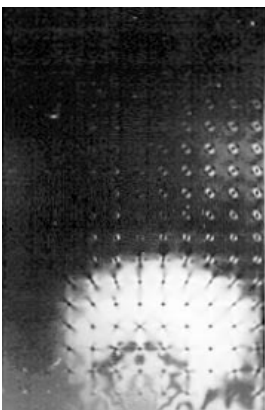
T= 0,5



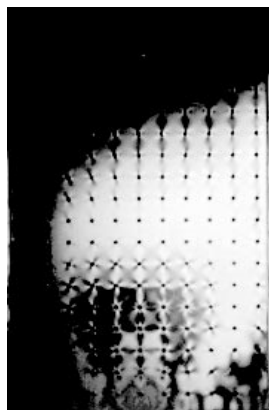
T= 0,75



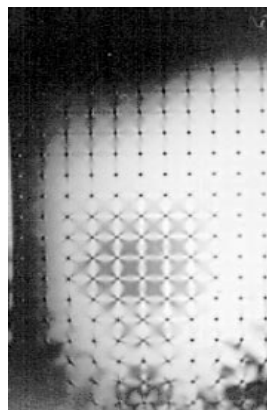
T= 1

Bild 6.5

T= 0,25



T= 0,5



T= 0,75



T= 1

Bild 6.6

macht werden.

Die 1-Lochscheibe zeigt bei $T=0,5$ erste Reflexionserscheinungen der Longitudinalwelle am Lochrand, **Bild 6.4**. Zum Zeitpunkt $T=1$ ist ein deutlicher Schatteneffekt oberhalb der Bohrung zu sehen. Vergleicht man dieses mit dem Referenzmodell, so stellt man fest, daß die Wellenfront innerhalb der 1-Lochscheibe der Referenzscheibe naheilt, **Bild 6.3** und **Bild 6.4**. Damit kann gezeigt werden, daß bereits das Einbringen nur einer Störstelle eine deutliche Verlängerung des Schalleitungsweges innerhalb einer Struktur bewirkt. Im Bereich unterhalb der Bohrung stellen sich infolge von Interferenzen quer gegen einander laufender Wellenfronten nur sehr geringe Spannungswerte entlang der Scheibenmittellinie ein.

Bei der 20-Lochscheibe ist anhand der Isochromatenaufnahmen deutlich zu erkennen, daß Anteile der Wellenfront zwischen den beiden unteren Bohrungen und dem unteren Modellrand hin und her reflektiert werden, **Bild 6.5**. Aber nicht nur zwischen Bohrung und Modellrand, sondern auch zwischen den einzelnen im Modell verteilten Bohrungen, setzt sich diese Erscheinung bis in den oberen Scheibenbereich fort. Aufgrund der ständigen Reflexionen zwischen den Störstellen sowie den Bauteilrändern wird eine künstliche Verlängerung des Ausbreitungsweges erreicht, so daß auch bei diesem Modell die Wellenfront im Vergleich zur Referenzscheibe deutlich langsamer voranzuschreitend scheint; zur Zeit $T=1$ wurde gerade mal die halbe Scheibenlänge durchlaufen, s. **Bild 6.3** und **Bild 6.5**. Neben den Dämpfungserscheinungen treten hier verstärkt die Effekte der Körperschalldämmung in Form von Auslöschung bzw. Verstärkung von Spannungswellen auf. Trotz anfänglicher erhöhter Spannungskonzentrationen zwischen den einzelnen Störstellen ($T=0,25$ bis $T=0,75$), sind die bei $T=1$ auftretenden Spannungswerte wesentlich geringer als bei der Referenzscheibe.

Noch bessere Ergebnisse liefert diesbezüglich die 201-Lochscheibe, bei der zum Zeitpunkt $T=1$ schon kaum noch Spannungen im Modell feststellbar sind, **Bild 6.6**.

In Anbetracht dessen, daß Körperschall einen Energiefluß aus kinetischer und potentieller Energie beschreibt, muß eine Behinderung des Energietransportes innerhalb einer Struktur durch Ausnutzung von Werkstoffdämpfung und Körperschalldämmung

und damit einhergehender dissipativer Prozesse zu einer Energieverringerng bei der Körperschallübertragung führen. Berücksichtigt man, daß die in einer Struktur gespeicherte Formänderungsenergie proportional der Summe der Hauptspannungsdifferenzen (Isochromaten) ist, so weist die 201-Lochscheibe für die Betrachtung des instationären Schwingungszustand gegenüber den anderen Modellen die besten Körperschallübertragungseigenschaften auf. Ergänzend zu den optischen Untersuchungen werden an den Modellen durchgeführte Körperschallmessungen zum Vergleich herangezogen. Diese bieten gegenüber den rein optischen Meßergebnissen die zusätzliche Möglichkeit eine eingeschränkte, frequenzselektive Bewertung des akustischen Verhaltens der Modelle vorzunehmen. Aufgrund der nur punktuell arbeitenden Körperschallsensoren besitzen die damit erzielten Ergebnisse lediglich lokal begrenzte Aussagefähigkeit und bedürfen hinsichtlich einer globalen Beurteilung einer differenzierteren Bewertung; so kann gezeigt werden, daß das gemessene Übertragungsverhalten einer Struktur im entscheidenden Maß vom Ort der Ankopplung des Sensors, Anzahl der in die Bewertung einfließenden Meßstellen, Art und Güte der Anregungsfunktion usw. abhängig ist.

Das Gebiet der Signalanalyse bietet in seiner Vielfalt eine Fülle möglicher Kennfunktionen zur qualitativen und quantitativen Analyse des Körperschallübertragungsverhaltens. Einen geeigneten Indikator für die Reduktion der Körperschalleitung stellt beispielsweise das Einfügedämmmaß dar. Es vergleicht die Körperschallpegel an einer Meßstelle vor und nach dem Einbringen eines oder mehrerer isolierenden Element(s).

$$\Delta L_E = 20 \lg \left| \frac{v_0}{v_1} \right| \text{ dB}$$

Bild 6.7 und **Bild 6.8** zeigen das Einfügedämmmaß der 1-Lochscheibe bzw. der 20-Lochscheibe im Bezug auf das Referenzmodell. Zur Ermittlung wurden die Transferfunktionen der jeweiligen Modellscheiben herangezogen. Diese wurden zwischen dem Anregungspunkt an der jeweiligen Scheibenunterkante und einem Maximalspektrum der Scheibenoberkante ermittelt.

Im unteren Frequenzbereich bis 2500 Hz zeigen so-

wohl die 1-Loch- als auch die 20-Lochscheibe deutlich bessere Übertragungseigenschaften als die Referenzscheibe. Lediglich im Bereich von 2500 Hz bis 3500 Hz schneidet die 20-Lochscheibe schlechter als die Referenzscheibe ab. Ursache dafür ist die infolge geringerer Steifigkeit niedrigere Resonanzfrequenz der 20-Lochscheibe. Betrachtet man hingegen den auswertbaren Frequenzbereich bis 2,5 kHz so decken sich die mittels Körperschallmessung ermittelten Ergebnisse mit denen der Ganzfeldmeßtechnik.

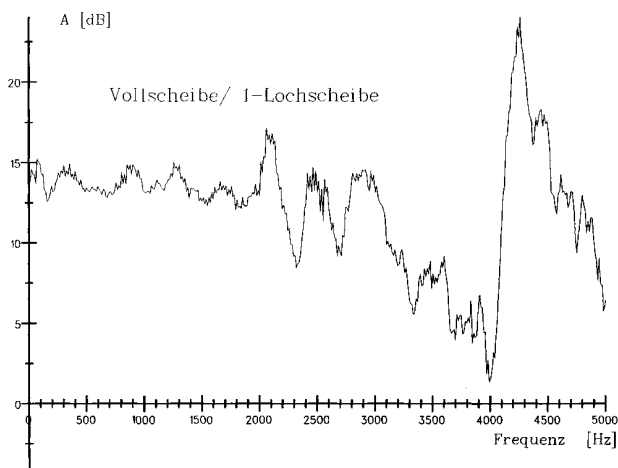


Bild 6.7: Einfügedämmmaß der 1-Lochscheibe

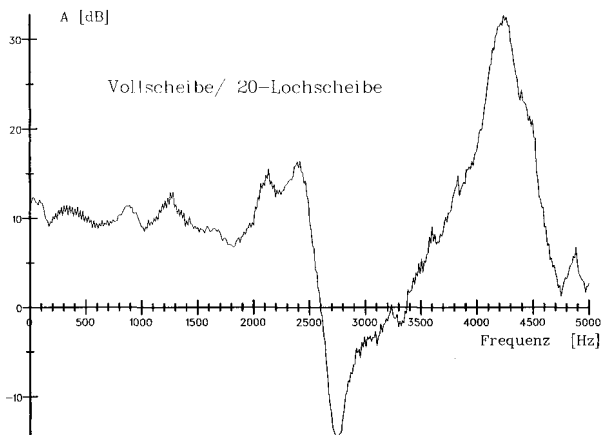


Bild 6.8: Einfügedämmmaß der 20-Lochscheibe

von Körperschallwellen an speziell gestalteten geometrischen Grenzflächen liefert neue Ansätze für die Lärminderung an Maschinen.

Das diesem Gedanken zugrundeliegende Prinzip der Veränderung einer tragenden Struktur ohne zusätzliche Dämpfungselemente unterscheidet sich wesentlich von bisher eingesetzten Dämpfungsgliedern, die neben den Dämpfungseigenschaften in bestimmten Frequenzbereichen in die Funktion der Maschinenstruktur eingreifen.

Die gezielte Analyse der Festkörperwellen mittels optischer Ganzfeldmeßverfahren in Modellversuchen ermöglicht eine gezielte Optimierung der Bau- teilegeometrie unter akustischen Gesichtspunkten.

Literatur

- /1/ Dietz, P.; Konstruktion lärmarmen Maschinen, Vorlesung IMW Clausthal 1993
- /2/ Dietz, P.; Engel, K.: FVA 235: Impedanzelement Forschungsreport 1994
- /3/ Albers, J.: Dynamische Spannungsanalyse mit optischen und numerischen Verfahren unter Einsatz der digitalen Bildverarbeitung am Beispiel prallbeanspruchter Partikelmodelle. Diss. TU Clausthal 1991
- /4/ Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall. Springer-Verlag Berlin 1967
- /5/ Graff, K.F.: Wave Motion in elastic solids. Oxford 1975
- /6/ Kuske, A.; Robertson, G.: Photoelastic Stress Analysis. John Wiley & Sons, Chichester 1997

7. Zusammenfassung

Die gezielte Einbeziehung wellentheoretischer Gesichtspunkte im Bereich der Maschinenakustik zur Entwicklung lärmarmen Maschinenkomponenten erfolgte bisher nicht. Der am IMW verfolgte Ansatz der Beugung, Streuung, Reflexion und Interferenz

Anisotropie des photoelastischen Effektes in gewalztem Silberchlorid

Gieleßen, H.

Experimentelle und theoretische Untersuchungen wurden durchgeführt, um einen Zusammenhang zwischen elastischer und optischer Anisotropie mit den Gesetzen der Spannungsoptik herzustellen. Hierzu werden zunächst die Grundlagen der anisotropen Spannungsoptik beschrieben. Mono- und polykristalline Silberchloridproben wurden Zugspannungen unterworfen und relative Verzögerung und Auslöschungswinkel gemessen, um die Theorien zu stützen, die den Spannungszustand mit den optischen Erscheinungen quantitativ in Beziehung setzen. Die Texturen von gewalzten und rekristallisierten Silberchloridproben wurden mit Hilfe eines Röntgentexturgoniometers ermittelt und charakterisiert.

Experimental and theoretical studies have been carried out in order to relate elastic anisotropy to optical anisotropy by means of photoelasticity. The fundamentals of anisotropic photoelasticity have been described. Specimens of monocrystalline and polycrystalline silver chloride have been submitted to tensile stress and relative retardation and extinction angles observed in polarized monochromatic light to show conformity to the theories which quantitatively relate the state of stress and optical phenomena. Textures of cold-rolled as well as of recrystallized silver chloride specimens were determined with an X-ray goniometer. Texture determining parameters such as degree of rolling and recrystallisation time and temperature have been varied. Textures found in silver chloride after various processing have been characterized.

1. Einleitung

Warum interessieren sich Maschinenbauingenieure für Textur und Anisotropie? Und aus welchen Gründen interessieren sie sich für Silberchlorid, welches absolut keine Bedeutung als Material zur Herstellung von Maschinenteilen hat. Im Bereich Maschinenbau ist neben der Konstruktion, die Bestimmung mechanischer Beanspruchungen in Maschinenteilen eine Hauptaufgabe. Es gibt unterschiedliche Werkzeuge im Werkzeugkasten des Maschinenbauers, welche

für diese Zwecke eingesetzt werden können. Bei einfacher Geometrie und Lastbedingungen ist ein analytischer Ansatz anwendbar. Heutzutage werden oft numerische Methoden wie FEM oder BEM eingesetzt, da hoch entwickelte Software und Rechnerleistung bei vergleichsweise niedrigen Preisen zur Verfügung stehen. Jedoch ist große Erfahrung notwendig, um korrekte Resultate zu erhalten.

In der Palette der experimentellen Methoden der Ganzfeldmessung ist die Spannungsoptik am weitesten verbreitet. Diese Methode bedient sich des Effektes der Spannungsdoppelbrechung, welcher bei jedem kristallinen und nicht-kristallinen transparenten Material auftritt. Es wurden Analogien entwickelt, welche die Verwendung transparenter Modelle erlauben und bei Belastung dieser durch innere oder äußere Kräfte Untersuchungen der inneren Beanspruchungen zulassen. Ein wesentlicher Nachteil dieser Methode ist die Notwendigkeit ein Modell des zu untersuchenden Teils anzufertigen, falls nicht nur eine Ermittlung der Spannungen an den Oberflächen gewünscht ist.

Alle üblicherweise verwendeten spannungsoptischen Modellmaterialien haben eine nicht-kristalline Struktur, was dazu führt, daß sie nur für Untersuchungen von Elastizitätsproblemen homogener und isotroper Körper geeignet sind, da sie selber eine homogene, isotrope Struktur und entsprechende mechanische und optische Eigenschaften aufweisen. Den Hauptanteil der im Maschinenbau verwendeten Materialien bilden Metalle, die eine kristalline Struktur aufweisen. Deren anisotrope Eigenschaften werden normalerweise durch verschiedene thermische und mechanische Bearbeitungsschritte hervorgerufen. Ein weiterer Nachteil spannungsoptischer Modellmaterialien, bei denen es sich meist um verschiedene Kunstharze handelt, ist, daß sich das mechanische Verhalten oberhalb der Elastizitätsgrenze vom Fließverhalten der Metalle unterscheidet. Die plastische Verformung von Polymeren geschieht durch Aufbrechen, Verformung und Neuordnung von Molekülketten. Gleitebenen, sowie Zwillingsbildung und Kaltverfestigung

treten nicht auf. Desweiteren hängt der Verformungsgrad von den Belastungszeiten und Dehnungsraten ab. Aus diesen Gründen war es notwendig, ein transparentes, texturierbares Material, welches Gleitebenen, Kaltverfestigung, Rekristallisation, Umformbarkeit und ausreichende spannungsoptische Empfindlichkeit aufweist, zu finden. Materialien mit diesen Eigenschaften mußten kristallin sein. Tamman /1/ beschrieb als erster Silber- und Thalliumhalogenidsalze als für spannungsoptische Untersuchungen geeignet. Stepanov /2/ entwickelte Verfahren zur Präparation von Silberchloridproben für spannungsoptische Zwecke und prägte den Begriff "transparente Metalle" für diese Stoffe. Aufgrund ihrer kubischen Kristallstruktur sind sie nicht von sich aus doppelbrechend und das Maß ihrer Doppelbrechung spiegelt direkt die Größe und Richtung einer vorhandenen inneren Beanspruchung wieder. Diese "transparenten Metalle" können wie Metalle gewalzt, geschmiedet, getrennt, gegläht und rekristallisiert werden. Das durch Texturen verursachte anisotrope, optische Verhalten ist eine direkte Folge mechanischer Bearbeitung, wie auch das Auftreten mechanischer Anisotropie in Metallen. Die Wissenschaftler, welche sich zum ersten Mal mit der Thematik der Texturen in spannungsoptischen Werkstoffen befaßten, interessierten sich für die texturellen Effekte, weil sie sie ver-

meiden wollten. Es wurde eine Methode zur Erzielung nahezu texturfreier polykristalliner Proben von Stepanov /3/ vorgeschlagen, welche von Weber /4/ weiterentwickelt wurde.

In den 70er Jahren begann das Institut für Maschinenwesen die Untersuchung von Silberchlorid, als der Bedarf für ein spannungsoptisches Material hoher Plastifizierbarkeit zur Simulation von Umformvorgängen entstand. Derzeit liegt unser Schwerpunkt bei der Erzeugung gezielter optischer Anisotropie in Silberchlorid, und der Formulierung einer Theorie, welche den Zusammenhang mit der mechanischen Anisotropie gewalzter Bleche herstellt.

2 Neue Anforderungen an die Spannungsoptik

Der Ansatz einer anisotropen Spannungsoptik erfordert die Kombination konventioneller Spannungsoptik mit den Gesetzen der Kristalloptik unter Berücksichtigung der Textur im Modell und Bauteil. Die klassische Spannungsoptik befaßt sich mit amorphen, molekularen oder isotropen Materialien, während die Kristalloptik das optische Verhalten einzelner Kristalle beschreibt. Der polykristalline Zustand wird durch die Orientierungsverteilungsfunktion (ODF), mit der verschiedene physikalische Eigenschaften berechnet werden können, beschrieben.

Ein Maschinenteil, welches für Untersuchungen der

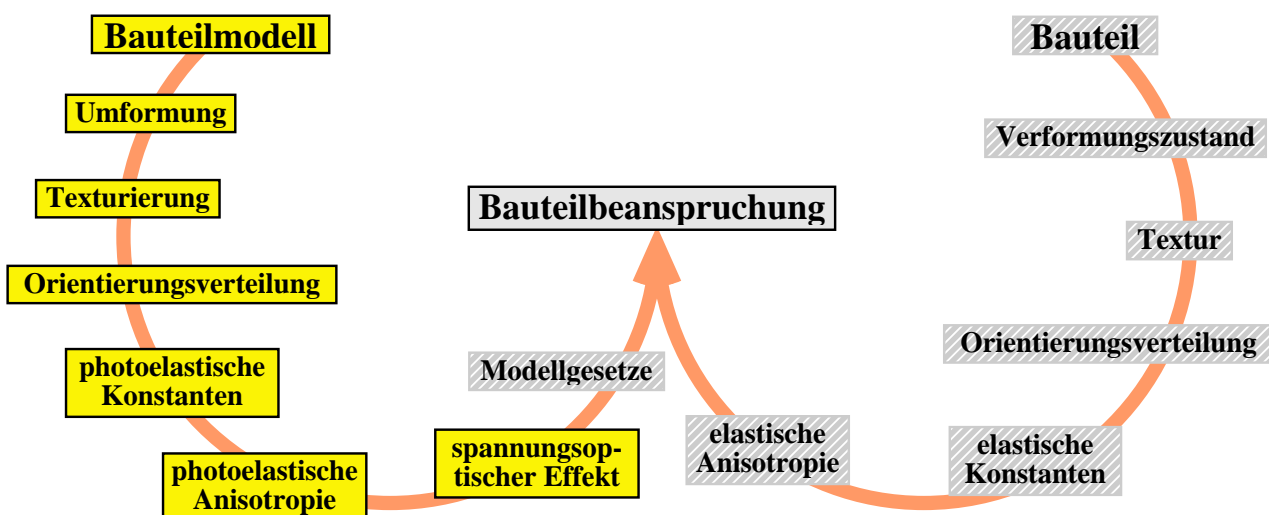
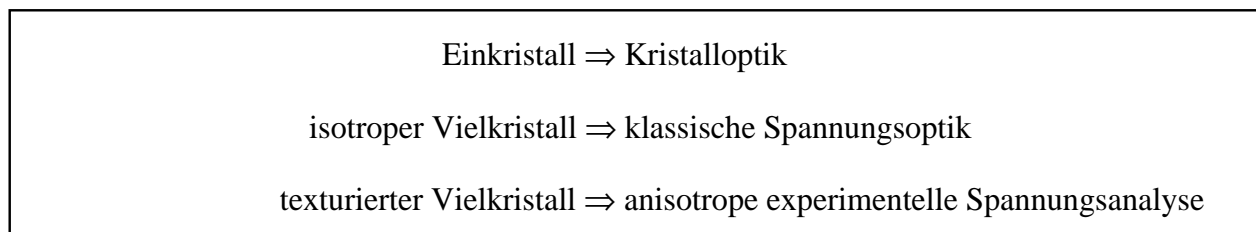


Abb. 1: Gesamtzusammenhang anisotrope Spannungsoptik

mechanischen Anisotropie geeignet ist, besteht vorzugsweise aus Stahl, da Aluminium nur eine geringe elastische Anisotropie besitzt. Die mechanischen Eigenschaften werden durch die Textur des Materials beeinflusst, die wiederum vom Verformungszustand abhängt. Die Textur wird durch Koeffizienten der Ausrichtungsverteilungsfunktion (ODF) beschrieben. Die makroskopische elastische Anisotropie kann mit Hilfe der elastischen Konstanten, welche bei fast allen Materialien bekannt sind, aus den Konstanten der ODF berechnet werden. Zusammen mit einer äußeren Belastung oder bekannten Restspannungen ergibt dies die Spannungs- und Dehnungsverteilung. Den Zusammenhang zeigt die **Abb. 1**.

Um die Spannungsverteilung des Bauteils mittels Spannungsoptik simulieren zu können, muß ein Modellteil aus Silberchlorid hergestellt werden. Durch Bearbeitungsschritte, wie Strangpressen, Walzen und Rekristallisationsprozesse, werden unterschiedliche Texturen erhalten. Die Texturkoeffizienten sind zu bestimmen und zusammen mit den elasto-optischen oder piezo-optischen Konstanten kann das spannungsoptische Verhalten des texturierten Materials berechnet werden. Spannungsoptisches Verhalten bedeutet in diesem Zusammenhang, die Änderungen der Brechungsindizes zweier polarisierter Lichtwellen, mit orthogonalen Polarisationsrichtungen. Die Überlagerung der zwei Wellen führt zu Interferenzen, welche gemessen und aus denen letztlich der Spannungszustand des Bauteils bestimmt werden kann. Die folgende Abhandlung beschäftigt sich mit den Aspekten in den grau hinterlegten Feldern aus **Abb. 1**.

3 Gleitmechanismen in Silberchlorid

Um die anisotropen Eigenschaften von Silberchlorid diskutieren zu können, müssen zunächst die Verformungsmechanismen unter Belastung geklärt werden. Das in einem Zonenschmelzofen hergestellte Rohmaterial für die Proben wird zunächst stranggepreßt und anschließend gewalzt, um eine feinkörnige Struktur zu erhalten. Durch die Verformung bilden sich feine Gleitlinien auf der Probenoberfläche wie in **Abb. 2** dargestellt. Diese Gleitlinien ähneln denen, die bei polierten metallischen Oberflächen bei Verformung in Erscheinung treten. Nye [5] zeigte, daß diese Streifen kleine Stufen auf der Oberfläche darstellen und daher durch Gleiten und nicht durch Zwillingsbildung entstehen. Das Auftreten der Gleitlinien hängt

von der Ausrichtung der Körner relativ zur Oberfläche ab. **Abb. 2** stellt zwei benachbarte Körner dar, wobei in einem Korn die Normale der Gleitebene einen kleinen Winkel mit der Oberfläche bildet. Im anderen Korn liegt die Gleitebene nahezu parallel zur Oberfläche, so daß keine Gleitlinien auftreten. Ein anderes typisches Phänomen ist das Auftreten doppelbrechender Bänder, wenn die Probe in polarisiertem Licht beobachtet wird (**Abb. 3**). Diese Bänder sind das Resultat von Restspannungen zwischen benachbarten Gleitzonen nach der Verformung. Ihr Auftreten hängt wiederum von der Neigung der Gleitebenen zur Oberfläche der Probe ab. Der Abstand der doppelbrechenden Bänder ist bei großen Winkeln klein. Bei kleinen Winkeln können die sich dann überlappenden Bänder aufgrund gegenseitiger Auslöschung verschwinden. In diesem Falle können zwei Gleitliniensysteme mit einem System doppelbrechender Bänder erkannt werden, welches parallel zur Winkelhalbierenden zwischen den Gleitsystemen ausgerichtet ist.

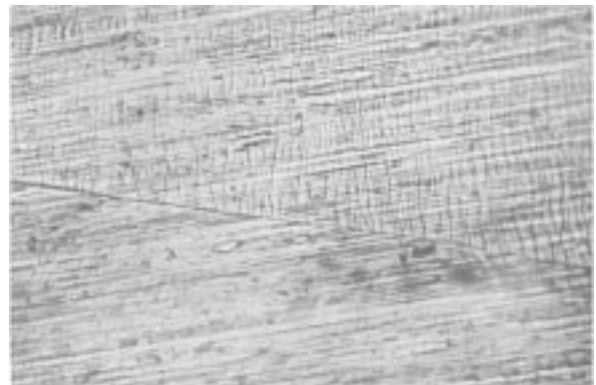


Abb. 2: Gleitlinien in AgCl

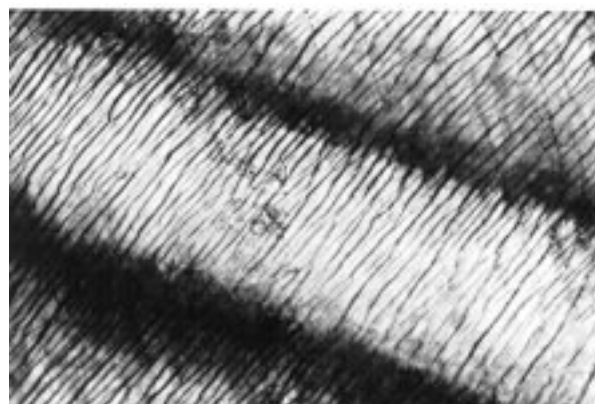


Abb. 3: Doppelbrechende Bänder in AgCl

Nye (1949) stellte durch optische Bestimmung der Ausrichtung der Gleitlamellen und durch Orientierungsmessung der Körner mittels Laue-Methode fest,

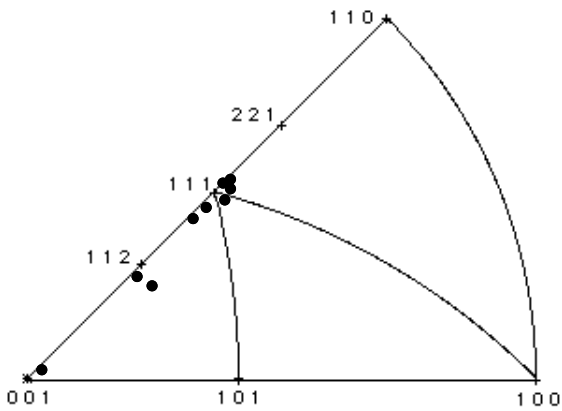


Abb. 4: Pole der Gleitebenen einiger Körner /5/

daß die Gleitebenen in den meisten Fällen nahe $[111]$ sind (Abb. 4). Die Gleitrichtung wurde zu $\langle 110 \rangle$ bestimmt, was mit kfz-Metallen übereinstimmt.

4 Texturentwicklung in gewalztem Silberchlorid

Aufgrund der Struktur von Silberchlorid kann vermutet werden, daß Texturen durch Walzen und Strangpressen erzeugt werden. Verschiedene Autoren erwähnten eine optische Anisotropie von Silberchlorid und die Existenz von einer Texturen als deren Ursache wurde vermutet. Jedoch wurde dies bis heute nicht näher untersucht. Polfiguren unserer ersten Experi-

mente zeigten nur schwache Textureffekte, so daß Reihenuntersuchungen durchgeführt wurden.

Das in einem Bridgman-Stockbarger Zonenschmelzofen hergestellte Rohmaterial hatte einen Durchmesser von 32 mm und eine Länge von ungefähr 80 mm. Alle Proben, die zum Walzen verwendet wurden, wurden durch Strangpressen mit einem Querschnitt von 30x12mm erzeugt. Sie besaßen eine relativ gleichmäßige Korngröße mit einem durchschnittlichen Durchmesser von 100 μm . Es wurde bei Temperaturen von 23°C, 0°C und -35°C in mehreren Schritten bis zu einem Umformgrad von 98% gewalzt. Abb. 5 stellt Korngrößen bei unterschiedlichen Walzgraden bei -35°C dar. Ab ungefähr 40% Umformgrad kam es zu einer erheblichen Streckung der Körner, die bei 60% ein Maximum erreichte. Walzen bei höheren Temperaturen verschob diese Werte auf 30% bzw. 40%. Es bestand nur ein geringer Unterschied zwischen den Experimenten bei 23°C und 0°C. Bei einem Walzgrad von 80% ist ein Maximum von ungefähr 0,2 mm der Korngröße erreicht (erhöhte Temperaturen: 60%-80%).

Ursprünglich sollte eine kleinere Korngröße durch Walzen erhalten werden, da dies für optische Untersuchungen günstiger ist. Der Effekt wachsender

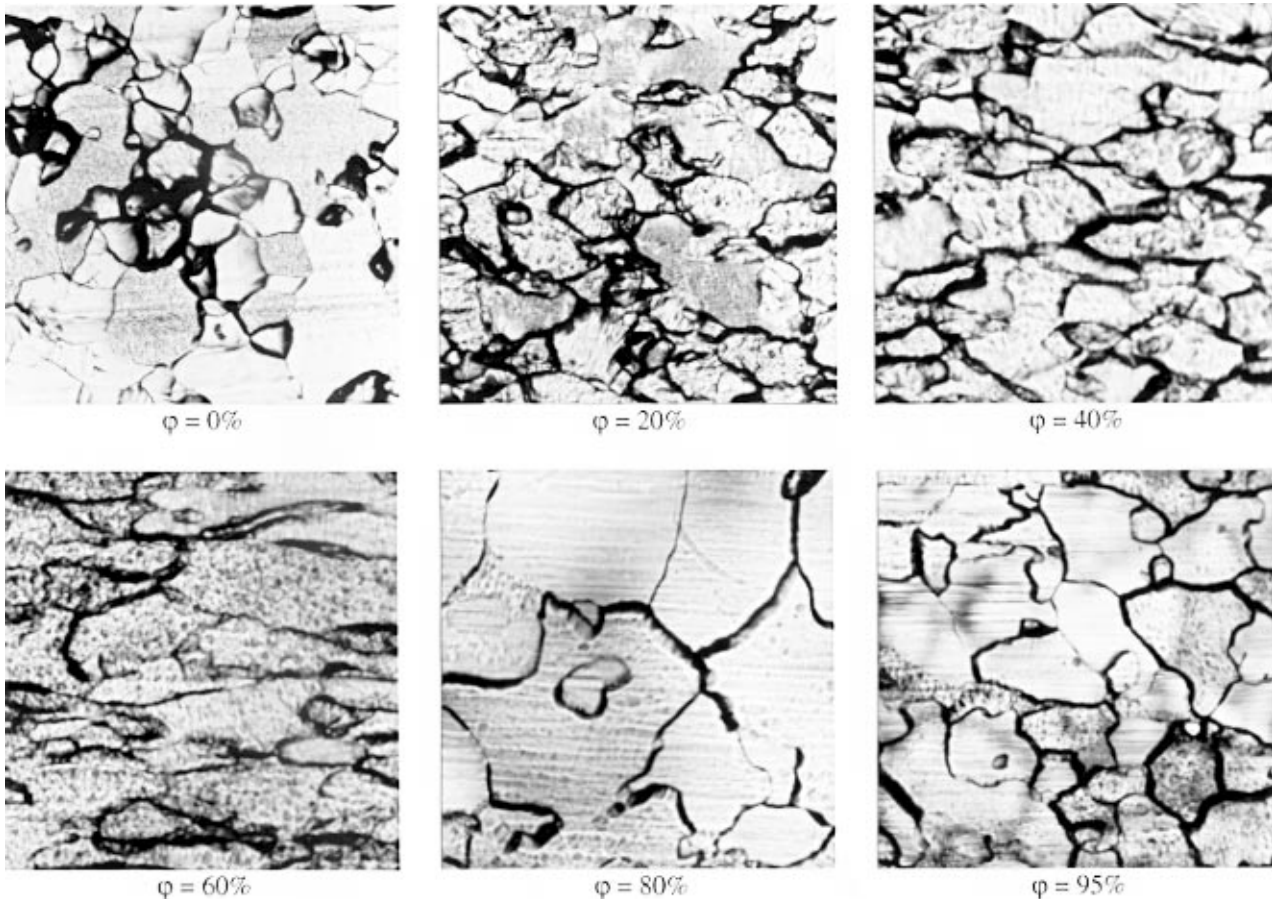


Abb. 5: Korngrößen bei steigenden Walzgraden, $T=-35^\circ\text{C}$, Vergr. 80-fach

Korngrößen widerspricht den Literaturangaben und wird wahrscheinlich durch eine hohe Reinheit des Materials verursacht. Es ist offensichtlich, daß während des Walzvorganges dynamische Rekristallisation stattfand, was dazu führte, die Experimente bei niedrigeren Temperaturen durchzuführen. Der Beginn der Kornvergrößerung verschob sich, wenn die Proben vorher abgekühlt wurden, zu einem höheren Walzgrad, konnte jedoch nicht ganz verhindert werden. Die Ausgangstextur war noch bei einem Walzgrad von 20% vollständig erhalten (**Abb. 6**). Die ODF in **Abb. 7** zeigt die Existenz einer ausgesprochen scharfen Goss-Textur, die durch das Strangpressen entstand. Ab 60% tritt eine Würfeltextrur auf, wobei die Goss-Textur immer noch vorhanden ist. Wie in rekristallisiertem Aluminium tritt eine gedrehte Würfeltextrur auf. Die Goss-Textur ist bei 80% nahezu aufgelöst.

Die Würfeltextrur ist eine typische Rekristallisationstextrur von kfz Metallen und ist damit ein weiterer Hinweis auf dynamische Rekristallisation. Das Korngrößenwachstum, das Auftreten der Würfeltextrur und die verschwindende Kornstreckung stehen in Einklang miteinander und treten bei demselben Walzgrad auf. Bei Umformgraden von 60% und 80% werden die Polfiguren durch die grobkörnigen Struktur etwas zerrissen. Aufgrund der dynamischen Rekristallisation konnten keine typischen Walztextruren erhalten werden.

Literaturangaben über die Rekristallisation von Silberchlorid unterscheiden sich erheblich voneinander /4, 6/, was die Anfangstemperaturen und Rekristallisationszeiten anbelangt. Es wurden Proben ausgewählt, die bei Raumtemperatur um 30% umgeformt waren, um dynamische Rekristallisation durch Wal-

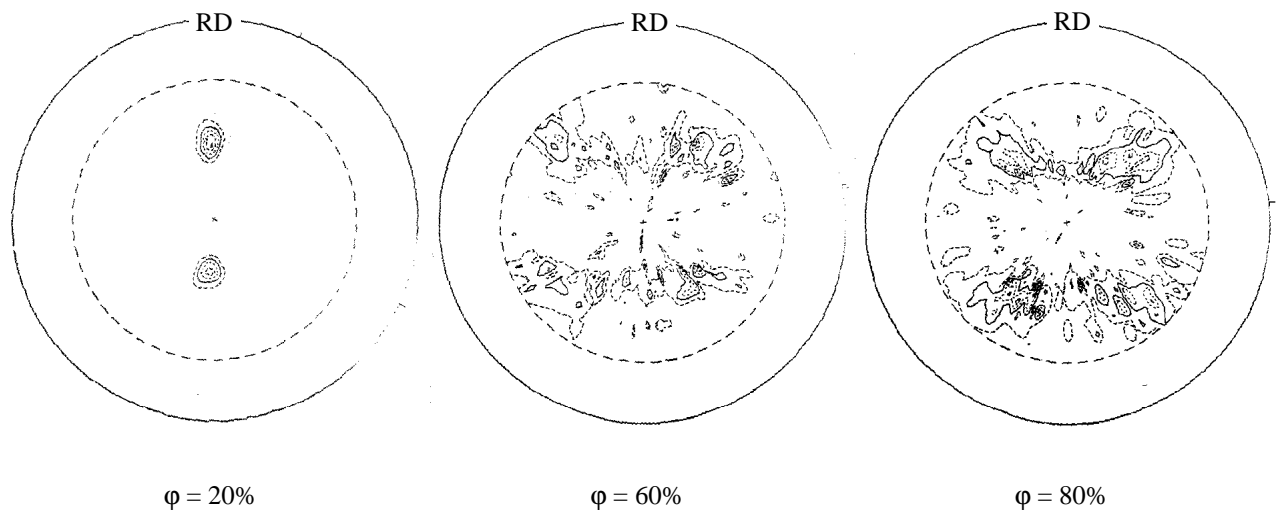


Abb. 6: (111)-Polfiguren von gewalztem Silberchlorid, T=25°C

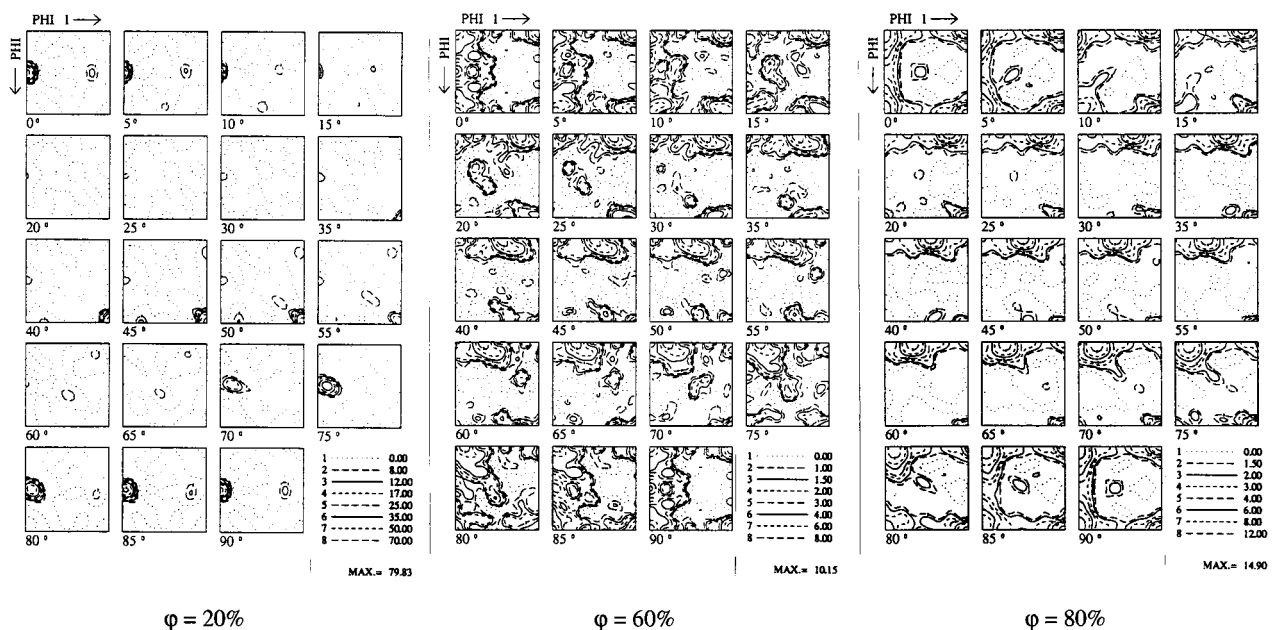


Abb. 7: ODF von gewalztem Silberchlorid

zen auszuschließen. Die Ausgangskörner zeigten deutliche Elongationen mit einer ungefähr doppelt so großen Länge wie Breite. Die Korngrößen variierten von $50\ \mu\text{m}$ bis $100\ \mu\text{m}$. Bei einer Rekristallisationstemperatur von 100°C begann nach 6 Minuten eine kugelförmige Kornform aufzutreten, die Korngröße verringerte sich um 20%. Nach 20 Minuten war eine kugelförmige Gestalt der Körner erreicht, wobei die Korngröße bis $t=30\ \text{min}$ konstant blieb. Danach fand eine sekundäre Rekristallisation statt, welche große Körner bildete (**Abb. 8**) und makroskopisch nach dem Ätzen beobachtet werden konnte.

peraturen rufen eine Koagulation der Ausscheidung hervor /7/. Daraus folgt, daß eine höhere Anzahl von Körnern in der Lage ist gleichzeitig zu wachsen wodurch die Ausbildung kleinerer Körner begünstigt wird. Bei einphasigem Material kann dieser Effekt durch Verunreinigungen hervorgerufen werden. Bei Silberchlorid, welches sichtbarem Licht ausgesetzt wurde, ist immer koaguliertes Silber vorhanden, welches möglicherweise verantwortlich für diesen Effekt ist.

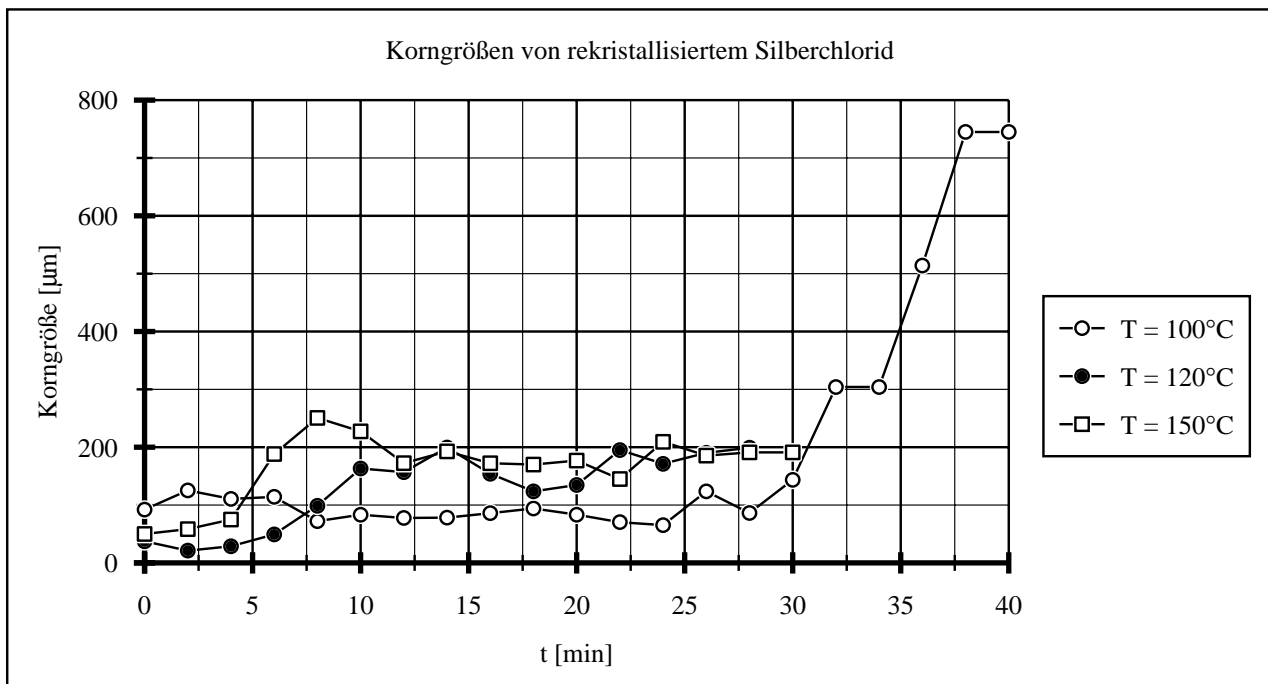


Abb. 8: Kornwachstum von AgCl bei verschiedenen Rekristallisationstemperaturen und 30%igem Umformgrad

Bei einer Temperatur von 120°C begann die sekundäre Rekristallisation bereits nach 6 Minuten, jedoch wurde eine Korngröße von $200\ \mu\text{m}$ nicht überschritten, obwohl die Proben 30 Minuten lang dieser Temperatur ausgesetzt waren. Bereits nach 10 Minuten war diese Größe erreicht und zur gleichen Zeit wurde die Struktur kugelförmig. Die sekundäre Rekristallisation begann schon nach 4 Minuten als eine Temperatur von 150°C verwendet wurde. Die endgültige Größe wurde nach 6 Minuten erreicht, aber die Verringerung der Kornstreckung trat erst bei $t=15\ \text{min}$ auf. Natürlich kann erwartet werden, daß die sekundäre Rekristallisation bei einer Erhöhung der Temperatur zu früheren Zeiten stattfindet. Im Gegensatz dazu steht die Verminderung der Kornstreckung, welche bei Erhöhung der Temperatur zu einem späteren Zeitpunkt einsetzt. Bei hohen Glühtemperaturen wurden geringe endgültige Korngrößen erhalten. Hohe Tem-

5 Spannungsoptischer Effekt in monokristal- linem Silberchlorid

Um spannungsoptische Effekte mit Texturen in Zusammenhang bringen zu können, ist es notwendig, die Beziehung zwischen Spannungszustand und spannungsoptischem Effekt, also relative Verzögerung und Auslöschungswinkel, zu quantifizieren. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen am Einkristall durchgeführt. Im Allgemeinen fallen die Hauptspannungsrichtungen, die Hauptachsen der Indikatrix oder des Fresnel-Ellipsoids, die Kristallachsen, die Wellennormale und die Orientierung der Probe nicht zusammen. In den gegenwärtigen Untersuchungen werden Probenrichtung, Spannungsrichtung und Richtung der Wellennormalen gleich gewählt. In diesem Falle muß nur die Orientierung des Index-Ellipsoids und die Kristallorientierung in Bezug auf das Probenkoordinatensystem bekannt sein. Der Auslöschungswinkel

wurde mit einem einfachen Polarisoskop gemessen und die Kristallorientierung mit einem Röntgentexturgoniometer. Der Winkel zwischen dem Fresnel-Ellipsoid und der Probe ist vom Spannungstensor, Spannungswert und der Orientierung der Probe abhängig. Für diese Bestimmung ist es notwendig, die relative Phasenverschiebung zu ermitteln. Dies geschieht durch die Kompensationsmethode nach Sénarmont, für die die meisten Polarisoskope ausgerüstet sind.

Eine planparallele Silberchloridplatte wird unter ebenem Spannungszustand betrachtet. Die Platte wird aus dem Probenrohling in zufälliger Orientierung herausgeschnitten, so daß drei Koordinatensysteme in Betracht gezogen werden müssen. Sie werden als XYZ-Kristallkoordinaten, X'Y'Z'-Hauptspannungssystem mit einer zu der Plattenoberfläche senkrechtstehenden Z'-Komponente und X''Y''Z''-Koordinatensystem des optischen Ellipsoids bezeichnet. Das Indexellipsoid, ausgedrückt im X'Y'Z'-System, besitzt die allgemeine Form:

$$B'_{11}x'^2 + B'_{22}y'^2 + B'_{33}z'^2 + 2B'_{23}y'z' + 2B'_{13}x'z' + 2B'_{12}x'y' = 1 \quad (1)$$

Für den ebenen Fall mit Z'=0 vereinfacht sich dies zu einer Ellipse der Form:

$$B'_{11}x'^2 + B'_{22}y'^2 + 2B'_{12}x'y' = 1 \quad (2)$$

Die B'_{ij} beschreiben die Abschnitte der Ellipse auf dem Koordinatensystem, wogegen B'_{12} ein Maß für den Winkel α ist, welcher der optischen Isokline oder dem Auslöschungswinkel entspricht.

$$\tan 2\alpha = \frac{2B'_{12}}{B'_{11} - B'_{22}} \quad (3)$$

Das Fresnel-Ellipsoid und der Spannungszustand, welcher ebenfalls ein Ellipsoid repräsentiert, müssen in Beziehung zueinander gesetzt werden. Dazu ist ein System von 36 spannungsoptischen Koeffizienten π_{ij} für den allgemeinen Fall erforderlich. Aufgrund kubischer Symmetrie bleiben nur drei Koeffizienten übrig. Mit der Annahme, daß die Änderungen der Koeffizienten B'_{ij} des Ellipsoids lineare Funktionen der Spannungen /8/ sind, können diese Koeffizienten folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} B'_{11} - v_0^2 &= \pi'_{11}\sigma_1 + \pi'_{12}\sigma_2 \\ B'_{22} - v_0^2 &= \pi'_{12}\sigma_1 + \pi'_{22}\sigma_2 \\ 2B'_{12} &= \pi'_{16}\sigma_1 + \pi'_{26}\sigma_2 \end{aligned} \quad (4)$$

Hierbei sind die σ_i die Hauptspannungen, v_0 die Licht-

geschwindigkeit in unbelastetem AgCl und die π'_{ij} Funktionen der drei piezooptischen Koeffizienten π'_{11}, π'_{12} und π'_{44} im Kristallkoordinatensystem. Wenn diese in Gleichung (4) und dann in (3) eingesetzt werden, wird α als Funktion der piezooptischen Koeffizienten, der Hauptspannungen und der Richtungscosini der Winkel zwischen dem Kristall- und dem Probenkoordinatensystem, die alle bekannt sind, erhalten.

Der Winkel α der optischen Isokline beschreibt die Polarisierungsebenen der beiden Wellen, die aus dem Kristall austreten. Der relative Gangunterschied beider Wellen kann mittels einer Kompensationsmethode durch Addition oder Subtraktion eines künstlichen Gangunterschiedes, bis die Auslöschung für eine bestimmte Wellenlänge auftritt, ermittelt werden. Wenn dies in monochromatischem Licht durchgeführt wird, kann eine Genauigkeit bis zu 0,02 Isochromatenordnungen erreicht werden. Sowohl der Gangunterschied als auch die optische Isokline hängen vom Spannungszustand ab, wie bereits erwähnt wurde. Daher ist die Beziehung zwischen dem Gangunterschied und dem Spannungszustand zu formulieren. Wenn Gleichung (4) im optischen KS X''Y''Z'' ausgedrückt wird, ergibt sich:

$$\begin{aligned} B''_{11} - v_0^2 &= \pi''_{11}\sigma_{x''} + \pi''_{12}\sigma_{y''} + \pi''_{16}\tau_{x''y''} \\ B''_{22} - v_0^2 &= \pi''_{12}\sigma_{x''} + \pi''_{22}\sigma_{y''} + \pi''_{26}\tau_{x''y''} \\ 2B''_{12} = 0 &= \pi''_{16}\sigma_{x''} + \pi''_{26}\sigma_{y''} + 2\pi''_{26}\tau_{x''y''} \end{aligned} \quad (5)$$

Die B''_{ij} repräsentieren die Geschwindigkeiten der polarisierten Lichtwellen, welche aus dem Kristall austreten. Nach /8/ werden diese wie folgt dargestellt:

$$\begin{aligned} B''_{11} &= v_0^2 \left(1 + \frac{p}{v_0^2} \sigma_{x''} + \frac{q}{v_0^2} \sigma_{x''} \right) \\ B''_{22} &= v_0^2 \left(1 + \frac{q}{v_0^2} \sigma_{x''} + \frac{r}{v_0^2} \sigma_{x''} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

wobei p, q und r Funktionen der piezooptischen Koeffizienten und der Orientierung des optischen Koordinatensystems in Bezug auf das kristallographische System sind. Die Lichtwellengeschwindigkeiten müssen dann in Form von Brechungsindizes ausgedrückt werden. Rücktransformation der Spannungen in Hauptspannungen führt zu Gleichung (7) für den relativen Gangunterschied δ.

$$\begin{aligned} \delta = d \frac{V}{2v_0^3} \{ &[(p-q)\cos^2 \alpha - (r-q)\sin^2 \alpha]\sigma_1 \\ &+ [(p-q)\sin^2 \alpha - (r-q)\cos^2 \alpha]\sigma_2 \} \end{aligned} \quad (7)$$

V ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und d die

Dicke der Probe. Mit diesen Beziehungen kann der Spannungszustand aus den spannungsoptischen Messungen ermittelt oder andererseits können spannungsoptische Konstanten des Materials ermittelt werden.

6 Experimentelle Untersuchung von Einkristallen unter Zugbelastung

Die verwendeten Silberchlorid-Einkristalle waren 30 mm lang, 10 mm breit und 3 mm dick. Es wurden kleine Klammern als Probenhalterung konstruiert. Ihre Besonderheit bestand darin, daß der Kontaktdruck proportional zur Zuglast war, damit die Kontaktstellen nicht mehr als nötig deformiert wurden. Zusammen mit einem Ringkraftmesser wurden die Proben in einen Belastungsrahmen gesetzt, wobei die Last in Schritten von jeweils 50 N bis zu einer Grenze von 15 N/mm² erhöht wurde. Eine der Proben zerbrach bei Erreichen diesen Wertes. Plastische Verformung setzte bei 3-5 N/mm² ein.

Der Belastungsrahmen wurde mit den Proben in einen vergrößertes Projektionspolariskop eingesetzt, wobei Auslöschungswinkel und Isochromatenordnungen gemessen wurden. Während die Last schrittweise erhöht wurde, erfuhr der Probenquerschnitt eine Scherung. **Abb. 9** zeigt die auf den wahren Querschnitt bezogene Spannung über der Isochromatenordnung für drei Proben. Auch im plastischen Bereich, welche bei einer Spannung von weniger als 5 N/mm² beginnt, zeigen sie eine gute Linearität.

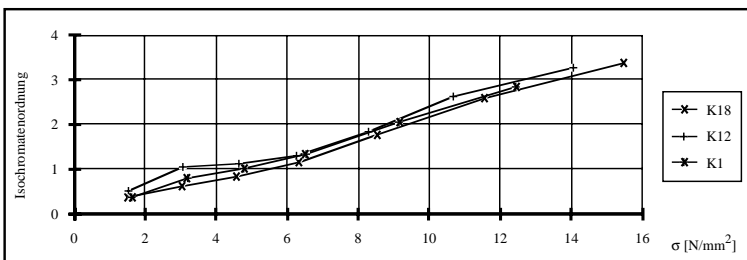


Abb. 9: Isochromatenordnung bei λ=546 in Abhängigkeit der Probenbeanspruchung, Proben K1, K12 und K18

Es stellt sich die Frage, ob die Messungen in Einklang mit den Theorien aus Kapitel 5 stehen. Aus den oben angegebenen Gleichungen folgt, daß drei piezooptische oder elastooptische Konstanten und einige Transformationsmatrizen benötigt werden. Die Orientierung der Probe K12 wurde mit Hilfe eines Röntgengoniometers mit den Werten (-2,1,8) [-3,1,-1] gemessen. Die benötigten optischen Konstanten wurden bislang überhaupt nur zweimal durch spannungs-

optische Messungen bestimmt. Die Werte sind in **Tab. 1** angegeben.

	West / Makas	Goodman / Sutherland	Gieleßen
$\pi_{11} - \pi_{12}$	$-5,62 \cdot 10^{-6}$	$-9,4 \cdot 10^{-6}$	$-5,72 \cdot 10^{-6}$
π_{44}	$8,89 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$	$7,97 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 1: Werte der piezooptischen Konstanten nach /9/, /10/, Autor. (Einheiten=mm²/N)

Es ist nicht möglich π_{11} und π_{12} mit spannungsoptischen Mitteln zu trennen. Um diese Konstanten zu vereinzeln ist eine Messung des absoluten Gangunterschiedes mit einem Interferometer notwendig. Aus diesen Konstanten, der Kristallorientierung und der aufgetragenen Beanspruchung wird eine theoretische Isochromatenordnung erhalten und mit der gemessenen Isochromatenordnung verglichen. Als Lichtquelle dient eine Weißlichtquelle mit Metallinterferenzfilter mit einer Wellenlänge von 589 nm.

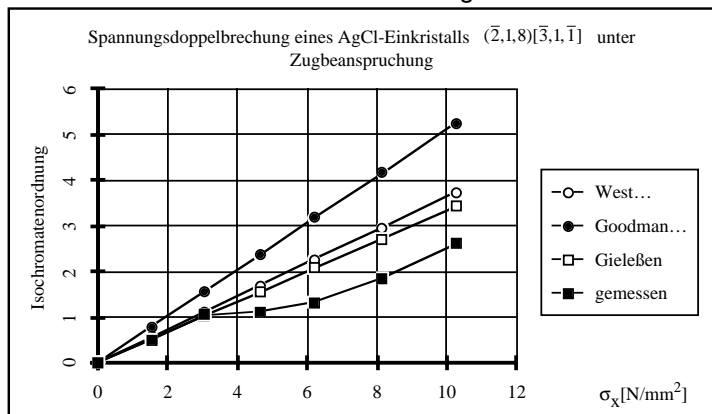


Abb. 10: Spannungsoptische Messungen und Theorie

Bis zu einer Spannung von 3 N/mm² stimmten die Messungen mit den theoretischen Werten, die aus den Konstanten berechnet wurden, gut überein (**Abb. 10**). Oberhalb dieses Wertes setzte plastisches Fließen ein und die Isochromatenordnung erhöhte sich nur wenig bis 6N/mm² erreicht waren. Bei höheren Spannungswerten werden die Kurven wieder linear. Dies wird durch eine Orientierungsänderung des Kristalls bei Fließbeginn bewirkt. Doppelbrechende Bänder, wie oben erwähnt, konnten bei Fließbeginn deutlich beobachtet werden und breiteten sich über den größten Teil der Probe bis zu einer Spannung von 6N/mm² aus. Oberhalb dieses Wertes war die Orientierungsänderung beendet und der spannungsoptische Effekt wurde wieder linear.

7 Optische Anisotropie von Silberchlorid

Die Orientierung der Körner wird durch den Brechungszustand dargestellt. Die Beziehung zwischen Indikatrix oder dem Fresnel-Ellipsoid und dem Spannungszustand wird durch die elasto-optischen oder piezo-optischen Konstanten beschrieben. Im Allgemeinen kann dies wie folgt beschrieben werden:

$$\Delta B_{ij} = \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad \pi_{ijkl} = \text{piezo-optische Konstanten} \quad (8)$$

$$\Delta B_{ij} = p_{ijrs} \epsilon_{rs} \quad p_{ijrs} = \text{elasto-optische Konstanten}$$

$$p_{ijrs} = \pi_{ijkl} c_{klrs} \quad c_{klrs} = \text{elastische Konstanten}$$

wobei π_{ijkl} und p_{ijrs} Tensoren vierter Stufe kennzeichnen und die Materialeigenschaft mit 81 Komponenten im allgemeinen Fall beschreiben. Unter Berücksichtigung der kubischen Kristallsymmetrie ist es einfacher die Matrixdarstellung π_{mn} und p_{mn} zu verwenden, mit $m, n = 1 - 6 / 11/$. Im Fall des kubischen $m3m$ Materials verbleiben die Konstanten π_{11}, π_{12} und π_{44} .

Diese drei piezo-optischen Konstanten wurden für das kubische Material mit Hilfe eines einfachen interferometrischen Aufbaus bestimmt. Bisher wurden nur wenige Messungen durchgeführt und da die interferometrischen Ordnungen nicht sehr klar waren, müssen weitere Untersuchungen hierzu durchgeführt werden. Aus den vorläufigen Konstanten ($\pi_{11} = 4.38 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$, $\pi_{12} = 1.01 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{N}$, $\pi_{44} = 7.97 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$) kann mit Hilfe von Gleichung 9 / 11/ eine räumliche Darstellung (Abb. 11) berechnet werden.

$$\pi_{\vec{r}} = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \frac{1}{2} \pi_{44})(I_1^2 I_2^2 + I_2^2 I_3^2 + I_3^2 I_1^2); \quad (9)$$

$$\vec{r} = \{I_1, I_2, I_3\}$$

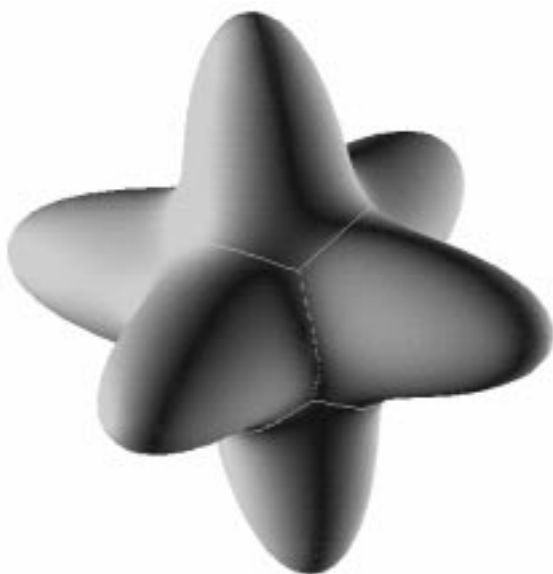


Abb. 11: Orientierungsabhängigkeit der piezo-optischen Konstante von Silberchlorid

Die Richtungen der Maximalwerte sind die Würfelachsen. Da dieses Diagramm die piezo-optische Konstan-

te darstellt, wird der spannungsoptische Effekt (Isochromatenordnung), welcher immer ein differentieller Effekt ist, nicht gezeigt.

Im einfachen Fall der einachsigen Belastung in [001]-Richtung, wird der relative Gangunterschied normal zur Probenoberfläche und der Spannungsrichtung aus den piezo-optischen Konstanten zu

$$s = -\frac{1}{2} d n_0^3 (\pi_{11} - \pi_{12}) \sigma \quad (10)$$

berechnet, mit n_0 als isotropem Brechungsindex und d als Probendicke. Bezogen auf die verwendete Wellenlänge ergibt sich die Isochromatenordnung.

8 Spannungsoptische Anisotropie in polykristallinem Material

Der logisch nächste Schritt ist zu zeigen, ob überhaupt sichtbare Effekte optischer Anisotropie im Silberchlorid auftreten. Eine Probe wurde mit einem Umformgrad von 60 % gewalzt und dann derart teilweise rekristallisiert, daß grobe Körner entstanden. Die Probe wurde daraufhin unter Zugbelastung in einem Polariscope beobachtet (Abb. 12).

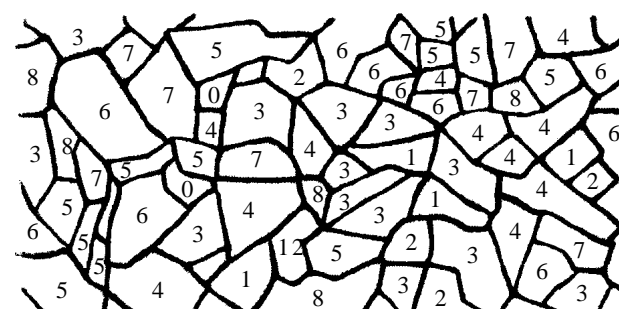


Bild 12: Isochromatenordnung in polykristallinen Proben unter Zug (Einheit = 1/10)

Die verschiedenen Körner zeigen sich orientierungsabhängig in verschiedenen Farben (=Isochromatenordnungen). Im spannungsoptischen Bild sind die Korngrenzen etwas undeutlich aufgrund der teilweisen Überlappung in Blickrichtung.

Die Richtungsabhängigkeit des spannungsoptischen Effekts kann mit einer in verschiedenen Richtungen belasteten texturierten Probe demonstriert werden. Wiederum wurden Proben mit 60%igem Umformgrad

gewalzt und aus ihnen wurden die Proben unter Winkeln von 0° , 45° und 90° zur Walzrichtung ausgeschnitten. Diese wurden einer Zugspannung ausgesetzt und der relative Gangunterschied wurde gemessen (**Tab. 2**).

$$\begin{aligned} s_{0^\circ} &= 2,78 \text{ nm/N} \\ s_{45^\circ} &= 3,67 \text{ nm/N} \\ s_{90^\circ} &= 2,27 \text{ nm/N} \end{aligned}$$

Tabelle 2: Relativer Gangunterschied, in verschiedenen Richtungen gemessen

$$s = s_0 + s_2 \cos 2\alpha + s_4 \cos 4\alpha \quad (11)$$

$$s_0 = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{s_{90^\circ}} + \frac{1}{s_{0^\circ}} + \frac{2}{s_{45^\circ}} \right] = 0,335 \quad (12)$$

$$s_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{s_{90^\circ}} - \frac{1}{s_{0^\circ}} \right] = 0,040$$

$$s_4 = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{s_{90^\circ}} + \frac{1}{s_{0^\circ}} - \frac{2}{s_{45^\circ}} \right] = 0,063$$

Die Winkelabhängigkeit des Gangunterschiedes wird durch Gleichung (11) ausgedrückt. Aus den Messungen wurden der isotrope Anteil und die Anteile doppelter und vierfacher Symmetrie in der Walzebene errechnet /12/. Im Polardiagramm (**Abb. 13**) kann die Anisotropie des spannungsoptischen Effekte in der Walzebene deutlich erkannt werden.

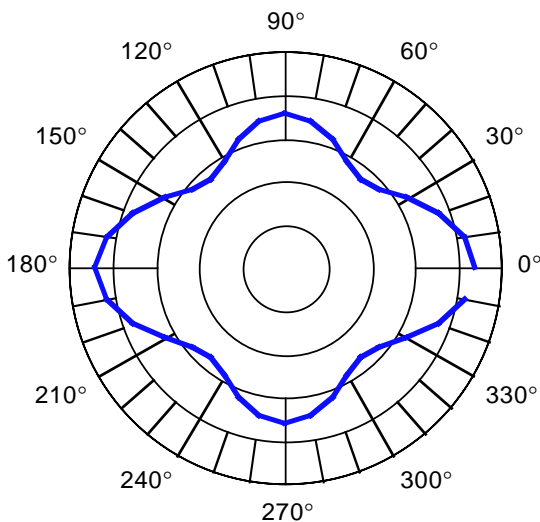


Bild 13: Optische Anisotropie gewalzter Proben

Die Koeffizienten und das Diagramm in **Abb. 13** zeigen, daß der isotrope Bereich dominiert und daß die Richtung des größten Effektes mit der Walzrichtung übereinstimmt.

Zusammenfassung

Einige Weiterentwicklungen der Anwendung der Spannungsoptik wurden vorgestellt. Zum ersten Mal wurden Metallverarbeitungsprozesse benutzt, um

mechanische und optische Anisotropie in einem doppelbrechenden Material herzustellen, um damit eine mechanische Anisotropie in Metallteilen zu simulieren. Sobald die photoelastischen Konstanten genauer bekannt sind, wird es möglich sein sie mit den ODF-Koeffizienten zu gewichten und den makroskopischen, spannungsoptischen Effekt texturierter Proben quantitativ zu erhalten. Mit den dann bekannten Beziehungen zwischen Textur und photoelastischen Effekt können die Modellgesetze formuliert werden.

Literatur

- /1/ Tamman, G. (1932). *Naturwissenschaften*, **20**, 958.
- /2/ Stepanov, A.V., Zhitnikov, R.A. (1956a). An optical method of investigation of averaged stressed states in small-grained polycrystals, part I: Preparation of small-grain polycrystal specimens of silver chloride. *Soviet Physics - Technical Physics*, **4**, 754 - 761.
- /3/ Stepanov, A.V., Zhitnikov, R.A. (1956b). An optical method of investigation of averaged stressed states in small-grained polycrystals, part III: Photoelastical (piezooptical) properties of polycrystalline silver chloride, *Soviet Physics - Technical Physics*, **4**, 769 - 776.
- /4/ Weber, H.J. (1986). *Eigenschaften des spannungsoptisch aktiven Modellwerkstoffes Silberchlorid und seine Anwendung auf die Untersuchung von Spannungszuständen mit teilweise plastischer Verformung*. Dissertation, Universität Clausthal.
- /5/ Nye, J.F. (1949). Plastic deformation of silver chloride (Part I). *Proc. Royal Soc. London*, **A198**, 190 - 204.
- /6/ Gmelin (1971). *Handbuch der anorganischen Chemie*, **Ag[B1]**, 6.2.3.7.3, pp. 378 - 380, Weinheim: Verlag Chemie GmbH.
- /7/ Brickenkamp, W. (1984). Kornvergrößerung, sekundäre und tertiäre Rekristallisation. In *Rekristallisation metallischer Werkstoffe*, Hrsg. G. Gottstein, pp. 83 - 98, Oberursel: Deutsche Gesellschaft für Metallkunde.
- /8/ Krasnov, V.M. (1947). On determination of stress in cubic crystals by means of the optical method. *Uchenye Zapiski LGU, ser. mat.-mech.*, **13**, no.87, 97 - 114 (in russian).
- /9/ West, C.D., Makas, A.S. (1948). Technical crystals with abnormally large stress birefringence. Polaroid Corporation, Cambridge 39, Massachusetts.
- /10/ Goodman, E., Sutherland, J.G. (1953). Elasto-plastical stress-optical effect in AgCl single crystals. *J. Appl. Phys.*, **24**, 5, 577 - 584.
- /11/ Nye, J.F. (1957). *Physical properties of crystals*, reprinted 1967, London: Clarendon Press
- /12/ Bunge, H.J., Esling, C. (1982). Mean values of physical properties. In *Quantitative Texture Analysis*, Hrsg. H. J. Bunge, C. Esling, pp. 383 - 406, Oberursel: Deutsche Gesellschaft für Metallkunde.

Erfassung von mechanischen Beanspruchungen an bewegten Maschinenteilen und deren drahtlose Übertragung

Henschel, J. ; Romann, M.

Im folgenden wird ein Verfahren zur Erfassung von mechanischen Beanspruchungen bewegter Maschinenteile vorgestellt.

Die Ermittlung der Dehnungen an Originalbauteilen erfolgt mittels Dehnungsmeßstreifen. Die Anzahl der Telemetriekanäle ist jedoch begrenzt und bildet den Engpaß bei der Übertragung auf die ruhende Umgebung. Ein Multiplexer vergrößert die Anzahl übertragbarer Kanäle, indem die Signale zeitlich versetzt voneinander unterschieden werden. Eine leistungsfähige, rechnergestützte Meßwerterfassung ermöglicht die Trennung der Signale nach ihrem Ursprung und ermöglicht die Weiterverarbeitung.

You will get a description how to capture measurement data from moving machine parts.

The stress/strain behaviour from machine parts is measurable with wire resistance strain gauges. A telemetry system to transmit the signals from the moving parts is necessary. The number of channels for simultaneous use from these transmitting systems is restricted.

A possibility to increase the number of data channels is given with an multiplexer.

1. Einleitung

Die durch mechanische Lasten verursachten Dehnungen in Maschinenteilen können mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen in elektrische Signale gewandelt werden.

Die den Anforderungen entsprechende Verschaltung der DMS in eine Wheatstonesche Brücke führt zu einer, der Dehnungen proportionalen, Brückenquerspannung. Die geringen Dimensionen der Meßwert erzeugenden Glieder, DMS und Brücke, ermöglicht die Applikation auf Bauteilen unterschiedlichster Gestalt und Größe.

Die Messung der o.g. Werkstoffanstrengungen auf bewegten Maschinenteilen führt zu der Problematik der Übertragung der Meßsignale in die ruhende Um-

gebung. Hierbei lassen sich prinzipiell unterschiedliche Lösungen verwenden.

2. Lösungsprinzipien

Eine Unterscheidung in berührlose und berührende Übertragungsmethoden ist Ausgangspunkt der Überlegungen. Die Analyse der Systeme führt zu den Vor- und Nachteilen der ausgeführten Übertragungsglieder.

2.1 Schleifringläufer

Der Schleifringläufer repräsentiert die berührenden Übertragungsglieder.

Die Übertragung der Meßsignale erfolgt über eine mit Schleifkontakten versehene Welle. Diese folgt der rotatorischen Bauteilbewegung durch eine torsionssteife Verbindung. Die Signale werden über das Aufsetzen von ortsfesten Kohlebürsten abgegriffen. Das Beispiel der Übertragung bei rotatorischer Bewegung läßt sich ebenso auf translatorische Bewegungen übertragen.

Die Vorteile einer Signalübertragung mittels eines Schleifringläufers liegt primär in der Robustheit des verwendeten Bauteils. Die durch Kapselung erreichbare Unempfindlichkeit gegen Umwelteinflüsse führt zu einer vergleichsweise geringen Sekundärbeeinflussung der übertragenen Signale.

Als Nachteil dieses berührenden Übertragungselementes ist die hohe Amplitude, eines dem Meßsignal überlagerten Rauschens, zu nennen. Diese durch das Arbeitsprinzip verursachte Störung läßt sich nur bei stationärem Signalpegel, ohne Auswirkungen auf den Absolutwert des Nutzsignals, kompensieren.

Somit erscheint nur die Übertragung zeitlich konstanter Signale (z.B. Energieübertragung) als sinnvoll.

Für die Übertragung von dynamischen Signalen mit großer Varianz der Extremwerte kann ein berührendes Übertragungsglied die geforderten Genauigkeiten nicht gewährleisten. Der Einsatz eines berührungslosen Übertragers empfiehlt sich.

2.2 Telemetrie

Eine Telemetrieanlage wird zur berührungslosen Übertragung von Signalen verwendet. Zur Signalübertragung vom bewegten Maschinenteil werden ein oder mehrere FM-VHF-Sender (235MHz) eingesetzt. Die Sender werden auf dem bewegten Bauteil appliziert. Bei einer Versorgungsspannung von 8-12V stellen sie eine stabilisierte Brückenversorgungsspannung von 5V bereit. Ein integrierter Vorverstärker mit variablem Verstärkungsfaktor stellt die Eingangssignale für einen Spannung-Frequenzumsetzer bereit.

Die modulierte Trägerfrequenz wird von einem VHF Tuner mit Breitband ZF-Verstärker und FM-Diskriminator empfangen. An einem Analogausgang mit variablem Verstärkungsfaktor wird das Meßsignal typischerweise in einem Spannungsbereich von +/- 5V ausgegeben.

Die Vorteile der berührungslosen Übertragung liegen in der hohen erreichbaren Genauigkeit der übertragenen Signale (0,1% Meßverstärker).

Ein Nachteil des Systems stellt die Begrenzung auf sieben parallel betreibbarer Sender/Empfänger dar. Eine größere Bandbreite der Trägerfrequenzen wird nicht zur Verfügung gestellt.

Besteht die Anforderung mehr als sieben Signale zeitgleich zu übertragen, muß das System erweitert werden. Im folgenden wird der Aufbau und die Funktion eines Multiplexers erläutert. Dieser "Schalter" ermöglicht eine Übertragung von bis zu 32 unterschiedlichen Signalen über vier Telemetriesender/Empfänger /1/.

3. Multiplexer

Ein am IMW entwickelter Multiplexer schaltet 32 Meßstellen auf 4 Sender durch. Hierzu bot sich der CMOS-Baustein 4051 an, ein 8-Kanal Multiplexer/Demultiplexer mit 3 Adressen- und einer Freigabeleitung /2/. Dieser Multiplexer wählt aus 8 Eingangssignalen, entsprechend der angelegten Adresse, ein Signal aus. Kaskadiert man diesen Baustein 8fach, so eignet er sich als 8 aus 64 Auswahlregister. Jede Meßstelle ist an 2 Leitungen angekoppelt, die auch zu den Sendern geführt werden müssen. Acht Bausteine entsprechen somit der Forderung nach 32 Meßstellen. **Bild 1** zeigt schematisch die Schaltung.

Die durchgeschalteten Kanäle verhalten sich wie

ohmsche Widerstände von 120Ω und wirken nicht verfälschend auf den Meßwert, da die Eingangsimpedanzen der Sender im Megaohmbereich liegen. Tests haben gezeigt, daß das Übersprechen der unterschiedlichen Kanäle unterhalb der Meßgenauigkeit

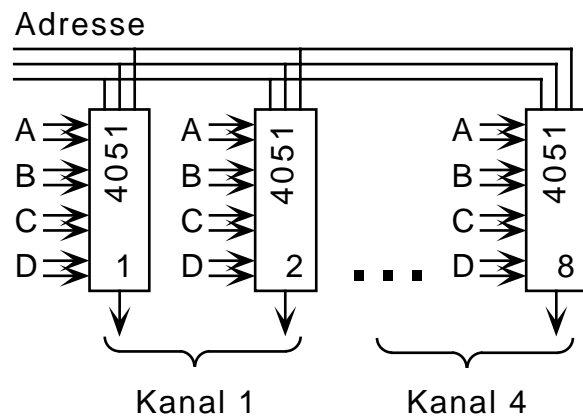


Bild 1: Schema des Multiplexers

der gesamten Applikation liegt. Das dynamische Verhalten kann bei einer Umschaltfrequenz von 100 Hz als unkritisch bewertet werden.

Die Umschaltfrequenz des Multiplexers wird von einem Quarzoszillator gebildet, der mit 100Hz taktet. Ein nachgeschalteter Dezimalzähler steuert den Adresseingang des Multiplexers an. Mit dieser Schaltung werden je 4 Meßstellen für 10 Millisekunden parallel übertragen, dann schaltet der Multiplexer auf die nächsten 4 Meßstellen weiter. Ein Zyklus durch alle Meßstellen dauert 80 Millisekunden.

4. Meßwerterfassung

Die Grenzfrequenz der erfaßten Signale wurde auf 2 Hertz festgelegt. Um einen Aliasing-Effekt zu umgehen, mußte eine Schaltfrequenz des Multiplexers von 100 Hertz realisiert werden. Bei einer Abtastrate von 1 kHz je Kanal wird jede Meßstelle mit 10 Werten repräsentiert. Die Abtastung und A/D Wandlung der Signale erfolgt mittels einer Meßwerterfassungskarte der Firma Dasy-Lab.

Die Darstellung, Skalierung und Weiterverarbeitung der Meßsignale wird mit Hilfe eines leistungsfähigen PC vorgenommen.

Literatur

- /1/ datatel Telemetrieelektronik
Applikationsschrift der Fa. datatel
- /2/ CMOS-Taschenbuch, Standardbausteine
IWT-Verlag 1987

DIE EXPRESSMETHODE FÜR DIE BESTIMMUNG DER SPRÖDFESTIGKEIT DES SCHNEIDKEILES

Prof. Dr. Techn. Wiss. Artschil J. Betaneli

1. E I NLEITUNG

Beim Spanen der meisten Werkstoffe wird die Arbeitsproduktivität durch ungenügende Festigkeit und Standhaltigkeit der Werkzeugschneide beschränkt. In Abhängigkeit von den Arbeitsbedingungen erfolgt bei ungenügender Festigkeit die Zerstörung der Schneide durch Ausbrockeln und spröden Bruch, oder durch plastische Verformung und nachfolgenden Gleitbruch. Das heißt, derselbe Werkstoff kann in Abhängigkeit von den Belastungsbedingungen sowohl durch spröden Bruch, als auch durch plastische Deformation zerstört werden.

In der Betriebspraxis senkt man oft die Schnittbedingungen, um die Werkzeugzerstörung zu vermeiden. Deshalb ist in der Praxis die Festigkeitserhöhung des Schneidkeiles ein wichtiges Problem. Besonders wichtig ist dieses Problem für ein Flexibles Fertigungs System (FFS).

Der Autor hat an der Georgischen Technischen Universität in Tbilissi die Untersuchungen der Sprödfestigkeit des Werkzeugschneidkeiles durchgeführt. Die Forschungsergebnisse wurden in sowjetischen wissenschaftlichen Fachzeitschriften und Büchern seit 1964 veröffentlicht. Diese Forschungsergebnisse sind auch in Deutschland /1,2,3/ veröffentlicht. Später hat der Autor eine experimentelle Expressmethode für die Bestimmung der Sprödfestigkeit des Schneidkeiles geschaffen /4, 5/.

In diesem Artikel sind Forschungsergebnisse des Autors im Gebiet der experimentellen Expressmethode für die Bestimmung der Sprödfestigkeit des Schneidkeiles mitgeteilt. Diese Methode kann man beim Zerspanen mit geraden und ungeraden Schneiden anwenden. Es ist bekannt, daß beim geraden Spanquerschnitt die Schnitttiefe größer als der Vorschub ist, und beim ungeraden Spanquerschnitt der Vorschub größer als die Schnitttiefe ist. Die Methode kann man für Werkzeuge mit Hartmetallen und Schneidkeramik verwenden.

Unter bestimmten Betriebsbedingungen tritt der Sprödbbruch am Werkzeug, insbesondere bei Hartmetall- und Keramikwerkzeugen, oft auf. Es wurde fest-

gestellt, daß es für jede Schneidenform eine bestimmte Grenzspannungsdicke h_g ("Bruchspannungsdicke") gibt.

Bei der Analyse von verschiedenen Fällen der Sprödzerstörung wurde festgestellt, daß man zwischen Ausbruch und Ausbrockelung unterscheiden muß. In beiden Fällen ist die Zerstörung eine Folge der Reißbildung und Reißentwicklung, aber jede Zerstörungsart beim Drehen hat ihre eigenen Besonderheiten /1/. Über die Zerstörungsarten der Schneide beim Stirnfräsen berichtet B.L.Djamojev in seinen Arbeiten, die unter der Leitung des Autors durchgeführt wurden /6/.

EXPRESSMETHODE FÜR DIE BESTIMMUNG DER SPRÖDFESTIGKEIT DES SCHNEIDKEILES BEIM DREHEN IM FREIEN SCHNITT MIT GERADEN SCHNEIDEN

Das Schema für die Bestimmung der Sprödfestigkeit ist in **Bild 1** dargestellt.

Das Werkstück 1 ist eine Kurvenscheibe, die mit der Paßfeder an die Welle 3 starr befestigt ist. Die Welle ist in das Drehbankfutter eingefuttert und mit dem Reitnagel festgespannt. Das Werkstück wird mit dem Meißel 4 zerspannt. Dabei wird das Drehen nur mit der Hauptschneide durchgeführt, d.h. das Drehen im freien Schnitt mit der musterhaft beständiger Schnittgeschwindigkeit und zunehmender Spannungsdicke h (Bild 1). Die Spannungsbreite b ist gleich der Dicke der Kurvenscheibe und bleibt unveränderlich. Die Punktlinie zeigt die Scherungslinie, welche die zylindrische Nebenschnittfläche bestimmt. Dagegen ist die zu bearbeitende Fläche unzylindrisch. In jedem Punkt bestimmt der Winkel α die Steigerung der Spannungsdicke. Dabei ist h_{max} die maximale Spannungsdicke. Für die schwer zu bearbeitenden Legierungen (z.B. sowjetische Nimonic-Legierung ChN60W) ist der Winkel α klein und die maximale Spannungsdicke ist auch relativ klein. Für die leicht zu bearbeitenden Legierungen, z.B. C40, ist der Winkel α größer und die maximale Spannungsdicke groß. Der Pfeil zeigt die Umdrehungsrichtung (die Hauptbewegung).

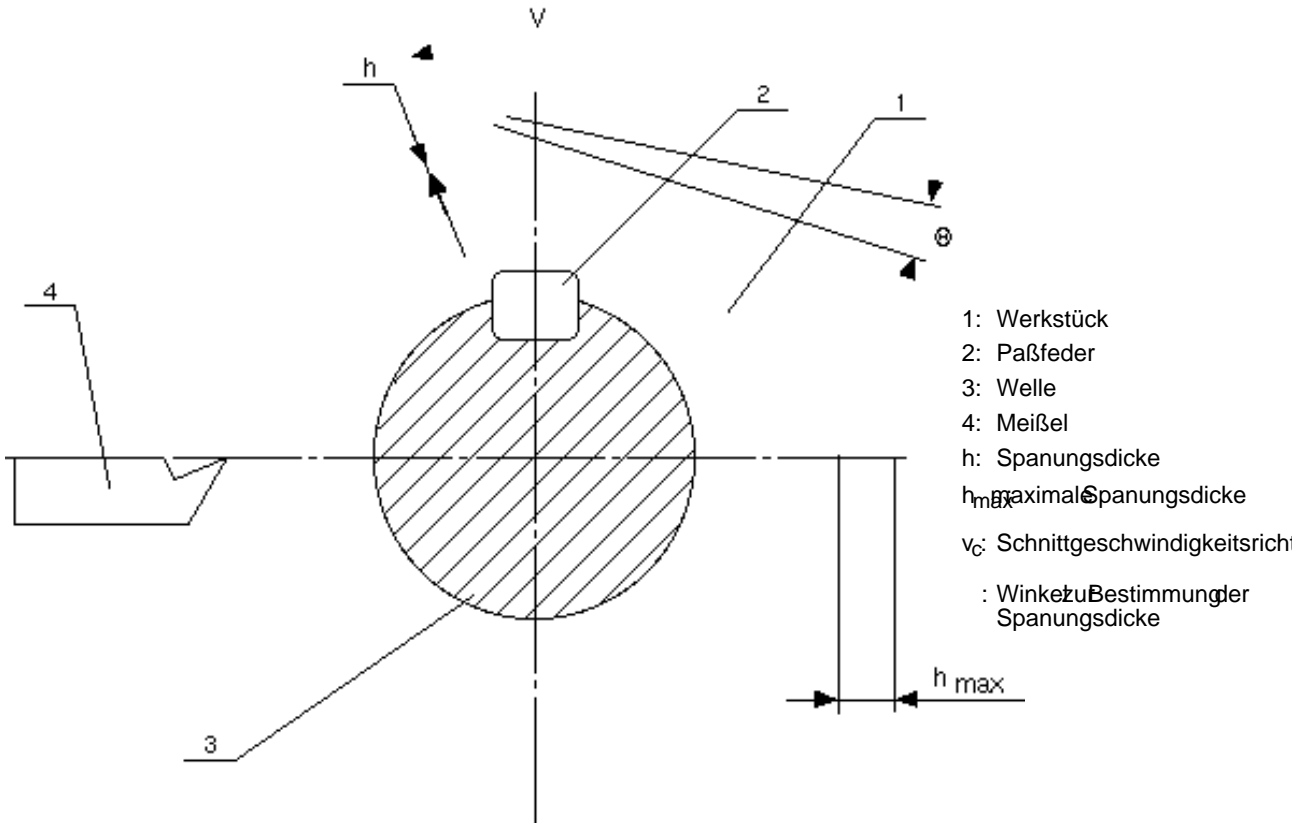


Bild 1 Das Schema der Bestimmung der Sprödfestigkeit des Schneidkeiles beim Drehen im freien Schnitt mit geraden Schneiden.

Den Augenblick der spröden Zerstörung des Schneidkeiles von Werkzeugen kann man durch die Veränderung der Oberflächengüte des Werkstückes 1 bestimmen. Dafür muß man den Winkel ϕ messen, der an der zu bearbeitenden Fläche dem Bogen zwischen dem Punkt des Schnitthanfangs und dem Punkt der Oberflächengütenveränderung entspricht. Wenn wir die maximale Spannungsstärke h_{max} und den Winkel ϕ , der dem Bogen zwischen dem Schnitthanfangspunkt und dem Punkt der maximalen Spannungsstärke entspricht, kennen, dann kann man durch die Anwendung der Formel für die Bewegungsgesetze der Kurvengetriebe die Grenzspannungsstärke h_g berechnen [4, 5].

Wenn das Kurvenscheibenprofil durch das Sinuskurvenbewegungsgesetz bestimmt ist, hat die Formel den folgenden Ausdruck:

$$h_g = h_{max} \frac{1 - \cos \phi}{2} \quad (1)$$

und beim Cosinuskurvenbewegungsgesetz:

$$h_g = h_{max} (1 - \cos \phi) \quad (2)$$

Bei der Anwendung dieser Expressmethode ist es

möglich, die Grenzspannungsstärke h_g in 2 Minuten zu ermitteln (Bei der Anwendung der klassischen Methode braucht man 40 Minuten). Dabei ist die Genauigkeit 1,5 - 2,0 mal höher.

DIE EXPRESSMETHODE FÜR DIE BESTIMMUNG DER SPRÖDFESTIGKEIT DES SCHNEIDKEILES IM GEBUNDENEN SCHNITT MIT UNGERADEN SCHNEIDEN

Das Schema der Bestimmung der Sprödfestigkeit ist in **Bild 2** dargestellt.

Das Werkstück 1 ist ein abgestumpfter Kegel, welcher in das Drehbankfutter 2 einfuttert und mit Reitnagel 3 festgespannt ist. Der Meißel 5 hat den Einstellwinkel an der Hauptschneide $\alpha = 45^\circ$, und den Einstellwinkel an der Nebenschneide $\alpha_1 = 0$. Die Schneidenlänge n_p ist gleich $1,2 S$, wobei S - der Vorschub ist.

Das Drehen wird mit beständiger Schnittgeschwindigkeit v durchgeführt. In jedem Punkt ist der Kegelwinkel Q ein veränderlicher Parameter, des Versuches, der die Spannungsstärke bestimmt. Für die schwer zu bearbeitenden Legierungen ist der Winkel Q klein, und für die leicht zu bearbeitenden Legierungen ist der Winkel Q größer.

Den Augenblick der spröden Zerstörung des Schneid-

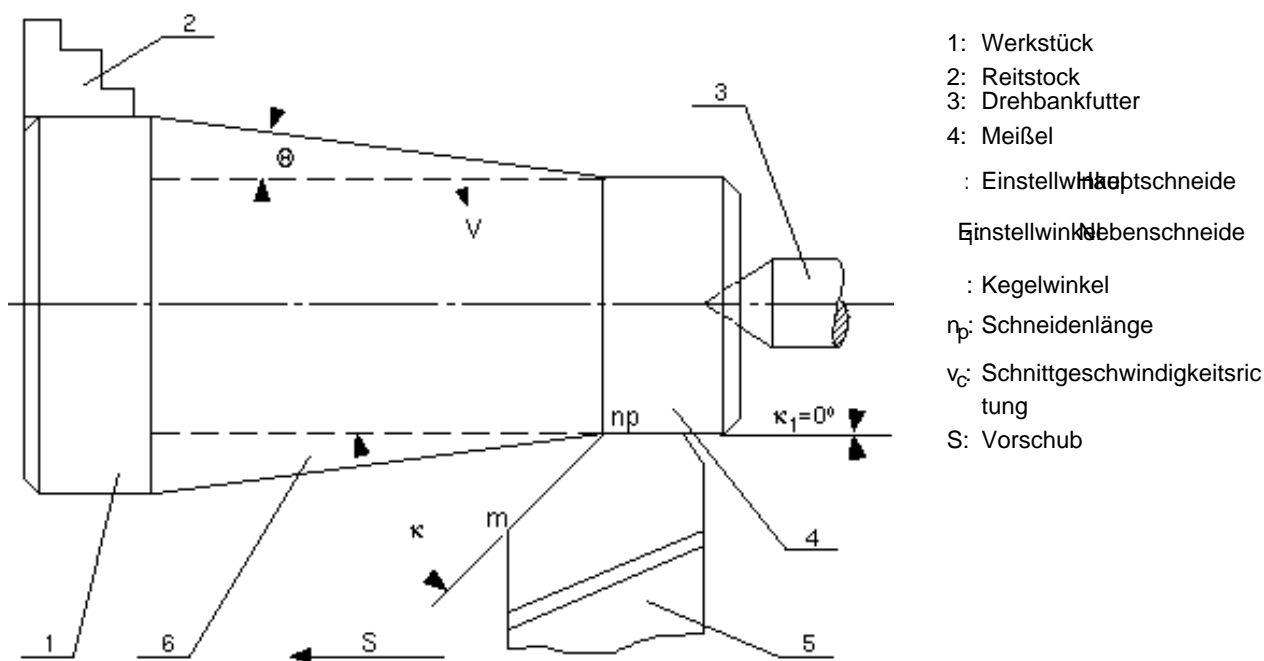


Bild 2 Das Schema der Bestimmung der Sprödfestigkeit des Schneidkeiles beim Drehen im gebundenen Schnitt mit ungeraden Schneiden

keiles von Werkzeugen kann man auch durch die Veränderung der Oberflächengüte des Werkstückes bestimmen. Die Grenzspannungsdicke h_g kann man bestimmen mit der Formel $h_g = l \cdot \tan \alpha$, wobei l der Entfernung von dem Punkt des Schnitthanfanges bis zum Punkt der Oberflächengütenveränderung entspricht. Bei der Anwendung dieser Expressmethode ist es möglich die Grenzspannungsdicke h_g in 2 - 2,5 Minuten zu ermitteln. (Bei der Anwendung der klassischen Methode braucht man 40 - 45 Minuten). Dabei ist die Genauigkeit 1,5 - 2,0 mal höher.

Bei der Expressprüfung für die Bestimmung der Sprödfestigkeit des Schneidkeiles im gebundenen Schnitt mit ungeraden Schneiden kann man als Werkstück einen Zylinder verwenden, der in den abgestumpften Kegel verändert wird.

Das Schema der Prüfung ist in **Bild 3** dargestellt.

Das Werkstück 1 ist ein Zylinder, welcher in das Drehbanksfutter 2 einfuttert und mit Reitnagel 5 festgespannt ist. Die zu bearbeitende zylindrische Fläche 3 wird mit dem Meißel 6 in den abgestumpften Kegel 4 bearbeitet, mit gleichzeitigen Längs- und Quervorschub (beim bestimmten Verhältnis von diesen Vorschub). Dieses Verhältnis definiert (bestimmt) den Kegelwinkel α . In diesem Fall ist die Länge der Verputzenschneide des Meißels gleich $1,2 S_L$, wobei S_L - der Längsvorschub ist.

Die Verputzenschneide des Meißels muß man mit dem Winkel α an die erzeugende zylindrische bear-

beitende Fläche aufstellen. Beim Zerspanen wird die spezifische Belastung ununterbrochend wachsen bis zum Augenblick der spröden Zerstörung des Schneidkeiles. Den Augenblick der spröden Zerstörung des Schneidkeiles von Werkzeugen kann man auch durch die Veränderung der Oberflächengüte des Werkstückes bestimmen.

Die Grenzspannungsdicke kann man durch die Formel: $h_g = l \cdot \sin \alpha$ ermitteln, wobei l - der Entfernung von dem Punkt des Schnitthanfanges bis zum Punkt der Oberflächengütenveränderung entspricht.

SCHLUSSFOLGERUNG

Die Variante der vorgeschlagenen Expressmethoden geben uns die Möglichkeit, die Wirkung der Schnittbedingungen auf die Grenzspannungsdicken schnell und genau zu ermitteln.

Literatur

- /1/ Betaneli, A.J.: Zur Sprödfestigkeit der Werkzeugschneide. Maschinenmarkt, 76 (1970) 45, S. 984-987.
- /2/ Betaneli, A.J. und Dsamojev, B.L.: Belastung der Werkzeugschneide während des Spanens. Maschinenmarkt, 76 (1970) 55, S. 1236-1238.
- /3/ Betaneli, A.J.: Grundlagen der Spanungsberechnung am Schneidkeil. Maschinenmarkt, 76 (1970) 64, S. 1443-1445.
- /4/ Betaneli, A.J.: Die Expressmethode für die Prü-

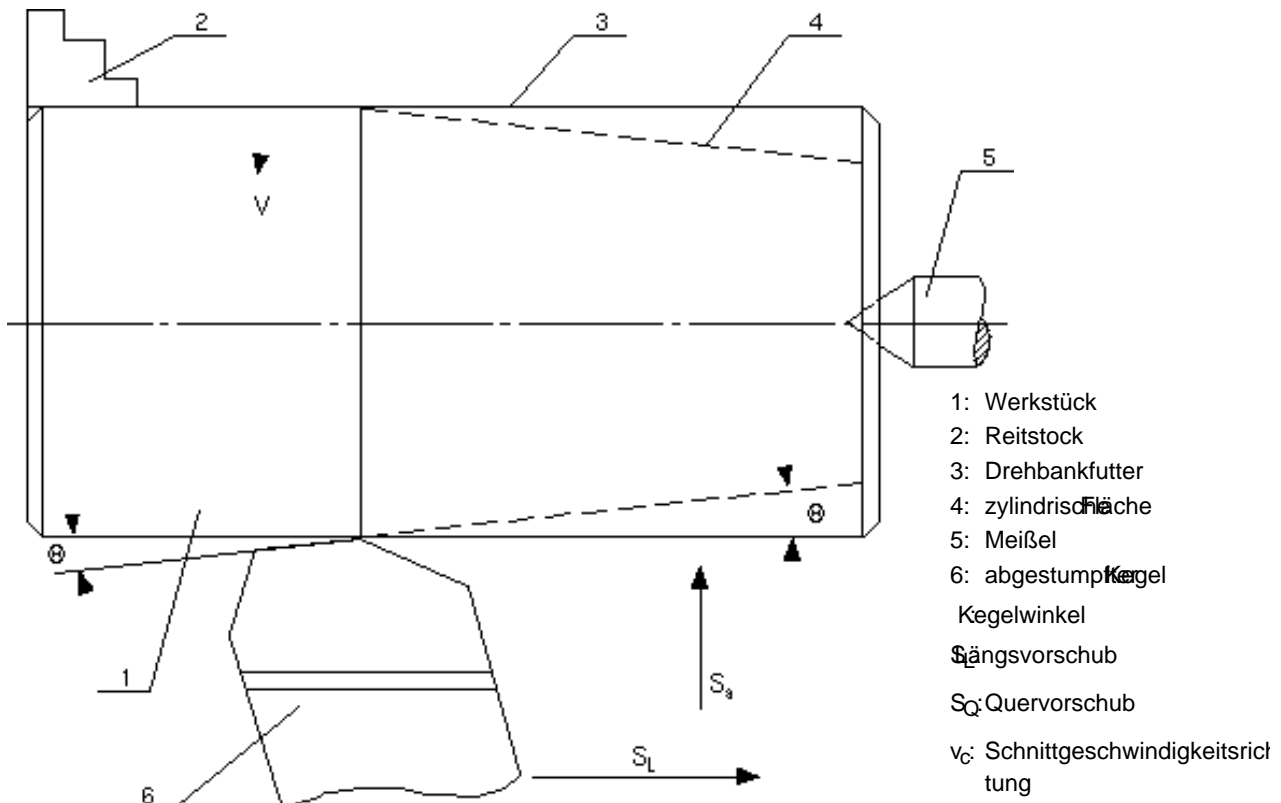


Bild 3 Das Schema der Bestimmung der Sprödfestigkeit des Schneidkeiles beim Drehen im gebundenen Schnitt mit ungeraden Schneiden

fung der Sprödfestigkeit des Schneidkeiles. Westnik Maschinostrojenija, 1984, N 10, S. 42-44.

/5/ Betaneli, A.J.: Die Expressmethode für die Prüfung der Sprödfestigkeit des Schneidkeiles. Die wissenschaftlichen Arbeiten des Georgischen polytechnischen Institut, Sammelband "Technologie des Maschinenbaus", 1984, N 10 (280), S. 21-26.

/6/ Dsamojev, B.L.: Sprödfestigkeit des Hartmetalls beim Stirnfräsen. Maschinenmarkt, 76 (1970) 45, S. 988-993.

Herstellung eines holographischen Gitters für hohe Temperaturen

Xie Huimin, Dai Fulong

Diese Veröffentlichung beschäftigt sich mit einer neuartigen Methode zur Herstellung eines holographischen Gitters für hohe Temperaturen. Zur Herstellung von Gittern können Proben mit metallischem oder nichtmetallischem Überzug gewählt werden. Die experimentellen Ergebnisse haben gezeigt, daß das mit dieser Methode erzeugte holographische Gitter gute Beugungseffekte bei Hochtemperatur-Ver suchen liefern kann.

A new method for producing holographic gratings for high temperature is described in this article. With two deposited metal layers on the specimen surface, either metal or non-metal can be chosen as object of producing gratings. The experimental results prove that the holographic gratings produced with this method can provide a good diffraction effect during high temperature tests.

1. Einleitung

Seit den 80er Jahren findet die Moiré-Interferometrie große Verwendung bei experimentellen Dehnungsanalysen. Hauptsächlich wird sie zur Beobachtung des Spannungsverhaltens von Strukturen oder Modellen bei normaler Temperatur eingesetzt. 1991 schlugen P. Ifju und D. Post das Modell des "Null-

Dicke-Gitters" vor, um den hohen Temperaturanforderungen für die Moiré-Interferometrie Genüge zu tun /1/. 1993 untersuchte B.S.-J. Kang das kriechende Deformationsverhalten der Rißausbreitung bei hohen Temperaturen mit Hilfe eines speziellen Silikon-Gitters /2/.

Es ist möglich, die Moiré-Interferometrie zur Deformationsmessung bis 550° C einzusetzen. In diesem Artikel wird eine neue Methode zur Herstellung von Hochtemperatur-Gittern mit einer zweischichtigen Metalloberfläche vorgestellt.

Jeweils eine Metallschicht wurde vor und nach einem Fotoätz-Prozeß auf die Probenoberfläche aufgetragen. Das holographische Gitter wird durch die Interferenz zweier Strahlen einer beweglichen Lichtquelle erzeugt. Im folgenden werden einige Hochtemperatur-Versuche (bis zu 910°C) mit dem oben angeführten Gittertyp (Liniendichte 1200 l/mm) beschrieben.

2. Technisches Verfahren

Bei dieser Methode wurden oxidationsresistente Metalle gewählt. Die Probenoberfläche wurde vor und nach der Herstellung des holographischen Gitters mit Fotolack beschichtet. Mit einen organischen Lösungsmittel kann der überschüssige Lack zwischen den Metallschichten entfernt werden. Es bildet sich ein Reliefgitter auf der Probenoberfläche. Die einzel-

1) Auftragen des Metalls C1



2) Aufbringen des Photolacks



3) Herstellung des holographischen Gitters



4) Auftragen des Metalls C2



5) Gitter nach Entfernen des Fotolacks



Bild 1 Verfahren zur Herstellung eines holographischen Gitters für hohe Temperaturen

nen Verfahrensschritte sind im folgenden beschrieben, vgl. **Bild 1**.

2.1 Bearbeitung der Probenoberfläche

Die Herstellung von Gittern guter Qualität erfordert eine ebene, flache Oberfläche. Im allgemeinen muß die Probenoberfläche bis zu einer Rauhtiefe von $0,8 \mu\text{m}$ poliert werden, wobei mit einer hochglanzpolierten Fläche bessere Beugungseffekte erzielt werden. Der Ebenheitsabweichung der Probenoberfläche darf $0,01 \text{ mm}$ nicht überschreiten.

Bei Metallproben sollte eine vorhandene Oxidschicht mit Säuren entfernt werden. Die Oberfläche muß danach mit klarem Wasser gereinigt werden.

2.2 Auftragen der Metallschicht C1

Die bearbeitete Oberfläche kann anschließend im Vakuum mit der Metallschicht C1 beschichtet werden. Wichtig dabei ist, daß es sich bei dem Beschichtungsmaterial um ein oxidationsresistentes Metall handelt, und daß die Kompatibilität der thermischen Verformung beider Materialien sichergestellt ist.

2.3 Aufbringen des Fotolacks

Mit Hilfe der "Spinning-Methode" wird eine Lage des Fotolacks (Az1470) gleichmäßig über die Probenoberfläche verteilt. Die Dicke kann zwischen $0,5 \text{ mm}$ und 1 mm betragen.

2.4 Herstellung des holographischen Gitters

Das optische System zur Herstellung eines holographischen Gitters ist in **Bild 2** dargestellt /3/. Hier wird mittels eines rotierenden Keils RW eine bewegliche Lichtquelle zur Generierung des Gitters erzeugt. Es entsteht ein oszillierendes virtuelles Gitter auf der Aufnahmeebene SP. Um die gewünschte Frequenz des holographischen Gitters zu erreichen, wird ein Referenzraster mit dieser Frequenz auf die Aufnahmeebene SP gebracht (siehe Bild 2).

Bild 3 stellt ein Justiersystem dar. Durch die Interferenz zweier Beugungsstrahlen zwischen der 0. und +1. Ordnung kann ein Moiré-Muster auf dem Schirm erzeugt werden. Die Einstellung der Positionen von M_1 , M_2 und SP führt zur Brechung der Isothete. Für die Belichtung der Proben können unterschiedliche Referenzraster verwendet werden. Nach der Belichtung erhält man ein hoch auflösendes, rauschfreies holographisches Gitter.

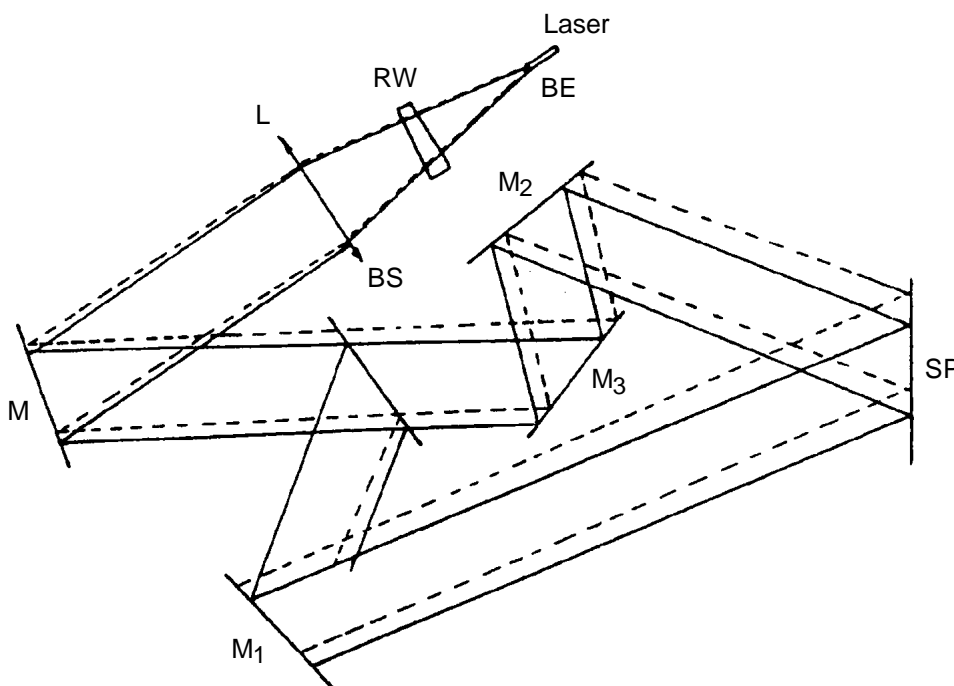


Bild 2 Optisches System zur Herstellung photoresistenter Gitter

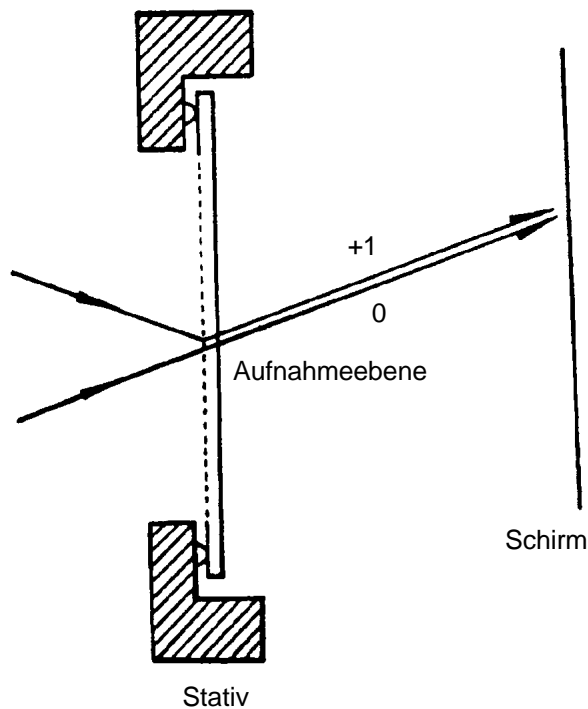


Bild 3 Versuchsanordnung zur Beobachtung der Moiré-Linien

2.5 Auftragen der Metallschicht C2

Nachdem das holographische Gitter mit Hilfe des fotolithographischen Verfahrens auf der Probenoberfläche entstanden ist, kann die Probe mit der Metallschicht C2 beschichtet werden, welche auch aus oxidationsresistenten Metallen ausgewählt werden muß. Die Differenz der Wärmedehnungskoeffizienten der Metalle C1 und C2 muß sehr klein sein.

2.6 Entfernen des Fotolacks

Der zwischen den Metallschichten C1 und C2 befindliche Fotolack kann mit Aceton von der Oberfläche entfernt werden. Somit ist ein Gitter mit den Metallschichten C1 und C2 auf der Probenoberfläche entstanden.

3. Anwendung

Mit Hilfe der Methode von zwei aufgetragenen Metallschichten (Goldbeschichtung für C1 und C2) konnte ein holographisches Gitter für hohe Temperaturen bei einer Liniendichte von 1200l/mm auf einer dünnen Kupferplatte hergestellt werden. Daraufhin wurde die Platte mit Hilfe der "Spinning-Methode" mit einer einheitlichen, ca. 5 mm dicken photoempfindlichen Schicht überzogen. Nach der Belichtung durch einen 5W Argon-Ionen-Laser, fand eine Entwicklung des Fotolacks in NaOH (0,6%) statt.

Für Hochtemperatur-Versuche wurde das Gitter in zwei Hälften geteilt, wobei eine der Hälften bei 850°C eine Stunde lang erhitzt wurde. **Bild 4** zeigt die Gitterstruktur nach dem Test unter einem Scanning-Elektronen-Mikroskop.

Die andere Hälfte des Gitters wurde eine Stunde lang einer Temperatur von 910°C ausgesetzt und nach dem Versuch mit dem Moiré-Interferometer ausgewertet.

Unter Anwendung eines Referenzgitters von 1200l/mm erhält man ein Trägerlinienmuster, welches in **Bild 5** dargestellt ist.

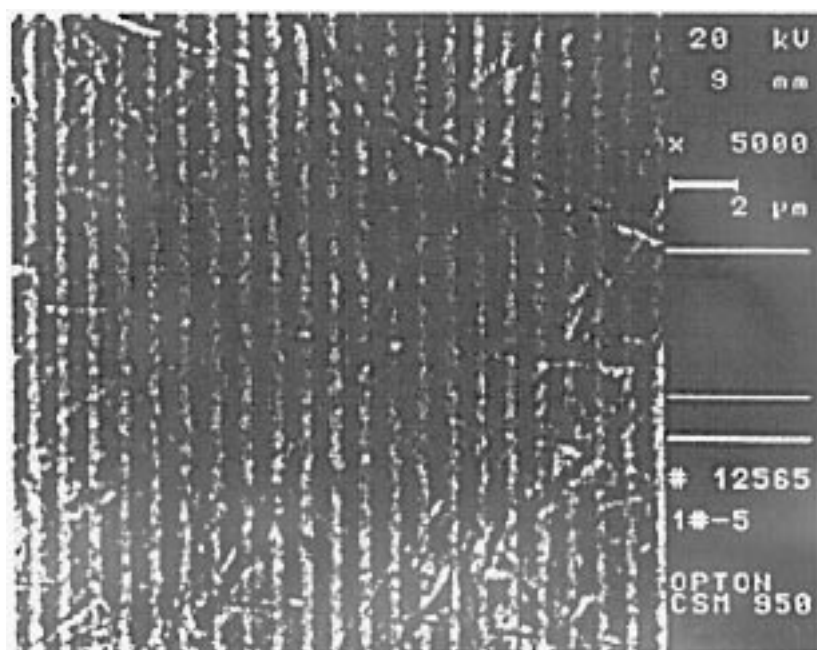


Bild 4 Gitterstruktur nach einer Stunde bei 850°C

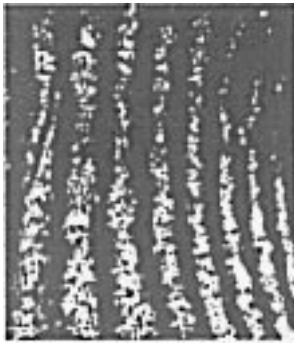


Bild 5 Trägerlinienmuster der Moiré-Interferometrie nach einer Stunde bei 910°C

4. Zusammenfassung

Mit zwei abgelagerten Metallschichten können Gitter auf metallische und nichtmetallische Proben aufgebracht werden. Weiterhin können, falls oxidationsresistente Metalle gewählt wurden, die Gitter mit diesem Verfahren in "Vor-Ort-Messungen" eingesetzt werden. Durch die Verwendung einer beweglichen Lichtquelle und zweier oxidationsresistenter Metallschichten zur Produktion des holographischen Gitters, wird rauschfreies holographisches Gitter erzeugt, das bei hohen Temperaturen hohe Beugungsleistungen zeigt.

Literatur

1. Ifju, P.; Post, D.:
Zero-Thickness Specimen Gratings for Moire Interferometrie
Experimental Technique, 45 47 (03/04 1991)
2. Kang, B. S. -J.; Zhuang, Y. N.; Liu, Q. -K.:
Experimental Investigation of Creep-Cracktip Deformation Using Moire Interferometrie
Experimental Mechanics, 309-315 (12/1992)
3. Post, D.; Mckelvie, J.; Tu, Meirong; Dai, Fu-long:
Fabrication of Holographic Gratings Using a Moving Point Source
Applied Optics, Vol. 28, No. 15, 3494-3497 (1989)

CRAFT: Europäisches Geld für kleinere und mittlere Unternehmen

Dietz, P. und Prengemann, U.

Vielfach wird die europäische Forschungsförderung als zu kompliziert und zu undurchsichtig dargestellt. Speziell kleinere und mittlere Unternehmen haben Vorbehalte gegen diese Art der Förderung durch die EU und scheuen die damit verbundenen Aufwendungen. Dieser Artikel soll am Beispiel eines gerade angelaufenen Projekts und weiterer Projekte, für die seitens des Institutes eine gutachterliche Betreuung erfolgt, zeigen, welche Vorteile ein Mittelständler aus den EU-Programmen ziehen kann.

The European research programs are often said to be very complicated and hardly to understand. Especially small and medium enterprises (SME) have many concerns against EU programs. Usually they shy away from the effort of applying for European grant. This paper highlights the benefits of EU programs for SMEs and likes to encourage to join. An example of a recently started project with IMW contribution is given. Further examples of projects for which the institute is giving expert advice are introduced.

Europäische Forschungsförderung

Oberstes Ziel der Forschungsförderung durch die EU ist die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie. Die Förderung erfolgt nach dem Grundsatz der Kostenteilung. Die EU beteiligt sich an Projekten, sie finanziert sie jedoch nicht allein. Im allgemeinen beträgt die Beteiligung 50% der Projektkosten nach den Grundsätzen einer Vollkostenrechnung für Industrieunternehmen, Hochschulen werden zu 100% auf der Basis von Zusatzkosten gefördert. Darüber hinaus kann im Vorfeld eines Projektes die Partnersuche und die Beantragung mit 75% gefördert werden.

Das CRAFT Programm

Die Europäische Union fördert seit vielen Jahren wissenschaftliche Arbeiten in ihren Mitgliedsstaaten. Dazu werden Rahmenprogramme verabschiedet, die die politischen Schwerpunkte der Forschungsförderung und das verfügbare Budget festlegen. Innerhalb

dieser Rahmenprogramme erfolgen die Ausschreibungen in Form von spezifischen wissenschaftlichen Programmen. Von besonderem Interesse ist aus unserer Sicht das Programm „Industrielle und Werkstofftechnologien“, besser bekannt unter der Abkürzung BRITE-EURAM.

Im Rahmen dieses Programms gibt es den Sonderbereich CRAFT: Technologieprojekte für kleinere und mittlere Unternehmen (KMU). Craft zielt auf Unternehmen, die keine ausreichende eigene Forschungskapazität haben. Die EU bezeichnet Unternehmen mit weniger als 500 Beschäftigten, die höchstens zu 1/3 im Besitz eines größeren Unternehmens sind und einen Umsatz von höchstens 38 MECU (ca. 72 Mio. DM) haben, als KMU.

Der europäische Charakter der Projekte wird durch die Beteiligung von mindestens vier KMUs aus mindestens zwei verschiedenen Mitgliedsstaaten der EU bzw. assoziierten Staaten gewährleistet. In einer Anfangsphase können auch mindestens zwei Unternehmen aus zwei Ländern teilnehmen, die "Nachrüstung" mit zwei weiteren Unternehmen aus zwei anderen Ländern wird aber dann im Laufe des Projektes erwartet und gefördert.

Die Auswahl der Partner ist den Unternehmen völlig freigestellt, meist stellt man sich ein Konsortium aus seinem Zulieferer- und/oder Kundenkreis zusammen. Wir haben als Hochschulinstitut, das weit gestreut im Maschinenbaubereich arbeitet, mittlerweile eine Reihe von Kontakten und Erfahrungen, bei EU-Tagungen oder anhand von Listen können auch seitens der EU Hilfestellungen geleistet werden.

Im Folgenden sollen Erfahrungen mit diesem Programm beschrieben werden.

Das Palaionation-Projekt: Ein Projekt, in dem das IMW beteiligt ist

Ausgangspunkt: Ein Marktsegment

Untersuchungen haben ergeben, daß die naturkundlichen und historischen Museen in Europa ihre Besucherzahlen um 200% steigern könnten, würden sie

animierte prähistorische Tiere ausstellen können. Anhand einer Fallstudie konnte ermittelt werden, daß sich pro animiertes Tiermodell jährliche Umsätze von 250000 ECU erreichen lassen.

Ausgehend vom dargestellten Marktpotential haben sich auf Initiative einer belgischen Firma insgesamt 24 Partner aus Europa zum Palaiomation-Projekt zusammengefunden. Palaiomation steht für Palaeontology science and robotics for extinct species replica animation. Ziel des Projekts ist es, ein realistisches vier Meter großes Tier nachzubauen, das sich nicht nach starren Schemas bewegt, sondern auch auf Umwelteinflüsse (z.B. Besucher) reagieren kann. Ferner soll eine Mobilität erreicht werden, die das Laufen oder Krabbeln in einem vordefinierten Bereich erlauben soll.

Partner in CRAFT-Projekten

Da sich das CRAFT-Programm an kleine und mittelständische Unternehmen ohne eigene Forschungskapazität wendet, gibt es zwei Arten von Partnern in diesen Projekten. Die Unternehmen sind die Antragsteller, die Ausführenden von Prototypen, Versuchen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und diejenigen, die letztendlich ein zu entwickelndes Produkt fertigen und vertreiben wollen - oder mit den Ergebnissen des Projektes Vorteile erzielen können bezüglich Qualität, Sicherheit, Fertigungskosten usw. Die Institute und Hochschulen als Ausführende der Forschung bestreiten den wissenschaftlichen Teil des Projektes in einer Weise, die den ausführenden Unternehmen direkt

hilft. Für die Forschungsinstitute ist dies eine neue Herausforderung angewandter Forschung, die sehr nahe an der Praxis angelegt ist.

In diesen Projekten bestellt die EU auch einen unabhängigen wissenschaftlichen Berater, der in erster Linie dafür zu sorgen hat, daß die wissenschaftlichen Forschungsinstitute eine auf die Belange der beteiligten Unternehmen abgestellte Arbeit verrichten - und sich nicht in wissenschaftlichen Höhenflügen ohne praktische Bedeutung verlieren. Dieser Berater berichtet

direkt der EU und nimmt an den wichtigsten Besprechungen des Konsortiums teil.

Die Unternehmen sollten sich in ihrer Struktur ergänzen, d.h. es sollten keine direkten Konkurrenten zusammenarbeiten. Vielmehr ist es sinnvoll, verschiedenen Komponentenlieferanten für ein komplexes System in das Projekt mit einzubeziehen. So können der Elektrolieferant, der Hydraulikproduzent und der Anlagenhersteller problemlos mit dem späteren Betreiber zusammenarbeiten, ohne daß zu befürchten ist, daß Know-how an den Wettbewerb abfließt.

Das Palaiomation-Konsortium

Für die Entwicklung und den Bau eines prähistorischen Tiermodells sind hat sich folgende Partnerstruktur zusammengefunden:

Antragsteller sind zehn Unternehmen aus den Bereichen Maschinenbau (Formenbau, Werkzeugmaschinen, Präzisionsteile, Krane), Elektrische Antriebe und Steuerungen, Roboter und Mechatronic sowie ein Tierpark und vier Museen.

Die Forschung wird ausgeführt von vier Forschungszentren und fünf Universitäten.

Finanzielle Aspekte

Für kooperative Forschungsprojekte sind eine Reihe von Bedingungen einzuhalten. So müssen die Kosten der KMUs mindestens 1/3 der Gesamtkosten betragen. Die Forschungseinrichtungen werden zu 100% für ihre Arbeit bezahlt, ihr Anteil muß mindestens 50% betragen. Weiterhin dürfen nicht mehr als 2/3 der Be-

Partner	Land	Finanzieller Beitrag		gesamt
		Eigenleistung	Geld	
Paris S.A.	F	80.000 ECU	40.000 ECU	120.000 ECU
Bruxelles SPRL	B	50.000 ECU	25.000 ECU	75.000 ECU
Berlin GmbH	D	60.000 ECU	30.000 ECU	90.000 ECU
Athen S.A.	GR	50.000 ECU	30.000 ECU	80.000 ECU
Madrid S.C.	E	33.000 ECU	10.000 ECU	43.000 ECU
London Ltd.	GB	60.000 ECU	32.000 ECU	92.000 ECU
Summe		333.000 ECU	167.000 ECU	500.000 ECU
Forscher	Land	Kosten		
IMW TU Clausthal	D	230.000 ECU		
Univ. Cardiff	GB	220.000 ECU		
Technica	E	217.000 ECU		
Summe		667.000 ECU		
Gesamtkosten des Projekts				
Eigenleistung + Kosten der Forschung				1.000.000 ECU
Finanzieller Beitrag der EU = 50%				500.000 ECU

Tabelle 1: Beispiel für eine Projektfinanzierung im Craft-Programm

teilung der Antragsteller aus einem einzigen Land kommen und nicht mehr als 1/3 von einem einzigen Antragsteller. Diese Regelungen wurden im Beispiel in **Tab. 1** berücksichtigt. Die Tabelle zeigt deutlich, daß die beteiligten Firmen ihren Beitrag zu diesem Projekt zum Teil in Eigenleistungen (eigene Personalleistungen, Material, Fertigen von Modellen und Prototypen, Reisen, Verwaltungskosten usw.) leisten und einen weiteren Betrag in das Projekt einzahlen. Bei dem gezeigten Beispiel erhalten die Firmen durch eigene Leistungen und durch einen Finanzierungsbeitrag von 167.000 ECU infolge der Förderung Forschungsleistungen in Höhe von 667.000 ECU geliefert.

Rechtliche Aspekte

Die Zusammenarbeit mehrerer internationaler Partner in einem gemeinsamen Projekt muß durch einen entsprechenden rechtlichen Rahmen abgesichert sein. Hierzu gibt es zwei Arten von Verträgen, die für europäische Projekte angewendet werden. Zunächst wird das Verhältnis der Partner mit dem Fördergeber, der Kommission in Brüssel, im Rahmen eines Vertrages geregelt. Hier findet ein Mustervertrag Anwendung, der auf Ministerrateebene vereinbart wurde und in seinem Inhalt nicht verhandelbar ist. Er regelt die Rechte der Kommission sowie die grundsätzliche Vertraulichkeit aller Berichte. Das Arbeitsprogramm ist Bestandteil dieses Vertrages.

Eine weitere Vertragsebene stellt der Konsortialvertrag dar. Dieser wird zwischen den Partnern im Konsortium ohne Einbeziehung der Kommission geschlossen. Hier werden projektinterne Absprachen getroffen. Ein Regelungsbedarf besteht z.B. für die spätere Verwertung und Kommerzialisierung der Ergebnisse einschließlich evtl. angemeldeter Patente. Wichtig ist bei beiden Verträgen, daß die Europäische Union eindeutig die Wettbewerbsfähigkeit aller industriellen Teilnehmer steigern will und auf keinen Fall wettbewerbsverzerrend wirken will. Das heißt, daß z.B. alle Rechte der beteiligten Partner und das gesamte Know-how einem Schutz unterliegen, keine Veröffentlichungspflicht besteht, in der über die Lösungen Auskunft gegeben werden muß, oder daß die EU keine Rückzahlungen bei noch so großem wirtschaftlichem Erfolg des Projekts verlangt.

Weitere Projekte

Die Struktur und die Zielsetzung von Projekten kann völlig unterschiedlich sein. Die EU erwartet lediglich

ein Projekt, das einen Forschungsbedarf aufweist und zur wirtschaftlichen Stärkung durch Zusammenarbeit von kleinen und mittleren Unternehmen Europas beiträgt. Aus der Arbeit als unabhängiger Berater (PTA) der EU in mehreren CRAFT-Projekten soll im folgenden von einigen anderen CRAFT-Projekten berichtet werden.

TRACMINER-Projekt

Ziel ist die Entwicklung eines Gelenkmechanismus, der an Räder von Baumaschinen oder Landwirtschaftsmaschinen aufgesetzt wird und die Traktion zum Boden wesentlich vergrößert. Dadurch können leichtere Fahrzeuge mit größerer Effizienz eingesetzt werden. Die Idee fußt auf einem Patent eines der Teilnehmer, **Bild 1** zeigt das Prinzip.

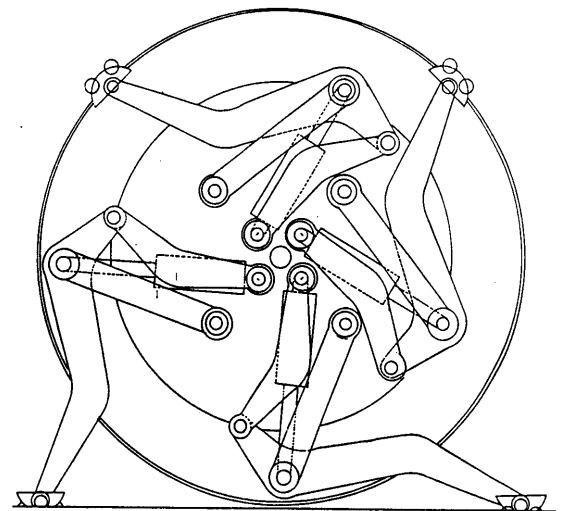


Bild 1: Prinzip des TRACMINERS

Das Konsortium zur Entwicklung eines Prototyps einschließlich praktischer Erprobung setzt sich aus dem Ingenieurbüro des Patentinhabers, drei Maschinenbauunternehmen (Hydraulik, Fertigung, Steuerung), einer Baufirma (Anwender) und zwei Forschungsinstituten aus insgesamt vier Ländern (B, E, GR, F) zusammen. Die Forschungsinstitute berechnen die Struktur, entwickeln die Automatisierungsmodule und führen Versuche durch. Das Projekt ist zur Zeit in einem Stadium, in dem die Bewegungsversuche an einem Modell abgeschlossen sind und die Konstruktion des Prototyps beginnt. Der Förderungsbeitrag der EU beträgt 500.000 ECU.

SPRINGMAKER-Projekt

Hierbei dreht es sich um die Entwicklung einer Federwindmaschine mit neuer Steuerungsart, die mit Hilfe neuronaler Netze aus den gemessenen Daten des einlaufenden Drahtes und der erzeugten Feder den Windeprozeß optimiert. Beteiligt sind vier Federhersteller, zwei Werkzeugmaschinenhersteller und zwei Forschungsinstitute, die sich mit Steuerungen und Informationssystemen befassen, aus bisher zwei Ländern. D.h., daß zwei weitere Partner aus zwei weiteren Ländern noch eingeworben werden müssen. Das Projekt befindet sich im ersten Jahr. Es wird von der EU mit 305.000 ECU gefördert.

Machining technologies-Projekt

Dieses Projekt hat eine völlig andere Aufgabenstellung, die besonders die Zulieferindustrie bewegt: In der Zusammenarbeit mehrerer Firmen mit mehreren Forschungsinstituten werden typische Produktionsprobleme angegangen wie z.B. die Ermittlung von Produktionskosten für Unterteilern, Modernisierung von Planungsmethoden, Verminderung der Umweltbelastung durch Wahl des Fertigungsverfahrens als strategische Aufgaben, aber auch Fragen der Qualitätssicherung, der Wahl der Kühlschmiermittels usw. Die das Projekt leitende Industrie- und Handelskammer hat die Aufgabe, die Einzelergebnisse dieses Projekts zusammenzufassen und für das gesamte Konsortium insgesamt in brauchbarer Form aufzubereiten.

Es ist eines der ungewöhnlichsten Projekte in CRAFT, da es eigentlich aus einer Sammlung von Einzelaktivitäten verschiedener Industrieunternehmen mit Forschungsinstituten darstellt. Daß ein solches Projekt möglich ist, zeigt aber auch, wie flexibel die Aufgabenstellung bei der EU angelegt sein kann, wenn das Generalziel der Zusammenarbeit in Europa und der Stärkung mittelständischer Unternehmen gewährleistet wird.

Forschungsprojekte

Neben den oben beschriebenen Craft-Projekten besteht auch für kleinere und mittlere Unternehmen die Möglichkeit zur Beteiligung an Forschungsprojekten. Hier muß in den Unternehmen eine eigene Forschungskapazität vorhanden sein. Diese wird dann zu 50% gefördert, die Bereitstellung zusätzlicher Finanzmittel ist nicht erforderlich.

Forschungsprojekte können einen Gesamtumfang

von bis zu 7 Mio. ECU haben. Daher werden in Forschungsprojekte oft größere Unternehmen mit einbezogen. Auch diese Projekte sind ausdrücklich Industrieorientiert. Sie zielen auf Produkte und Verfahren, die spätestens fünf Jahre nach Projektbeginn marktfähig sein sollen.

Für Forschungsprojekte ist der aktuelle Termin für das Einreichen von Anträgen der 15.3.95. Es finden jährliche Ausschreibungen statt. Die Themenbereiche dieser Projekte sind in drei Bereich unterteilt. Der Bereich Produktionstechnologien umfaßt die Themen Integration neuer Technologien in die Produktionssysteme, Entwicklung von Technologien für eine saubere Produktion, rationeller Einsatz von Rohstoffen, Sicherheit und Zuverlässigkeit der Produktionssysteme und der Faktor Mensch und organisatorische Aspekte der Produktionssysteme. Im Bereich Werkstoffe und Technologien zur Produktinnovation werden die Themen Werkstofftechnik, neue Produktentwurfs- und -fertigungsverfahren, Zuverlässigkeit und Qualität von Werkstoffen und Produkten und Technologien für die Wiederverwertung von Produkten nach ihrer Nutzung gefördert. Der Bereich Technologien für den Verkehrsbereich untergliedert sich in Technologien für die Luftfahrt und Technologien für land- und wassergebundene Verkehrsmittel. Hier werden die Bereiche Entwurf und Systemintegration, Produktion, Effizienz, umweltrelevante Technologien, Sicherheit und Technologien für den Betrieb hervorgehoben.

Zusammenfassung

Craft-Projekte stellen eine Möglichkeit für kleinere Unternehmen dar, mit geringen eigenen Aufwendungen Forschungsleistungen von renommierten Instituten zu bekommen und damit die Wettbewerbsfähigkeit weiter zu verbessern. Aufgrund der vertraglichen Absicherung ist das Risiko für die Unternehmen gering und kalkulierbar. Die in diesem Programm bereitgestellten Mittel der EU sind mit über 500 Mio. DM beträchtlich und versprechen gute Chancen auf eine Förderung. Forschungsprojekte sind geeignet, das eigene Entwicklungspotential zu vervielfachen und damit komplexere Probleme in kürzerer Zeit zu lösen. Alle Programme sind industrieorientiert und verlangen von den Forschungsinstituten eine praxisorientierte Arbeit.

Bei der Beantragung können erfahrene Hochschulinstitute kostengünstig Hilfe leisten und wertvolle Kontakte vermitteln.

ERASMUS Europaweite Hochschulkooperation

Heinen, F.

Das ERASMUS-Programm wurde im Juni 1987 in Form eines Aktionsplans der Europäischen Union verabschiedet, um die Zusammenarbeit zwischen Hochschuleinrichtungen der Mitgliedsstaaten und neuerdings auch der EFTA-Ländern zu fördern.

Die Hauptziele dieses Programms sind eine wesentliche Steigerung der Studenten- und Dozentenmobilität zwischen europäischen Hochschulen und die Förderung des Aufbaus weitreichender und dauerhafter Hochschulkooperationen.

Das Institut für Maschinenwesen (IMW) der Technischen Universität Clausthal ist seit der ersten Stunde dieses Programms dabei. Unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz wurden bis heute über 100 Studenten gefördert und konnten so einen Teil ihres Studiums im europäischen Ausland absolvieren.

The ERASMUS program was, in June 1987 in the form of an action plan of the European Union, started to encourage co-operation among universities of member states. Universities of EFTA member states are, as of late, participating partners too.

ERASMUS exchange programs are intended, within participating universities, to allow increased mobility of both students and instructors and to establish an effective, long lasting co-operation.

The Institute of Mechanical Engineering (IMW) of the Technical University of Clausthal, under the direction of Professor Dr.-Ing. Peter Dietz, has, since program inception, been a participating ERASMUS member. To date, over 100 students have been able to complete credits at member universities outside of Germany.

1 Einleitung

Veränderte Bedingungen auf dem Arbeitsmarkt, wechselnde Anforderungen an die Qualifikationen von Hochschulabsolventen, vor allem aber die Vorbereitung der Unternehmen auf den europäischen Binnenmarkt und der damit einhergehende Bedarf an entsprechend qualifizierten Arbeitskräften und entsprechend ausbildenden Hochschulen sind als Grün-

de für die Bedeutung des ERASMUS-Programms zu nennen. Mittels der Förderung von Studenten- und Dozentenmobilität zwischen europäischen Hochschulen soll das Ziel des "Europa-Bürgers" vorbereitet werden. In Deutschland ist der Deutsche Akademische Austauschdienst (DAAD) in Bonn die nationale Agentur dieses Programms.

2 Das ERASMUS-Programm am Institut für Maschinenwesen (IMW)

Bereits 1988 wurden am Institut für Maschinenwesen (IMW) unter Leitung von Herrn Prof. Dietz mehrere sogenannte Hochschulkooperationsverträge (HKP) mit Universitäten des europäischen Auslands geschlossen. Zunächst beschränkte sich die Kooperation auf einige wenige Hochschulen. Heute ist das IMW in drei von insgesamt fünf an der TU Clausthal laufenden HKP's involviert und koordiniert selbst den größten dieser HKP's mit in naher Zukunft 13 teilnehmenden Hochschulen:

- Universidad de Zaragoza (E),
- Università degli studi di Palermo (I),
- University of Wales College of Cardiff (UK),
- University of Nottingham (UK),
- Université de Metz (F),
- Ecole National d'Ingénieurs de Tarbes (F),
- Aristotle University of Thessaloniki (GR),
- National Technical University of Athens (GR),
- Università di Genova (I),
- Ecole National Supérieure de Mécanique et d'Aéro-technique in Portiers (F),
- University of Limerick (IRL) und
- Instituto Superior Técnico de Lisboa (P).

Die Hochschulen des oben angeführten HKP's verpflichteten sich untereinander, für ERASMUS-Studenten keinerlei Studiengebühren zu erheben und die von ihren Studenten im Ausland erbrachten Studienleistungen anzuerkennen. Aufgrund dieser Vereinbarungen ist seitdem ein reger und stetig zunehmender Studentenaustausch zwischen diesen Universitäten möglich. So besteht bspw. für an Kunststofftechnologie interessierte Clausthaler Studenten die Möglich-

keit, nach Zaragoza an das Institut "Taller de Inyección de la Industrián de los Plásticos" zu gehen. Der dort dozierende Prof. J. Castany ist ein europaweit geachteter Experte auf diesem Fachgebiet. Umgekehrt kommen Studenten von anderen Hochschulen an das IMW, um hier auf unseren Expertengebieten (einige davon können dieser Institutsmitteilung entnommen werden) zu arbeiten. Auf diese Weise ist ein gewaltiges Wissenspektrum erschließbar, das bis zur Einführung von ERASMUS gänzlich ungenutzt blieb. Die durchschnittliche Auslandsaufenthaltsdauer der Studenten beträgt normalerweise sechs Monate, so daß der Zweifel, eine solche im Ausland vonstatten gehende Ausbildung könne nur oberflächlich erfolgen, von der Hand gewiesen werden muß. Ein weiterer nicht zu unterschätzender Vorteil eines Auslandsstudiums ist das Erlernen bzw. Verbessern einer Fremdsprache. Auch dies wird durch das ERASMUS-Programm unterstützt. So werden Sprachkurse angeboten, die sich meist multinational aus den an den Universitäten vertretenen ERASMUS-Studenten zusammensetzen. Dies bewirkt zweierlei:

Zum einen muß zur gegenseitigen Verständigung entweder die Landessprache oder Englisch Verwendung finden, was zur Folge hat, daß bei einem Aufenthalt in einem nicht englisch sprachigen Land zusätzlich noch die englische Sprache geübt wird, zum anderen findet man in diesen Kursen leicht Kontakte zu anderen ERASMUS-Studenten, die aus wieder anderen EU- bzw. EFTA-Ländern kommen. Somit kann der zu Beginn schon erwähnte Gedanke des "Europa-Bürgers" aufgenommen werden und wichtiger, Verständnis für andere Länder bzw. Kulturen geschaffen werden.

Ein bisher noch unerwähnter Aspekt des ERASMUS-Programms ist die Möglichkeit für Dozenten, an im HKP involvierten Hochschulen Lehraufträge wahrzunehmen. Ein Beispiel hierfür ist die schon seit einigen Jahren an der "Universidad de Zaragoza" laufende Vorlesung von Herrn Prof. Dietz. Die Vorlesung findet als eine einwöchige Blockveranstaltung zum Thema "Konstruktionselemente" statt. Sie ist fester Bestandteil des Lehrplans dieser Universität und hat unter den Studenten großen Zuspruch gefunden. Die Vorlesungssprache ist Spanisch.

Weitere Aktivitäten in diese Richtung sind in Planung. So soll in naher Zukunft eine ähnliche Vorlesung von Herrn Prof. Dietz an der "University of Nottingham" und im Gegenzug von Herrn Dr. Aroussi eine Vorle-

sung über "Fluidströmungen" hier in Clausthal gehalten werden. Die Vorlesungssprache wären in beiden Fällen Englisch.

3 Ausblick

Die Nachfrage der Studenten eine finanzielle Unterstützung durch ein ERASMUS-Teilstipendium zu erhalten wächst von Jahr zu Jahr. Die bisherigen, eher traditionellen Qualifikationserfordernisse bzw. die bisherige generell gute Arbeitsmarktsituation ließen einen Auslandsaufenthalt nicht unbedingt notwendig erscheinen. Hier hat sich in letzter Zeit eine Wandlung vollzogen.

Für das IMW bzw. die Technische Universität Clausthal steht außer Frage, daß das ERASMUS-Programm die Geschwindigkeit des Aufbaus internationaler Beziehungen beschleunigt hat und somit die an der TU Clausthal bzw. am IMW laufenden EG-Forschungsprojekte (ESPRIT, BRITE EURAM, CRAFT, ...) sinnvoll ergänzt.

Auch werden bereits erste Denkansätze verfolgt, gemeinsame Studiengänge mit ausländischen Universitäten anzubieten. Der Studierende würde einen Teil seines Studiums an einer ausländischen Hochschule absolvieren und könnte auf diese Weise mit hervorragenden Sprachkenntnissen des Landes der Gasthochschule den Abschluß beider Universitäten erwerben.

Leider sind jedoch all diese Vorhaben mit Kosten verbunden und können aus eigener Kraft nicht von den Hochschulen finanziert werden. Wichtig ist auch, daß das Studium für Studierende finanzierbar gestaltet wird. Es darf also für die Zukunft auf eine verstärkte Unterstützung der EU gehofft werden und nicht, wie es leider derzeit der Fall ist, auf eine Kürzung der Mittel.

4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß ERASMUS einen wesentlichen Beitrag zur Verbreitung des Europa-Gedanken sowie zur Integration der europäischen Forschungslandschaft darstellt.

Literatur

- /1/ Europäische Kommission: ERASMUS & LINGUA - Leitfaden für Antragsteller, 1994
- /2/ DAAD - Deutscher Akademischer Austauschdienst: Success Stories II, 1994

Informationen über das IMW weltweit verfügbar

Schmitt, R.

Seit Anfang 1994 wird am Institut für Maschinenwesen ein Informationsserver als Bestandteil des World Wide Web (WWW) aufgebaut. Dieser Server (Homepage-URL: <http://www.imw.tu-clausthal.de>) stellt Informationen nicht nur über das IMW selbst, sondern auch über andere Organisationen (z.B. VDI, Fachschaft MVC) und Aktivitäten (z.B. Normung, SFB 180) an der TU Clausthal im Internet zur Verfügung. Darüber hinaus wird er für Lehrveranstaltungen am IMW genutzt.

Nach einigen grundlegenden Erläuterungen zum World Wide Web als ein spezieller Netzwerkdienst, der im Internet verfügbar ist, werden im folgenden Artikel die Struktur und die Informationsinhalte des Servers beschrieben. In einem abschließenden Ausblick wird auf die steigende Bedeutung solcher Informationsdienste eingegangen.

Since the beginning of 1994 an information server within the World Wide Web (WWW) has been set up at the Institut für Maschinenwesen. This server (Homepage-URL: <http://www.imw.tu-clausthal.de>) provides information about the IMW as well as other organisations and activities at the TU Clausthal to the Internet community. Furthermore it is involved in lecturing activities at IMW.

Starting with some facts about the World Wide Web as one particular network service based on the Internet, the following article describes the structure and information contents of the developed server. Finally some ideas about the increasing significance of such kind of information services are given.

Netzwerk-Szenario

"Montag morgens, die Uni-Arbeitswoche beginnt. In der Straßenbahn auf dem Weg zur Arbeit stelle ich mir eine Liste jener Dinge zusammen, die ich heute erledigen möchte: Vor allem muß ich mir dieses Computerprogramm besorgen, von dem mir mein Kollege aus Norwegen erzählt hat und das ich unbedingt für meine statistischen Auswertungen brauche. Das Programm

gibt es irgendwo in den USA; wo genau hat er leider nicht mehr gewußt. Um das herauszufinden, werde ich kurz in Finnland vorbeischaun, eventuell auch in Kanada. Ach ja, wegen theoretischer Literatur für meine Arbeit wollte ich noch in Colorado nach relevanten Artikeln stöbern. Wahrscheinlich sollte ich auch noch den Bibliothekskatalog einer der großen amerikanischen Universitäten durchblättern, um einen möglichst vollständigen Überblick über die relevante Literatur zu bekommen."

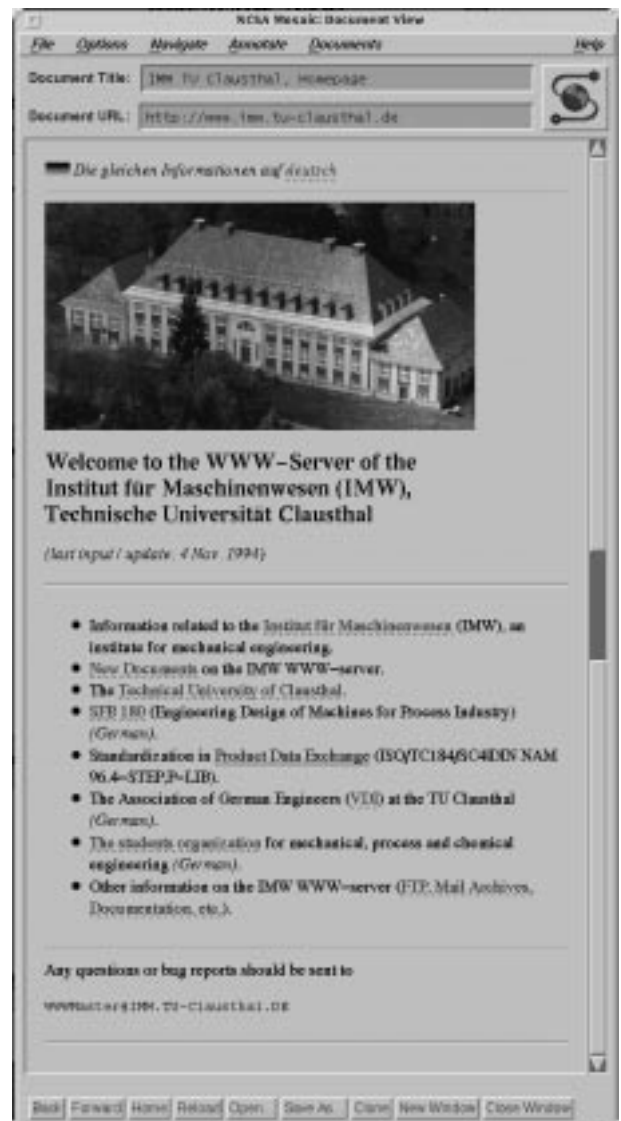


Bild 1 Nicht nur IMW-spezifische Informationen sind von der Homepage des IMW-Hosts aus abrufbar

Vielen wird dieses in /1/ beschriebene Szenario utopisch vorkommen. All jenen, die bereits mit den internationalen Computernetzwerken zu tun hatten, ist dieser Arbeitsstil mehr oder weniger vertraut.

Über Standleitungen (mit unterschiedlichen Kapazitäten), Wähl-Telefonleitungen und Satelliten sind bereits heute mittels elektronischer Kommunikation beliebige Informationsinhalte mit hoher Geschwindigkeit übertragbar. Diese Netzwerke, auch "Datenautobahnen" genannt, umspannen immer größere Teile der Welt und beeinflussen die Art und Weise, miteinander zu kommunizieren, in erheblichem Maße.

Das Internet macht's möglich

1969 konstruierte das amerikanische Verteidigungsministerium ein Computernetz mit dem Namen ARPANET (Advanced Research Projects Agency-NET), das vier Computer miteinander verband. 1972 wurde es öffentlich präsentiert, und viele Universitäten und Forschungseinrichtungen der USA schlossen sich an das Netz an. Eine zweite Generation dieser Netzwerksoftware, bestehend aus einer ganzen Familie von Protokollen, wurde bis 1982 spezifiziert und programmiert. Zwei seiner Hauptelemente, das Transmission Control Protocol (TCP) und das Internet Protocol (IP), wurden zu einer "pars-pro-toto"-Bezeichnung für die gesamte Protokollfamilie. Dabei wurde großer Wert darauf gelegt, daß TCP/IP von verschiedenen Rechnertypen "verstanden" wird. TCP/IP verbreitete sich rasch weltweit. Vor allem wissenschaftliche Einrichtungen integrierten es als wesentlichen Bestandteil der Rechner-Kommunikation.

Die Verbindung aller Computer, die über das Protokoll TCP/IP miteinander kommunizieren, wird als "Internet" bezeichnet. Das Internet präsentiert sich heute als Verbindung vieler, von verschiedenen Organisationen betreuter Teilnetze. Obwohl einzelne Organisationen bestimmte Aufgaben für das gesamte Internet erfüllen, gibt es keine Institution, die für das Internet zuständig oder verantwortlich ist. Die rasante Entwicklung des Internet basiert auf den Inputs der Betreiber von Teilnetzen und einzelner Benutzer.

Im Jahre 1990 bestand das Internet aus über 3.000 lokalen Netzwerken mit über 200.000 eingebundenen Computern. Im Januar 1992 betrug die Zahl der Rechner 727.000, im Juli 1993 bereits 1,8 Millionen. Die Zahl der angeschlossenen Rechner verdoppelt sich derzeit zirka alle sieben Monate (s. Bild 2).

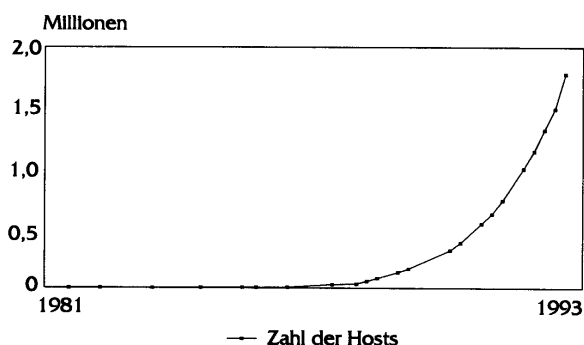


Bild 2 Entwicklung des Internet /1/

WWW als erweiterter Netzwerkdienst

Der wohl bekannteste grundlegende Netzwerkdienst ist die Electronic Mail (E-Mail). Man kann damit Nachrichten an Kommunikationspartner verschicken, die eine Kennung an irgendeinem Netzwerkcomputer besitzen, der irgendwo auf der Welt steht. Der Aufbau einer E-Mail entspricht dabei dem eines normalen Briefes. Neben der E-Mail steht der Dateitransfer (File Transfer Protocol - ftp) als grundlegender Netzwerkdienst zur Übertragung größerer Datenmengen zur Verfügung.

Zu den sog. erweiterten Netzwerkdiensten, die teilweise auf den vorher beschriebenen Grunddiensten aufbauen bzw. diese integrieren, gehört neben NetNews, Gopher, oder WAIS auch das World Wide Web (WWW), das am Europäischen Labor für Teilchenphysik (CERN) in der Schweiz entwickelt wurde. Dieses Informationssystem kombiniert über sog. Hypertextverbindungen Dienste, die auf Computern über das ganze Internet verstreut sein können, in solcher Weise, daß beim Benutzer der Eindruck entsteht, sie wären integriert. Hypertextverbindungen sind in ein Dokument eingefügte Querverweise, mit deren Hilfe der Benutzer aus dem aktuellen Dokument heraus direkt auf andere Dokumente zugreifen kann. Diese Dokumente können wiederum Hypertextverbindungen enthalten. WWW implementiert damit auf dem elektronischen Netzwerk ein logisches Netzwerk bestehend aus miteinander verbundenen Dokumenten auf verschiedenen Internet-Hosts. Die übertragbaren Informationen können nicht nur aus Abbildungen oder Texten bestehen, sondern auch aus Bild- und Tonsequenzen.

Die Adressierung auf verbundene Dokumente erfolgt über sog. "Uniform Resource Locators" (URL). Die in

Bild 1 dargestellte *Homepage* des IMW-Hosts besitzt beispielsweise die URL <http://www.imw.tu-clausthal.de>. Die Abkürzung *http* steht für "Hypertext Transfer Protocol". Für die Darstellung der Hypertext-Dokumente und den Umgang mit diesen wird die Software "NCSA Mosaic™" verwendet. Ferner ist ein besonderes Textformat, das sich "Hypertext Markup Language" (html) nennt, erforderlich. Textpassagen, die als Ausgangselemente für Hypertextverbindungen dienen, sind durch blaue Schrift bzw. Unterstreichung gekennzeichnet. Durch einfaches Anklicken der markierten Textbereiche wird die verknüpfte URL, die auch direkt eingegeben werden kann, angesprochen, das zugehörige Dokument geladen und auf dem Bildschirm dargestellt. Es spielt dabei keine Rolle, ob sich das zu ladende Dokument auf dem *local host* oder einem anderen Host irgendwo im Internet befindet. Klickt man beispielsweise auf die unterstrichene Textpassage *Technical University of Clausthal* auf der *Homepage* des IMW-Hosts, so wird ein Dokument mit der URL <http://www.tu-clausthal.de> geladen und angezeigt. Dieses Dokument stellt die

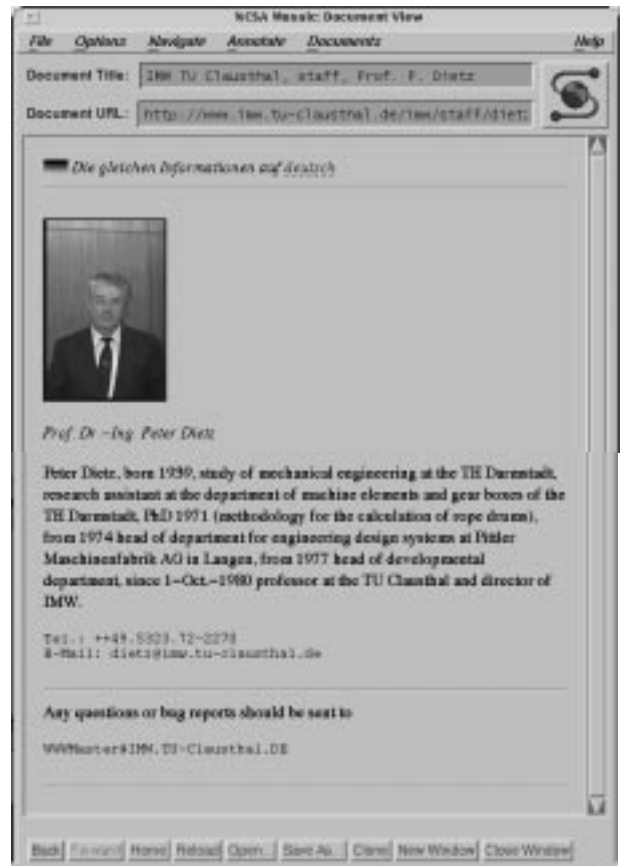


Bild 4 Sowohl auf englisch als auch auf deutsch sind Informationen zu Professoren und Mitarbeitern des IMW verfügbar



Bild 3 Vom institutsspezifischen Verzeichnis aus sind u.a. Informationen zu Personal, Projekten und Lehrveranstaltungen des IMW abrufbar

Homepage des im Rechenzentrum befindlichen WWW-Servers der TU Clausthal dar und enthält Hypertextverbindungen zu weiteren Dokumenten, die Informationen über die TU Clausthal selbst (z.B. über zentrale Einrichtungen oder Institute), deren Umfeld, die Stadt Clausthal-Zellerfeld (z.B. über kulturelle Veranstaltungen, Kinoprogramm, öffentliche Verkehrsmittel) etc. bereitstellen.

Der WWW-Server des IMW als vielschichtiges Informationsmedium

Die in Bild 3 dargestellte Auswahl des IMW-spezifischen Informationsangebots erhält man durch Anklicken der Hypertextverbindung *Institut für Maschinenwesen* auf der *Homepage* des IMW-Hosts (s. Bild 1). Sofern dies sinnvoll ist, werden die Informationen zweisprachig (englisch / deutsch) angeboten. Neben einer allgemeinen Einführung (*Introduction*) und Neuigkeiten aus dem IMW in Form von Kurzmeldungen (*IMW-News*) kann sich der Benutzer auch über Veröffentlichungen (*Publications*) sowie Austauschprogramme (*Exchange*), an denen das IMW beteiligt ist, informieren. Für Studenten besteht die

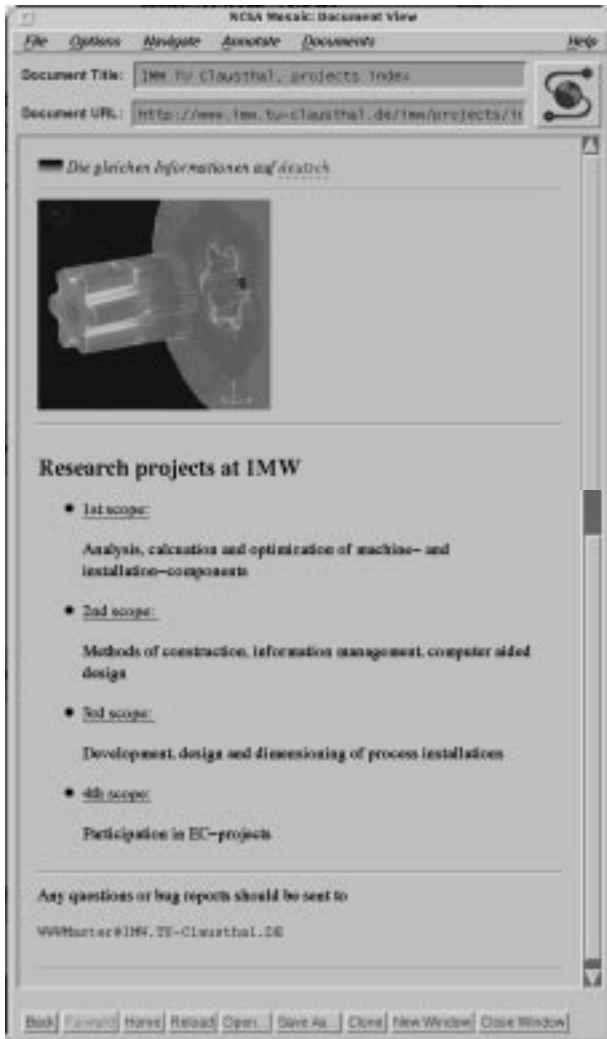


Bild 5 Nach Forschungsbereichen gegliedert werden Informationen zu den aktuellen Projekten des IMW angeboten

Möglichkeit, sich nach aktuellen Themen (*Topics*) für Studien- und Diplomarbeiten am IMW zu erkundigen. Die Möglichkeit, die Rechte für den Zugriff auf bestimmte Dokumente auf campus- oder hausinterne Rechner zu beschränken spielt (nicht nur) in diesem Fall eine wesentliche Rolle.

Staff ist mit einer Liste des IMW-Personals verbunden. Von dort aus sind Dokumentenseiten mit Bild, Kurzlebenslauf, Telefonnummer und E-Mail-Adresse der Professoren und Mitarbeiter abrufbar (s. Bild 4).

Über *Research Projects* erhält der Benutzer folgende Auswahl von Projektbereichen (s. Bild 5):

1. Analyse, Berechnung und Optimierung von Maschinen- und Anlagenkomponenten
2. Konstruktionsmethodik, Informationsmanagement, rechnergestütztes Konstruieren
3. Entwicklung, Konstruktion und Dimensionierung verfahrenstechnischer Anlagen
4. EG-Forschungsvorhaben

Über weitere Hypertextverbindungen wird der Benutzer zu Informationen über einzelne Projekte innerhalb der aufgeführten Bereiche geleitet.

Durch Anklicken von *Lectures and Courses* wird auf dem Bildschirm das in Bild 6 dargestellte Dokument erzeugt, von dem aus Informationen über Lehrveranstaltungen des IMW sowie Namen und Sprechstunden der Ansprechpartner in Fragen der Lehre abrufbar sind.

Der IMW-Host stellt aber nicht nur institutsspezifische Dokumente zur Verfügung. Informationen zur VDI-Bezirksgruppe Harz und dem im März 1994 gegründeten VDI-Arbeitskreis Studenten und Jungingenieure an der TU Clausthal werden angeboten. Die Fachschaft Maschinenbau/Verfahrenstechnik/Chemieingenieurwesen unterhält ein eigenes Verzeichnis. Informationen über die Normungsaktivitäten diverser ISO-Arbeitsgruppen, insbesondere bzgl. der Norm ISO 10303 (STEP), sind abrufbar. Das IMW stellt als Koordinator des SFB 180 über den WWW-Server Informationen für andere an diesem Sonderforschungsbereich beteiligte Institute der TU Clausthal zur Verfügung. Auch hier sind die Zugriffsrechte auf campusinterne Rechner beschränkt.

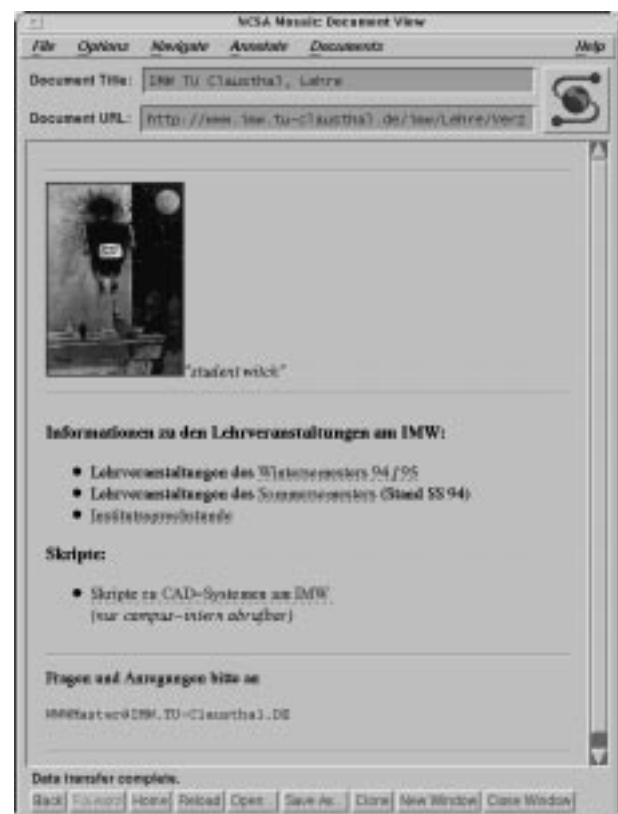


Bild 6 Studenten können sich nach dem Lehrangebot des IMW erkundigen; elektronische Skripte stehen für Lehrveranstaltungen zur Verfügung

Elektronische Skripte für CAD-Übungen

Hypertextverbindungen erlauben den Aufbau einer Netzstruktur zwischen einzelnen Dokumenten. Der Benutzer kann somit zwischen verbundenen Dokumenten hin und her "springen" und muß nicht, wie beim sequentiellen Seitenaufbau eines Buches, blättern, um von einer Seite zur nächsten zu gelangen. Aus diesem Grund eignen sich Hypertext-Dokumente hervorragend für die Darstellung von Skripten und Übungsanleitungen, in denen über markierte Stichworte oder Querverweise die gewünschten Informationen aus einem bestimmten Dokument heraus direkt abrufbar sind. Sofern die vorgegebenen Hypertextverbindungen logisch und bedarfsgerecht gelegt sind, ergibt sich für den Benutzer ein schneller und komfortabler Umgang mit diesen elektronischen Unterlagen, die darüber hinaus zu 100 % biologisch abbaubar sind. Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist die Möglichkeit der Farbdarstellung auf dem Bildschirm, wodurch Informationsqualität und -dichte bei einem elektronischen Dokument wesentlich höher sind als bei einem gedruckten oder kopierten.

Aus diesen Gründen wurden elektronische Skripte zu den CAD-Systemen "Medusa™" und "Pro/Engineer™" im html-Format für die CAD-Übungen im Rahmen der Lehrveranstaltungen "Technisches Zeichnen" und "Konstruktionslehre I" erstellt (s. Bild 7). Die Dokumente können mittels NCSA Mosaic™ parallel zur Arbeit mit dem CAD-System auf dem Bildschirm dargestellt werden. Diese elektronischen Skripte sind von allen Rechnern innerhalb des Campus-Netzwerkes der TU Clausthal aus abrufbar und können somit auch als Übungsanleitungen auf CAD-Arbeitsplätzen im Rechenzentrum genutzt werden.

Das Informationsangebot wird genutzt

Die Zahl der Zugriffe auf den WWW-Server des IMW liegt zur Zeit zwischen 250 und 400 pro Woche. Die in Bild 8 dargestellte Statistik der Woche ab dem 29. Oktober 1994 zeigt 301 Zugriffe. Davon gingen 211 von Rechnern mit deutscher Adresse (*Ger*), 35 von Rechnern mit Adressen aus dem europäischen Ausland (*Eur*) und 16 von Computern mit US-amerikanischen Adressen aus. Von diesen 16 Zugriffen aus den USA entfielen 11 auf Organisationen des Bildungssektors (*edu*), drei auf Regierungsstellen (*gov*) und zwei auf kommerzielle Organisationen (*com*). Sechs

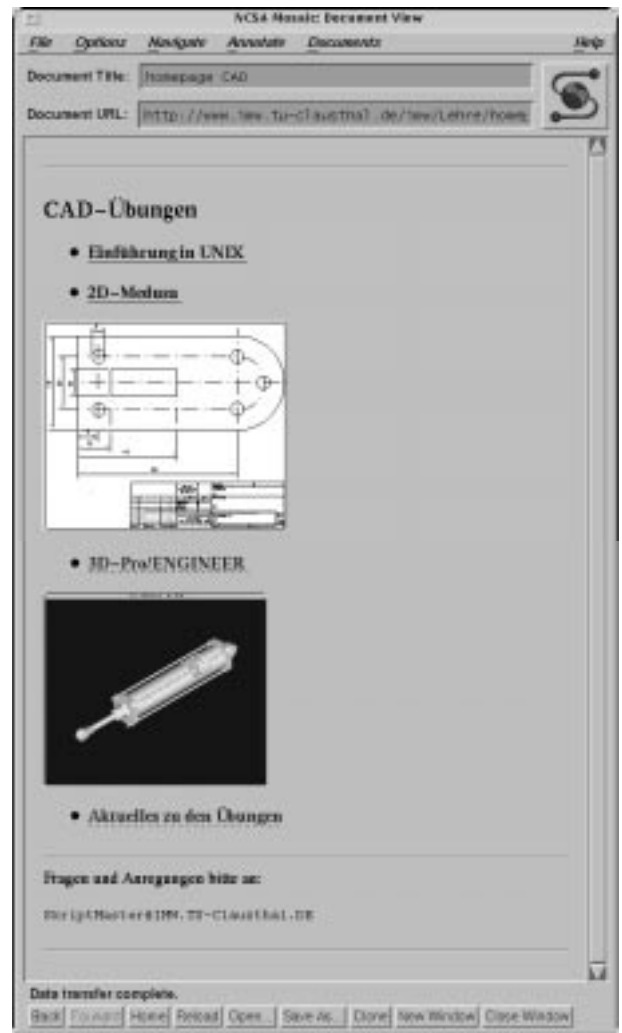


Bild 7 Skripte in elektronischer Form bieten *on-line* Unterstützung während der CAD-Übungen

Zugriffe erfolgten von Rechnern mit einer nicht einzuordnenden Adresse aus.

Aus der Statistik ist ferner ersichtlich, welche Organisationen und Einrichtungen am häufigsten auf den WWW-Server des IMW zugriffen und welche Dokumente hierbei von besonderem Interesse waren. Die meisten Verbindungen erfolgten vom Rechenzentrum der TU Clausthal aus, gefolgt von Hochschuleinrichtungen in Basel, Washington, Hannover, Bonn und Dortmund. Während sich die meisten Zugriffe auf die deutsche Fassung der *Homepage* beschränkten, galt den Informationen aus dem Bereich der Normungsaktivitäten des IMW das größte fachliche Interesse.

Das Potential ist längst nicht ausgeschöpft

Das Internet entwickelt sich mit rasanter Geschwindigkeit. Dies betrifft nicht nur die Zahl der daran angeschlossenen Computer, der übertragenen Anzahl von



Bild 8 Die Statistik beweist, daß das Informationsangebot des IMW großes Interesse findet

Bytes o.ä., sondern auch die Netzwerkdienste. Durch die bisherigen Entwicklungen in diesem Bereich hat sich der Wert des Internet als Ressource für wissenschaftliches Arbeiten deutlich erhöht. Heute ist wesentlich mehr Information wesentlich leichter erreichbar als vor wenigen Jahren. Dies betrifft sowohl die technische als auch die inhaltliche Zugänglichkeit. Bedenkt man, daß ein Großteil der wissenschaftlichen Information, die in Büchern und Zeitschriftenartikeln veröffentlicht wird, ursprünglich elektronisch verfaßt wird, so stehen die Chancen gut, daß in Zukunft immer mehr Informationen (auch) über Netzwerkdienste verfügbar gemacht werden. Einige Verlage haben bereits damit begonnen, Bücher parallel in gedruckter und in elektronischer Form zu veröffentlichen.

Es wäre allerdings ein Fehler, elektronische Texte nur als elektronische Versionen traditionell gedruckter Texte zu verstehen. Das elektronische Medium bietet weit mehr Möglichkeiten als die Produkte der Technologie Gutenbergs. Ein gutes Beispiel dafür sind die von World Wide Web implementierten Hypertextverbindungen. Durch sie wird ein Text in ein Geflecht von Informationen eingebunden, das im Idealfall den gesamten wissenschaftlichen Hintergrund dazu erschließt. Auch im Bereich "Multimedia" eröffnet das elektronische Medium Möglichkeiten, die der traditionellen Technologie verschlossen bleiben.

Doch nicht nur für den wissenschaftlichen, sondern auch für den industriellen Sektor bietet das Internet ungeahnte Möglichkeiten. Man stelle sich beispielsweise ein Unternehmen vor, das den Kunden seinen Produktkatalog nicht mehr in gedruckter, sondern in elektronischer Form präsentiert. Der Kunde kann über jeden Computer, der an das Internet angeschlossen ist, die Angebotspalette betrachten. Er hat kein Archivierungs- und Verteilungsproblem wie bei herkömmlichen Katalogen. Neben Abbildungen und Texten erläutern Bild- und Tonsequenzen das Produkt in ansprechender Art und Weise. Gemäß seinen Wünschen hat der Kunde die Möglichkeit, über Hypertext-Verbindungen zum einen nach und nach immer detailliertere Informationen über das gerade betrachtete Produkt einzuholen und zum anderen direkt auf Informationen über "benachbarte" Produkte (z.B. Baugruppenkomponenten) zuzugreifen. Der elektronische Katalog befindet sich immer auf dem neusten Stand, denn die Informationsinhalte sind leicht zu ergänzen und zu verändern. Druck- und Verteilungskosten wie bei herkömmlichen Katalogen entfallen. Möchte der Kunde ein Produkt bestellen, füllt er ein elektronisches Bestellformular aus, das anschließend via Internet nach wenigen Sekunden beim Zulieferer eingeht und bearbeitet werden kann. Viele werden dieses Beispiel belächeln. Wahrscheinlich haben sie bis vor kurzem auch das zu Beginn dieses Artikels beschriebene Netzwerk-Szenario für utopisch gehalten.

Literatur

- /1/ Maier, G.; Wildberger, A.: In 8 Sekunden um die Welt - Kommunikation über das Internet, Bonn (u.a.), 1994 (Addison-Wesley)

Forschungsaktivitäten des Instituts für Maschinenwesen

Konstruktion und Berechnung von Maschinenteilen

- Beanspruchungsermittlung
- Reibung und Verschleiß an Welle-Nabe-Verbindungen und Ausgleichskupplungen
- Tragfähigkeitsberechnung und Gestaltfestigkeitsermittlung an Zahnwellen-Verbindungen
- Geschwächte Schrupfverbindungen, Beanspruchungen und Berechnung
- Seiltrommeln (ein- und mehrlagig bewickelt)
- Bolzen-Lasche-Verbindung unter komplexen Betriebslasten
- Passungs- und Laufverhaltens von Mitnehmerverzahnungen
- Verbindungselemente unter hohen mechanischen und thermischen Belastungen
- Modelluntersuchungen zur elasto-plastischen Beanspruchung von Maschinenelementen
- Verbindungstechniken Metall-Keramik bei hohen Temperaturen
- Beanspruchungsanalyse und Optimierung stoßbelasteter Maschinenteile
- Berechnungssoftware zur Auslegung von Maschinenelementen
- Baureihen- und Baukastenentwicklung von Maschinen

Konstruktionssystematik und Informationstechnik

- Schnittstellen für CAD-Systeme zu FEM-, Berechnungs-, Organisationsprogrammen
- Entwicklung von Kurven- und Variantenprogrammen
- Einbindung von Konstruktionsdaten in den Produktdatenaustausch
- Anwendung von Datenbanken im CIM-Umfeld und von Konstruktionsinformationssystemen
- Strategien zur Informationserfassung, Datenhaltung und -verteilung
- Konstruktionsinformationssysteme
- Übergabe von CAD-Daten in den Fertigungsprozeß
- Dreidimensionales Konstruieren und Tolerieren
- Entwicklung von CAD-Anwendungssystemen
- CAD-CIM-Schnittstellen-Normierung in der rechnergestützten Fertigung
- Schnittstelle Konstruktion-Fertigungsprozeß
- Einbindung von CAD (2D/3D) in den Konstruktionsprozeß
- Erprobung von Konzepten auf der Schnittstelle Konstruktion-Fertigungsprozeß, insbesondere in der CAD-NC-Verfahrenskette
- Ermittlung von Daten zur Qualitätssicherung und Übergabe zur Konstruktion
- Werkzeugdatenverwaltung

Verfahrenstechnische Maschinen

- Konstruktionssystematik an Maschinen der Verfahrenstechnik, Expertensysteme für verfahrenst. Maschinen
- Entwicklung von Heißgasumwälzaggregate
- Entwicklung von Reaktionsmühlen
- Untersuchung der dyn. Zusammenhänge beim Prallmahlen
- Gestaltung schnelllaufender Rotoren der Verfahrenstechnik (Windsichter, Prallmühlen usw.)
- Entwicklung von Hochleistungs-Ofenbrennern und Industriebrennern in Hybridbauweise
- Entwicklung von Maschinenelementen und Verbindungstechniken bei hohen Temperaturen (über 1000 °C)
- Entwicklung verfahrenstechnischer Maschinen für das chemische Recycling von Kunststoffen
- Entwicklung einer verfahrenstechnischen Maschine für das Niedertemperaturrauchgasentschwefeln
- Entwicklung lärmärmer, schnelllaufender Mühlen
- Baureihenentwicklung von Kreislaufreaktoren mit innenliegendem Kreislauf für Gasphasenreaktionen

Maschinenakustik

- Geräuschkinderung von Einzelmaschinen und Maschinenhallen
- Systematisches Konstruieren lärmarmen Maschinen und Schallminderung
- Schallminderung an Druckluft-Drehantrieben
- Durchströmte Absorptionsschalldämpfer
- Untersuchungen zu Körperschall
- Entwicklung von Körperschall-Impedanzelementen
- Schallemission, Schallanalyse im schallarmen Raum
- Entwicklung eines Konstruktionsberatungssystems Akustik
- Arbeitsmethodik lärmarmen Konstruieren

Pneumatik

- Betriebsverhalten pneumatischer Antriebe
- Widerstandsverhalten pneumatischer Schaltelemente in stationärer und instationärer Strömung
- Konstruktion schneller Druckventile
- Systeme von Luftfedern und Ventilen zur Erzeugung vorgewählter Federkennlinien
- Kombination von Über- und Unterdrucksystemen für die Antriebstechnik

Experimentelle Festigkeitsermittlung

- 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 elasto-plastischer Beanspruchung (Kerbwirkung, Festigkeitserhöhung durch plast. Formgebung)
- automatische Auswertung spannungsoptischer Aufnahmen mittels digitaler Bildverarbeitung
- Hybridverfahren Spannungsoptik- Moiré zur Untersuchung nichtlinear-elastischer Werkstoffe
- Entwicklung neuer spannungsoptischer Werkstoffe und Auswerteverfahren zur Erfassung plastischer bzw. hochdynamischer Vorgänge
- kristalline Werkstoffe zur Modellierung anisotropen Materialverhaltens
- Einsatz der Moiré-Meßtechnik für Anwendungsfelder mit hohen Temperaturen (Dehnungsmessungen an Heißluftventilatoren) sowie zur Erfassung von Dehnungsfeldern bei hochdynamischen Beanspruchungen.

Werkzeugmaschinen

- Detailkonstruktionen an Werkzeugmaschinen, Genauspannen zylindrischer Teile
- Simulation von Fertigungsverfahren
- Programmierung elektronisch gesteuerter Werkzeugmaschinen

Leistungsangebote

Beratung und Erstellen von Gutachten

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

Fort- und Weiterbildung

- Seminare in "Maschinentechik, Methodisches Konstruieren, CAD-Einführung, CIM-Einführung, FEM-Einführung, Baukasten-Baureihenkonstruktion, Kostenbewußtes Konstruieren, Erzeugnisstrukturen und Stücklistenwesen, Pneumatische Antriebstechnik"

Kooperation mit der Industrie

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

Prüfstände, Laboratorien und Rechnerausstattung des Institutes für Maschinenwesen

Prüfstände für Untersuchungen an Maschinenelementen

- Hydraulische Verspannungsprüfstände zur Untersuchung von Antriebselementen mit bis zu 314 kw umlaufender Leistung
- Torsion-Schwingungsprüfstand zur experimentellen Ermittlung der Gestaltfestigkeit
- Umlauf-, Biege- und Torsions-Prüfstand für universelle Untersuchungen an Verbindungselementen
- Liegende hydraulische Zugprüfeinrichtung
- 32 + 3 Kanal, gemultiplexte Telemetrieanlage zur berührungslosen Übertragung von Meßwerten; portabel

Prüfstände zur Untersuchung verfahrenstechnischer Maschinen

- Schleuderprüfstand für schnell drehende Rotoren (Windsichter)
- Prüfstand für Feinprallmühlen
- Reaktionsschwingmühle für Gas-Feststoffreaktionen im Semi-Batch-Betrieb

Spannungsoptisches Labor

- Dyn. spannungsoptische Bank mit Belastungseinrichtungen und elektronisch gesteuertem Einzelblitz
- Versuchsanlage zum hybriden Meßverfahrens mit Spannungsoptik und Moiré (dyn. Nichtlinearitäten)
- Opt. Bank zur Trennung und Vervielfachung der Verschiebungsisotheten mittels Weißlichtzerlegung
- Modellerstellungs- und Auswertungseinrichtungen ebener und räumlicher spannungsoptischer Modelle
- Bildverarbeitungssystem zur Bildauswertung der Aufnahmen von optischen Verfahren
- Projektionspolariskop zur Auswertung von Spannungszuständen
- Polarisationsmikroskop für Textur- und Rekristallisationsuntersuchungen
- Spannungsoptische Untersuchungen im elasto-plastischen Bereich mit dem Werkstoff Silberchlorid

Akustisches Labor

- Schallarmer Raum
- Geräte zur Messung der Schalleistung
- FFT-Analyser zur Untersuchung des Schwingverhaltens von Maschinen und Maschinenelementen

CIM-Labor

- 4-Achsenbearbeitungszentrum
- 5-Achsenbearbeitungszentrum
- CNC-Drehmaschine mit interpolierender C-Achse
- Senkerodiermaschine mit 3D-Bahnsteuerung
- Koordinatenmeßgerät mit NC-Rundtisch
- Werkzeugvoreinstellgerät

Rechnerausstattung am Institut für Maschinenwesen

- Fileserver (Unix): SparcServer 1000 (2 CPU's, 64Mb, 15 Gbyte)
- Fileserver (PC Bereich): SparcStation 10/40 (64Mb, 6 Gbyte)
- Batch: SparcStation 10/41 (64Mb, 1,5Gbyte), IBM 590H (64Mb, 2 Gbyte)
- Netzverwaltung / -dienste: SparcStation2 (32 Mb, 2 Gbyte)
- Arbeitsplätze: 35 Unix-Workstations (Sun), 35 Apple Macintosh, 4 XTerminals, 2 DECStations
- CIM: µVAX 3300 (32Mb, 2Gbyte), HP 715/33 (48Mb, 1 Gbyte)
- Vernetzung: Localtalk, 10Base2, 10Base5, 10BaseT, 10Base-FL

Veröffentlichungen des IMW seit dem 1.1.1991

Veröffentlichungen 1991

Albers, J.: Dynamische Spannungsanalyse mit optischen und numerischen Verfahren unter Einsatz der digitalen Bildverarbeitung am Beispiel prallbeanspruchter Partikelmodelle. TU Clausthal 1991

Kratsch, A.: Ein Beitrag zur methodischen Konstruktion von Kreislaufreaktoren für heterogenkatalytische Gas-Feststoffumsetzungen und deren Gasumwälzeinrichtungen. TU Clausthal 1991

Gehrke, U.; Holland, M.: CAD-Daten vorhanden - und dann? VDI-Z 133 (1991), Nr. 8

Holland, M.: Das STEP-Toleranzmodell. VDI-Z 133 (1991), Nr. 10

Deppermann, G.: Konstruktive Gestaltung von Hochgeschwindigkeitsrotoren in Feinprallmühlen. Dissertation, TU Clausthal 1991

Veröffentlichungen 1992

Dietz, P.; Prengemann, U.: Neue Wege in der CIM-Ausbildung. wt Produktion und Management, Januar 1992

Beck, K., Bugow, R., Maderholz, R.: VDAPS/DIN V 66304 - Ein Konzept setzt sich durch. Computer Graphik Markt 1992.

Barth, H.-J.; Gür, M.; Jakel, R.; Kraushaar, H.; Scholz, R.: Neue strömungstechnische Untersuchungen und konstruktive Lösungen für keramische Heißgasradialventilatoren bis 1300 °C. Kolloquium 1992 des SFB 180 „Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen“. 28./29. Oktober 1992, Clausthal

Hartmann, D.; Kruse, P. J.: Rechnerunterstützte Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen. Kolloquium 1992 des SFB 180 „Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen“, Teilprojekt A2. 28./29. Oktober 1992, Clausthal

Dietz, P.; Rübhelke, L.: Konstruktion und Optimierung eines Abweiseradsichters in Verbundbauweise. Kolloquium 1992 des SFB 180 „Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen“. 28./29. Oktober 1992, Clausthal

Kalliwoda, W.: Modellierung stahlähnlicher Werkstoffeigenschaften mit den spannungsoptischen Modellwerkstoffen Silberchlorid (AgCl) und Silberchromid Ag(Br,Cl) am Beispiel überelastisch beanspruchter Zugelemente. TU Clausthal 1992

Dietz, P.; Rübhelke, L.: Neue Werkstoffe und Verbundbauweise für Hochleistungsmaschinen der Verfahrenstechnik. Werkstofftechnik, Nr. 23, 1992.

Rübhelke, L.: Postprocessing in MARC/MENTAT mit der User-Subroutine PLOTV, MARC-User-Tagung 1992 am 4./5. November 1992 in München, MARC Software Deutschland GmbH

Rübhelke, L.: Berechnung eines Hochgeschwindigkeitsrotors mit orthotropen Werkstoffbedingungen, MARC-User-Tagung 1992 am 4./5. November 1992 in München MARC Software Deutschland GmbH

Veröffentlichungen 1993

Dietz, P.: Konstruktionssystematische Überlegungen und beanspruchungsgerechtes Gestalten von Maschinen der Verfahrenstechnik. Konstruktion, Heft 1, Januar 1993

Barth, H.-J.; Neumann U.: Antrieb einer Gasumwälzung für einen Druckbehälter bei 400°C. FVA-Antriebstechnik, Heft Nr. 2, Februar 1993

Dietz, P. ; Kruse, P. J. ; Hartmann, D.: Systematische Zentrifugenkonstruktion. Optimierung von Abläufen und Informationsflüssen. Filtern und Separieren 3/93

- Bugow, R.: Das europäische Gesamtkonzept für Teilebibliotheken. CAD-CAM Report, 12 (4), 1993
- Barth, H.-J.; Jakel, R.: Monolithischer keramischer Heißgasventilator bis 1300 °C mit neuentwickelter reibschlüssiger Welle-Nabe-Verbindung, VDI Berichte 1036 „Konstruieren mit Keramik“, VDI Verlag, Tagung Heidelberg 16./17. März 1993
- Tan, L.: Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit geschwächter Welle-Nabe-Preßverbindungen im elastischen und teilplastischen Bereich. Dissertation, TU Clausthal 1993
- Bugow, R.: Einbindung der CAD-Normteiledaten in CAD-Systeme. DIN Mitteilungen, 72 (4), 206-211, 1993
- Dietz, P.; Schäfer, G.; Wesolowski, K.: Zahnwellenverbindungen – Beanspruchungs- und Verschleißverhalten. Konstruktion, Heft 7/8, Juli/August 1993
- Prengemann, U.: Fertigungsinformationen für die Konstruktion bereitstellen. Zwf CIM 7-8/1993
- Dietz, P.; Kruse, P. J.; Hartmann, D.: Systematische Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen. Chemie Technik, 8/93
- Barth, H.-J.; Gür, M.; Jakel, R.; Kraushaar, H.; Scholz, R.: Konstruktionsstrukturen von Umwälzaggregate unter vornehmlich thermischer Belastung („Heißgasumwälzung“). Arbeitsbericht 1991-1992-1993 des Sonderforschungsbereiches 180, Clausthal, 1993
- Gausemeier, J.; Bugow, R.; Frank, T.: CAD-Normteiledaten-europäische und internationale Entwicklung. DIN Mitteilungen, 72 (4), 199-205. 1993
- Dietz, P.; Gieleßen, H.: Stress birefringence in textured Silver Chloride. Proceedings of the tenth International Conference on Textures of Materials (ICOTOM 10), 10 / 93

Veröffentlichungen 1994

- Wesolowski, K.: Abschlußbericht zum DFG-Vorhaben "Zahnwellenfestigkeit", Di 289 / 9-1; Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, Juli 1994
- Schäfer, G.: Das Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen mit Schiebeseitz; Abschlußbericht zum FVA-Vorschungsvorhaben Nr. 99 III & IV Zahn- und Keilwellenverbindungen, Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, Sep. 1994
- Dietz, P.; Schäfer, G.; Wesolowski, K.: Involute Spines - Load and wear behavior; Exploitation Problems of Mashines, Polish Akademy of sciences, Mechanical Engineering Committee, Vol. 29, Issue 3-4 (99-100), 1994,page 527 - 541
- Dietz, P.; Gieleßen, H.: Texture Development and Anisotropic Photoelastic Effects in Rolled Silver Chloride. Journal of Texture and Microstructures, erscheint Ende '94 / Anfang '95
- Prengemann, U.: Fertigungsinformationen im Konstruktionsprozeß. Dissertation, TU Clausthal 1994
- Rübelke, L.: Konstruktive Lösungen und Auslegungsmethoden für Hochgeschwindigkeitsabweiseradsichter aus Leichtbauwerkstoffen in der Verfahrenstechnik. Dissertation, TU Clausthal 1994
- Rothe, F.: Spielbehafete Laschenverbindungen bei quasistatischer Belastung unter Berücksichtigung nichtlinearer Randbedingungen. Dissertation, TU Clausthal 1994
- Erb, J.; Kruse, P.J.: Die STEP-Lösung für das Zeichnungswesen, Konstruktion, Heft 12, Dezember 1994
- Rübelke, L.; Schäfer, H.: Einfluß der Welle-Nabe-Verbindung auf das dynamische Verhalten von Hochgeschwindigkeitsrotoren. Konstruktion, Heft 6, Juni 1994

Autoren

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

Bugow, Rainer: Jahrgang 1958, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.10.1988 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Burgtorf, Uwe: Jahrgang 1965, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.10.1993 wiss. Mitarbeiter 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 1.10.1980 Universitätsprofessor und Institutsdirektor des IMW.

Engel, Klaus: Jahrgang 1960, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.4.1991 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Gummersbach, Frank: Jahrgang 1965, studierte Maschinenbau mit den Schwerpunkten Betriebsfestigkeit, Betriebs- und Systemverhalten an der TU Clausthal, seit 1.6.1993 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Gieleßen, Harald: Jahrgang 1962, studierte allg. Maschinenbau mit dem Schwerpunkt Reibungstechnik an der TU Clausthal, seit 1.2.1992 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Haje, Detlef: Jahrgang 1965, studierte allg. Maschinenbau mit den Schwerpunkten Konstruktive Gestaltung und Betriebsfestigkeit an der TU Clausthal, seit 1.11.1991 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Heinen, Frank: Jahrgang 1969, studierte Produktionstechnik an der TU Clausthal, seit 1.8.1993 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Henschel, Jürgen: Jahrgang 1968, studierte allg. Maschinenbau an der TU Braunschweig und der TH Darmstadt, seit 1.3.1994 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Jakel, Roland: Jahrgang 1965, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.9.1990 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Jeschke, Dirk: Jahrgang 1968, studierte Maschinenbau mit dem Schwerpunkt Produktionstechnik an der TU Kaiserslautern, seit 1.4.1993 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Kalwa, Ralf: Jahrgang 1962, studierte Physik; Schwerpunkt Atom-, Molekül- und Festkörperphysik - Computergestützte Methoden, an der TU Clausthal. Ab 15.5.1990 wiss. Mitarbeiter am Institut für Theoretische Physik der TU Clausthal. Seit 1.5.1991 wiss. Angestellter am IMW.

Kruse, Peter J.: Jahrgang 1962, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.11.1989 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Neumann, Uwe: Jahrgang 1963, studierte Verfahrenstechnik; Schwerpunkt Anlagenbau / Energieverfahrenstechnik an der TU Clausthal, seit 1.10.90 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Ort, Andreas: Jahrgang 1968, studierte Informatik an der Universität Fridericiana (TH) in Karlsruhe, seit Mitte April 1993 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Penschke, Steffen: Jahrgang 1965, studierte Maschinenbau, Fachrichtung Fördertechnik an der TU Dresden. Ab 1.3.1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik der TU Dresden. Seit 1.4.1993 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

Prengemann, Ulf: Jahrgang 1962, studierte Fertigungstechnik / Maschinenbau an der TU Dresden und war von 1987 bis 1988 Konstruktionsingenieur bei einem Baumaschinenhersteller in Berlin. Seit 1.10.1988 wiss. Mitarbeiter am IMW. Promotion im Mai 1994 über Fertigungsinformationen im Konstruktionsprozeß.

Romann, Martin: Jahrgang 1963, studierte Verfahrenstechnik, Schwerpunkt thermische und mechanische Verfahren, an der TU-Clausthal, seit 1.8.92 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Rothe, Frank: Jahrgang 1961, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, ab 1.3.1989 wiss. Mitarbeiter am IMW, Promotion im März 1994 über Bolzen-Lasche-Verbindungen, seit 15.4.1994 Anwendungstechniker der VAW Aluform System-Technik GmbH in Neuburg/Donau.

Schäfer, Günter: Jahrgang 1963, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.11.89 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Schiedeck, Norbert M. G.: Jahrgang 1965, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.7.1992 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Schmidt, Axel: Jahrgang 1963, studierte Maschinenbau mit den Schwerpunkten Mechanik und Informationstechnik an der TU Clausthal. Vom 1.8.1992 bis 31.1.1993 freiberuflicher Dipl.-Ing. Seit 1.2.1993 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Schmitt, Reinhard: Jahrgang 1967, seit 1994 verheiratet, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.9.1993 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Tan, Li: Jahrgang 1952, studierte allg. Maschinenbau an der TH Nanjing, China, seit 01.09.1984 Assistent an der TH Nanjing, seit 01.04.1988 wiss. Angestellter am IMW. Promotion im Juni 1993 über die Beanspruchung geschwächter Welle-Nabe-Preßverbindungen.

Wesolowski, Klemens: Jahrgang 1963, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.1.1991 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Xie, Huimin: Geboren 1965 in Peking, studierte Festkörpermechanik am Peking Institute of Technology, Promotion über Moiré-Interferometrie 1992 an der Tsinghua Universität, seit 1.9.1994 Gastwissenschaftler am IMW.

Weitere Mitarbeiter am Institut:

Heider, Gunther: Jahrgang 1968, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.4.1994 wiss. Mitarbeiter am IMW.

Wächter, Martina: Jahrgang 1959, studierte allg. Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.4.1985 wiss. Mitarbeiterin am IMW.

Weitere Gastwissenschaftler am Institut:

Hsueh, I-Ching: Jahrgang 1961, studierte Maschinenbau an der Universität Tsing-Hua/Taiwan und der TU Clausthal, seit 1993 Gastwissenschaftler am IMW.

Isranuri, Ikhwanyah: Jahrgang 1964, studierte Maschinenbau an der Universität Sumatera Utara / Indonesien, seit 1.4.1994 Gastwissenschaftler am IMW

Li, Zhenpan: Jahrgang 1961, studierte Maschinenbau an der TU Jilin/China, seit 1.9.1994 Gastwissenschaftler am IMW

So finden Sie das IMW:

Aus Richtung Hannover / Hamburg:

A 7 bis Ausfahrt **Seesen** → An Ampel rechts; nach ca. 1,5 km links auf vierspurige B 243

B 243 an Ausfahrt Clausthal-Zellerfeld, Braunlage verlassen auf die B 242

B242 → Richtung Ortsteil Zellerfeld abbiegen

Im Ortsteil **Zellerfeld** rechts auf **B 241** einbiegen → Nach langgezogener Linkskurve in Kreisverkehr einbiegen → Auf rechter Spur Verlauf von B 241 folgen und Kreisverkehr verlassen → Nach ca. 500 m rechts (*Am Klepperberg*), dann links in *Robert-Koch-Straße* einbiegen
Das IMW befindet sich nach 50 m auf der rechten Seite.

Aus Richtung Göttingen / Kassel:

A 7 bis Ausfahrt Northeim-Nord → **B 3** bis **Northeim**; in Northeim Umgehungsstraße zur B 247 →

B 247 Richtung Katlenburg / Duderstadt

In **Katlenburg** auf **B 241** Richtung Osterode abbiegen

Am Ortseingang **Osterode** auf **B 243** Richtung Herzberg Nach ca. 500 m Ausfahrt Goslar Clausthal-Zellerfeld abfahren → **B 241** Richtung Clausthal-Zellerfeld

Nach Ortseingang **Clausthal-Zellerfeld** an der ersten Ampel rechts abbiegen → An T-Einmündung (rechterhand eine Tankstelle) rechts abbiegen; Clausthal verlassen

Nach 1,5 km links abbiegen, nach 1000 m an T-Einmündung links Richtung Goslar/Clausthal → Ortsschild Clausthal → Vierte Straße (*Am Klepperberg*) links, dann nochmals links in *Robert-Koch-Straße* einbiegen → Das IMW befindet sich nach 50 m auf der rechten Seite.

