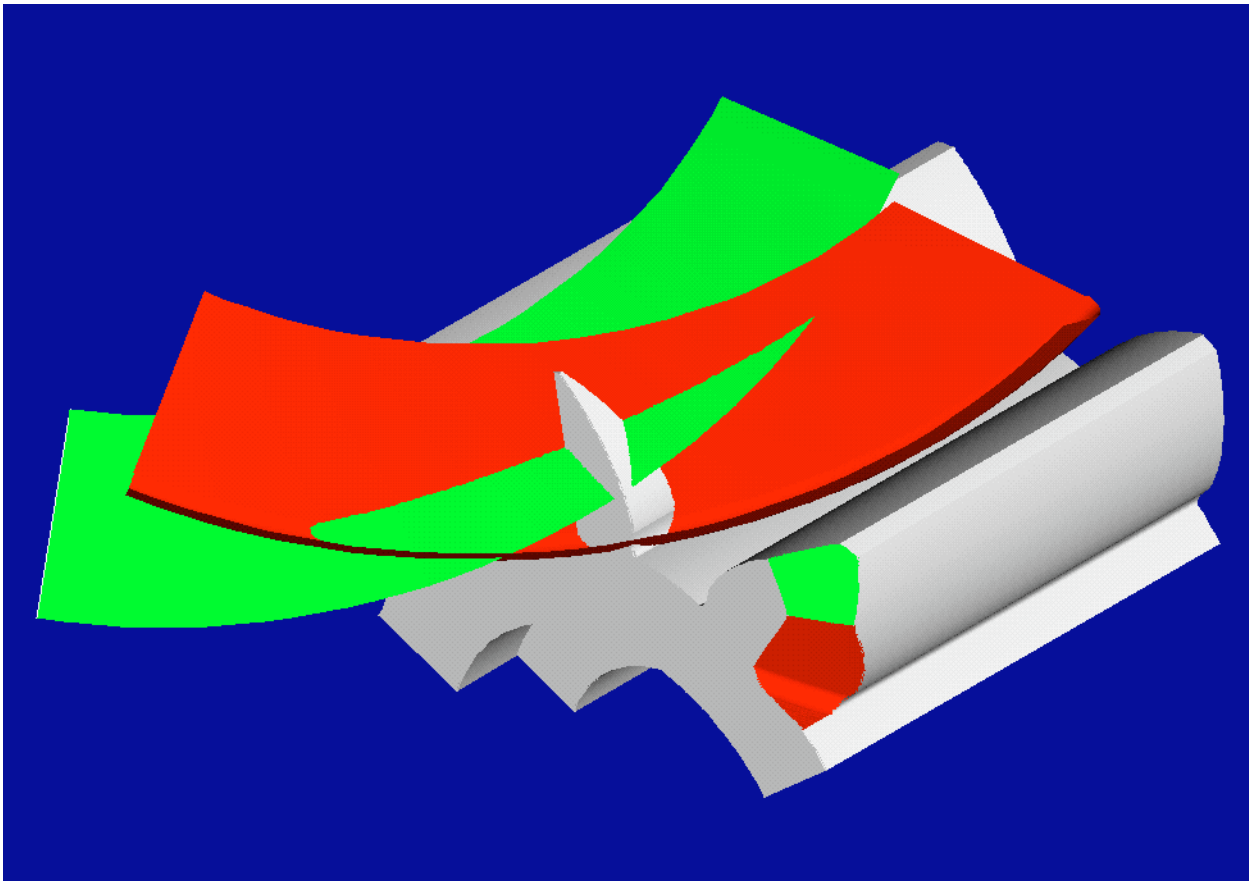




Institut für Maschinenwesen

Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz

Mitteilung Nr. 21 (1996)



**Mitteilungen aus dem
Institut für Maschinenwesen
der
Technischen Universität Clausthal
Nr. 21
(November 1996)**

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz

Redaktion und Layout: Dr.-Ing. Günter Schäfer

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: Am Institut für Maschinenwesen werden kinematisch aufwendige Fertigungsverfahren simuliert und optimiert. Das Titelblatt zeigt die CAD-basierte Simulation eines Fräsverfahrens zur Herstellung von Zahnkantenabdachungen an Starterritzeln. Die Untersuchungen wurden mit Unterstützung der Robert Bosch GmbH in Hildesheim durchgeführt (siehe auch Artikel S. 25 ff).

gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

Inhaltsverzeichnis		i
Vorwort		1
Aufsätze		
Konstruktion und Berechnung von Maschinenteilen		
Garzke, M.:	Beanspruchungsverhalten von Zahnwellen-Verbindungen unter Drehmomentbelastung	3
Burgtorf, U.:	Berechnungsprogramm zur Tragfähigkeitsberechnung von Zahnwellen-Verbindungen	11
Gieleßen, H.:	Realisierung einer kostengünstigen Positioniersteuerung	17
Schäfer, G.:	Lebensdauerabschätzung für Zahnwellen-Verbindungen	21
Heimannsfeld, K.; Schiedeck, N.:	Prozesssimulation und -optimierung am Beispiel der Fertigung von Zahnkantenabdachungen	25
Konstruktionssystematik und Informationstechnik		
Dietz, P.:	Konstruieren - Kunst oder Handwerk	31
Große, A.; Schiedeck, N.:	Rechnergestützte Stahlauswahlmethodik für Konstrukteure	41
Penschke, St. Große, A., Heinen, F.:	Ansätze zur parallelen Gestaltung von Produkten und Fertigungsprozessen	45
Schmitt, R.:	Workflow-Management für die integrierte Produktentwicklung	53
Dietz, P.; Ort, A.:	Verwendung der ISO 13584 'Parts Library' unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen in der Konstruktion	59
Verfahrenstechnische Maschinen		
Romann, M.:	Verfahrenstechnische Anforderungen und deren maschinenbauliche Umsetzung in einem Kreisprozeß	67
Große, A.; Heimannsfeld, K.:	Wissensbasierte Fehler- und Störfallanalyse bei der Entwicklung von verfahrenstechnischen Maschinen	73

Maschinenakustik

Schmidt, A.:	Alternatives Verfahren zur Körperschallanalyse am Beispiel der Zahnradstruktur	81
Gummersbach, F.; Haje, D.:	EQUIP – Konstruktions-Beratungssystem für die Entwicklung lärmarmer Produkte	89

Meßtechnik

Heinen, F.:	Pneumatisches Messen	95
Xie Huimin; Zhang Daxin:	Untersuchungen zur Herstellung eines Moire-Gitters für Hochtemperaturanwendungen	99

Hochschulkontakte

Betaneli, A.J.:	Der Entwicklungs- und Konstruktionsprozeß von Flugkörpern	104
Dumbadse, A.A.:	Methodik zur Bestimmung des Diffusionskoeffizienten	108

Das Institut: Aktivitäten und Ausstattung

Forschungsaktivitäten des Instituts für Maschinenwesen	113
Leistungsangebote	115
Prüfstände, Laboratorien und Rechnerausstattung des Institutes	116
Veröffentlichungen des IMW seit dem 1.1.1993	117
Mitarbeiter des Institutes	119

Vorwort

Wenn ich mir mein Vorwort vom letzten Jahr ansehe, bin ich schon noch etwas erstaunt über den darin vorhandenen Optimismus bezüglich der endgültigen Fertigstellung des Institutsumbaus und der sonstigen baulichen Maßnahmen. Die vielgelobte Klimaanlage macht zwar Lärm, aber nicht kühl. Gegen den Lärm können wir etwas unternehmen, bezüglich der Funktion schiebt´s wieder mal einer auf den andern, bis es beim Staatshochbauamt hängenbleibt. Aber genaue Messungen mit unserer 3D-Maschine bei 35^o C und ständigem Temperaturwechsel sind halt nicht auswertbar!

Aber der Hörsaal ist jetzt wirklich schön, farblich und gestalterisch gehört er zu den Glanzlichtern dieser Universität. Dafür haben wir wieder die (bekannten) Schwierigkeiten mit der Eingangstreppe, die sich bei dem kommenden Frost sicher vollständig auflösen wird. Aber die Denkmalspflegerin bestand auf einer historischen Terazzo-Ausführung, die schon wieder eine Verzögerung von einem Jahr verursacht, weil wir erst jemanden finden müssen, der das überhaupt noch herstellen kann.

Soweit für die Eingeweihten und ehemaligen Mitarbeiter, die schon früher unter diesen Institutsinterna leiden mußten!

Nach eineinhalb Jahren Prorektorzeit wurde ich zum Rektor der Universität Clausthal gewählt, mein Amtsantritt war am 1. Oktober dieses Jahres. Die offizielle Amtsübergabe war ein Riesenfest mit Blas- und Jazzmusik, bei dem die letzten (Institutsmitglieder) erst um sechs Uhr morgens die Aula verließen. Der Rest meiner Amtszeit wird aber wahrscheinlich nicht so lustig sein, denn die Technische Universität Clausthal steht in dem Zangengriff zwischen zuwenig Studenten und den Einsparmaßnahmen des Landes vor ernststen Problemen.

In diesem Wintersemester haben wir eine Neuanmeldedahl von 248 Studierenden. Das bedeutet, daß die Gesamtstudentenzahl zum Ende des Wintersemesters auf etwa 3000 sinken wird und die TU Clausthal

damit in vielen Studiengängen nicht ausgelastet ist. Dies betrifft natürlich in erster Linie die traditionellen Studiengänge des Bergbaus und Hüttenwesens, aber auch der Maschinenbau und die Verfahrenstechnik zeigen keine befriedigenden Auslastungszahlen. Mit der prozentualen Minderung der Studenteneingangszahlen ist gerade in diesen Fachrichtungen Clausthal im Vergleich mit anderen Ingenieuruniversitäten noch sehr gut weggekommen, unser Problem sind aber die sowieso schon kleinen Zahlen!

Natürlich steuern wir dagegen. Nach der Einrichtung der neuen Studiengänge Umweltschutztechnik, Rohstoff- und Geotechnik, Kunststofftechnik, Energiesystemtechnik und Wirtschaftsmathematik bereiten wir jetzt Studiengänge des Wirtschaftsingenieurwesens vor, die das spezifische Hintergrundwissen unserer Universität mit einem sehr praxisbezogenen wirtschaftswissenschaftlichen Studienanteil verbinden und eine sehr enge Zusammenarbeit mit der Industrie in Form von Lehrbeauftragungen, Projektarbeiten und Industriepraktika aufweisen sollen. Vorgespräche mit der Industrie sind schon gelaufen, wir waren erstaunt über das große Interesse an einer Zusammenarbeit und an der gemeinsamen Gestaltung von Studiengängen, bei denen die in Clausthal vorhandene Kompetenz in den technischen Bereichen der Stoffgewinnung und -verarbeitung, der Energieerzeugung und -umsetzung und der Materialwissenschaften offenbar stark gefragt ist. Hierzu wird an der TU Clausthal ein wirtschaftswissenschaftliches Institut mit fünf Professoren eingerichtet - dieses natürlich aus dem Bestand von Fachbereichen, die in der Ausbildung an Bedeutung verlieren.

Aber natürlich bemühen wir uns auch in unseren klassischen Bereichen um Studierende. Nachdem die Rankings der Presse uns wieder einmal bescheinigt haben, daß wir eine kleine und feine Universität mit exzellenter Ausbildung sind, haben wir eine Werbebroschüre geschaffen, die nicht nur allgemein gut angenommen wird, sondern auch von Mitgliedern, Angehörigen und Freundinnen des Instituts nur so strotzt

- es beginnt schon auf dem Deckblatt. Wenn Sie interessiert an der Broschüre sind: Nachricht genügt, wir schicken Sie Ihnen sofort zu.

Zurück zum Institut! Die Beendigung einer Reihe von Projekten hat uns eine ganze Menge von Doktorprüfungen mit entsprechenden Feierlichkeiten beschert, so daß mit ca. 24 wissenschaftlichen Mitarbeitern das Institut etwas kleiner geworden ist. Eine wesentliche Änderung in der Ausrichtung trat dadurch ein, daß Herr Prof. Barth und sein Bereich der Pneumatik in das Institut für Reibungstechnik übergewechselt ist und bei uns eine Professorenstelle "Rechnerintegrierte Produktentwicklung" ausgeschrieben ist, die wir im Laufe des nächsten Jahres besetzen wollen. Damit verstärkt das Institut seine Kompetenz im Bereich der Rechneranwendung in der Produktentwicklung, in dem wir noch einen riesigen Entwicklungsbedarf sehen. Damit wird aber auch in Clausthal ein Schwerpunkt auf diesem Gebiet eingerichtet, wie er in dieser Kombination nur selten in Deutschland zu finden ist.

Dem Sonderforschungsbereich "Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen" wurde in diesem Jahr bei seiner Begutachtung ein großes Lob ausgesprochen. Mit seiner weiteren Verlängerung bis Ende 1999 stellt er einen der längsten Sonderforschungsbereiche in der Geschichte der DFG dar - was wir natürlich als besonders hohes Vertrauen in unsere Forschungskompetenz werten. Eine ganze Reihe der dabei entwickelten Anlagen und Maschinen sind soweit erprobt, daß sie unmittelbar vor der industriellen Anwendbarkeit stehen und wir auch mit entsprechenden Unternehmen oder industriellen Forschungsvereinigungen Gespräche führen (z.B. Hochgeschwindigkeits-Windsichter, Reaktionsmühle, Heißgaslüfter, Niedertemperatur-Rauchgasentschwefelung usw.) Bei Interesse senden wir Ihnen gerne über die auch in diesen Institutsmitteilungen vorhandenen Artikel hinausgehende Informationen zu.


Auch die anderen, besonders die internationalen Projekte schreiten voran. Das das vorige Heft im Titelblatt beherrschende Dino-Projekt ist von uns abgeschlossen, der Dino wird jetzt nach unseren Plänen in Spanien gebaut. Da die Zusammenarbeit in CRAFT aber soviel Spaß macht, haben wir ein anderes Projekt übernommen, das sich mit der Fernsteuerung von Baumaschinen befaßt, die unter unwirtlichen Bedingungen (unter Wasser, unter Strahlung, unter Hitze

usw.) arbeiten - wir konstruieren den Bedienungs-Simulatorstand. Auch das Projekt EQUIP zur Beratung von Konstrukteuren in Sachen "Lärmarmes Konstruieren" geht in diesem Jahre mit der Erstellung der Software seinem Ende zu und wartet auf ein Nachfolgeprojekt.

Neben dem von uns initiierten Projekt COPES zum internationalen Austausch von Wissenschaftlern mit Clausthal (wir berichteten in der letzten Ausgabe) haben wir in diesem Jahr im europäisch geförderten Projektrahmen ALFA einen Wissenschaftleraustausch mit gemeinsamen Forschungsprojekten mit Brasilien, Bolivien und Mexiko begonnen, dessen Realisierung im Jahr 1997 bevorsteht. Damit haben wir auch unsere ohnehin nicht schwachen Auslandsverbindungen noch verstärkt, was sich letztendlich auch auf den Austausch von Studierenden bemerkbar macht. Insbesondere der Kontakt zu Großbritannien wurde dadurch institutionalisiert, daß ich in diesem Jahr zum Mitglied der Royal Society of Visiting Professors berufen wurde. Daneben haben wir die bestehenden Beziehungen zu Tbilisi in Georgien wieder erneuert - Sie werden in dieser Ausgabe entsprechende Beiträge finden.

Wie in den vergangenen Jahren wollen wir mit diesen Mitteilungen aus unserem Institutsleben berichten - in lockerer Folge und mit unterschiedlichem Grad an Wissenschaftlichkeit und Ernsthaftigkeit. Falls Sie ein Thema besonders interessiert, senden wir Ihnen gerne weitere Informationen zu. Behalten Sie uns und den - mittlerweile schon wieder verschneiten - Oberharz in guter Erinnerung!

Clausthal, im November 1996



Beanspruchungsverhalten von Zahnwellen-Verbindungen unter Drehmomentbelastung

Garzke, M.

Zahnwellen-Verbindungen mit Schiebesitz bilden einen Forschungsschwerpunkt des Institut für Maschinenwesen. Entscheidenden Einfluß auf ihr Beanspruchungsverhalten unter Drehmomentbelastung besitzen neben den Verzahnungsabweichungen und dem Werkstoff auch verschiedene Geometrieparameter, u.a. die Zähnezah und die Nabengeometrie.

Involute splines with clearance fit are being studied at the Institute of Mechanical Engineering. In addition to tooth deviations and material, a number of various geometric parameters, number of teeth and hub geometry for example, greatly influence the stress behaviour of these machine elements when under torque.

1 Einleitung

Die Beanspruchungen im Kerbbereich drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen entstehen durch die Flankennormalkraft F , die in eine Umfangskraft F_U und in eine Radialkraft F_R zerlegt werden kann, **Bild 1**. Die Umfangskomponente erzeugt im Zahnfuß eine Schubbeanspruchung sowie durch die Zahnbiegung auf der Kraftangriffsseite eine Zugbeanspruchung (-> Zugseite, Indize z) und auf der lastfreien Zahnseite eine Druckbeanspruchung (-> Druckseite, Indize d). Die Radialkomponente verursacht eine Druck- und eine Tangentialspannung. Ebenso kann die Flankennormalkraft der Nabe in eine Umfangskraft F_U und in eine Radialkraft F_R aufgespalten werden (**Bild 2**), wobei durch die Umfangskomponente im Zahnfuß eine Schubbeanspruchung sowie durch die Zahnbiegung auf der Kraftangriffsseite eine Zugbeanspruchung entsteht. Eine Unterscheidung in Zug- und Druckseite wie bei der Welle kann bei der Nabe entfallen, da die Beanspruchungen auf der Zugseite durch die Nabenaufweitung kritischer sind als auf der Druckseite /1/.

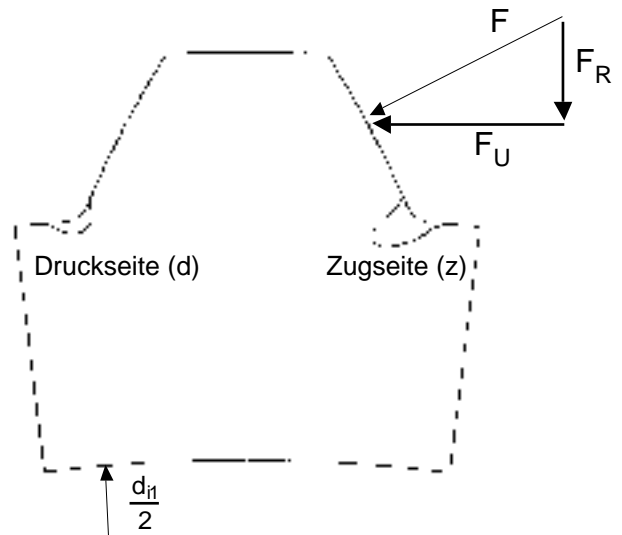


Bild 1: Schematische Darstellung der Flankenkräfte und der hochbeanspruchten Wellenzonen /1/

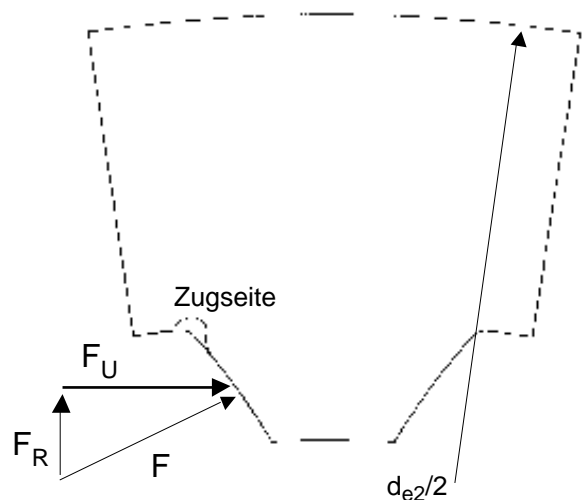


Bild 2: Schematische Darstellung der Flankenkräfte und der hochbeanspruchten Nabenzonen /1/

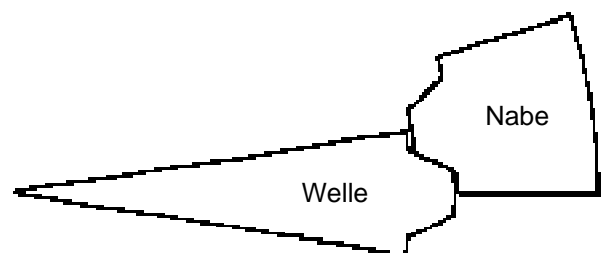


Bild 3: Zahnsektormodelle von Welle und Nabe im Kontakt

2 Geometrie der Zahnwellen-Verbindungen

Zur Klärung des Spannungs- und Verformungsverhaltens von Zahnwellen-Verbindungen unter Drehmomentbelastung wurden umfangreiche räumliche Finite-Elemente-Kontaktrechnungen durchgeführt. Einen starken Einfluß üben dabei u.a. folgende Größen aus:

- Werkstoff
- Zähnezahl z
- Verbindungsbreite b
- Zahnüberstand L (Verzahnung eines Partners länger als Verbindungsbreite b)
- Nabenaußendurchmesser d_{e2} und Lasteinleitung

Die bisherigen Untersuchungen beschränkten sich dabei auf abweichungsfreie Verbindungsgeometrien bestehend aus Zahnsektormodellen (**Bild 3**), da aus Speicherkapazitäts- und Rechenzeitgründen derzeit keine räumlichen Untersuchungen vollständiger Zahnwellen-Verbindungen im Kontaktverfahren möglich sind. Die Festlegung geeigneter Randbedingungen und die Ausnutzung von Symmetrieebenen gestattet zudem die ausreichend genaue Abbildung des gesamten Spannungs- und Verformungsverhaltens abweichungsfreier Verbindungen unter Drehmomentbelastung /2/.

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf untersuchte Zahnwellen-Verbindungen, bei denen

die Zähnezahl z , der Nabenaußendurchmesser d_{e2} , der Zahnüberstand L und die Lasteinleitung variiert wurden:

- Zähnezahl: 6, 20 und 62
- Verhältnis Naben-Außendurchmesser/Bezugsdurchmesser: $d_{e2}/d_B=2$ und $d_{e2}/d_B=1,31$
- Lasteinleitung: Drehmomenteinleitung am Verbindungsbeginn, -ende und über die gesamte Verbindungsbreite b
- Zahnüberstand: beidseitiger Wellen- und einseitiger Nabenüberstand (Nabe ragt über die Welle hinaus)

Das Verhältnis Verbindungsbreite/Bezugsdurchmesser blieb mit $b/d_B=0,625$ ebenso invariant wie der Eingriffswinkel von $\alpha=30^\circ$. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander zu gewährleisten, wurden alle Verbindungen einer konstanten Drehmomentbelastung von $T=320\text{ Nm}$ unterzogen. Das Drehmoment wird über den Naben-Außendurchmesser in die Verbindung eingeleitet und durch die Welle fortgeleitet. Eine feste Einspannung des langen, frei überstehenden Wellenendes erzeugt das Reaktionsmoment. Quer- und Axialkräfte sowie Biegemomente sind in den Rechnungen nicht berücksichtigt worden. **Bild 4** zeigt eine räumliche Zahnwellen-Verbindung mit beidseitigen Wellenüberstand.

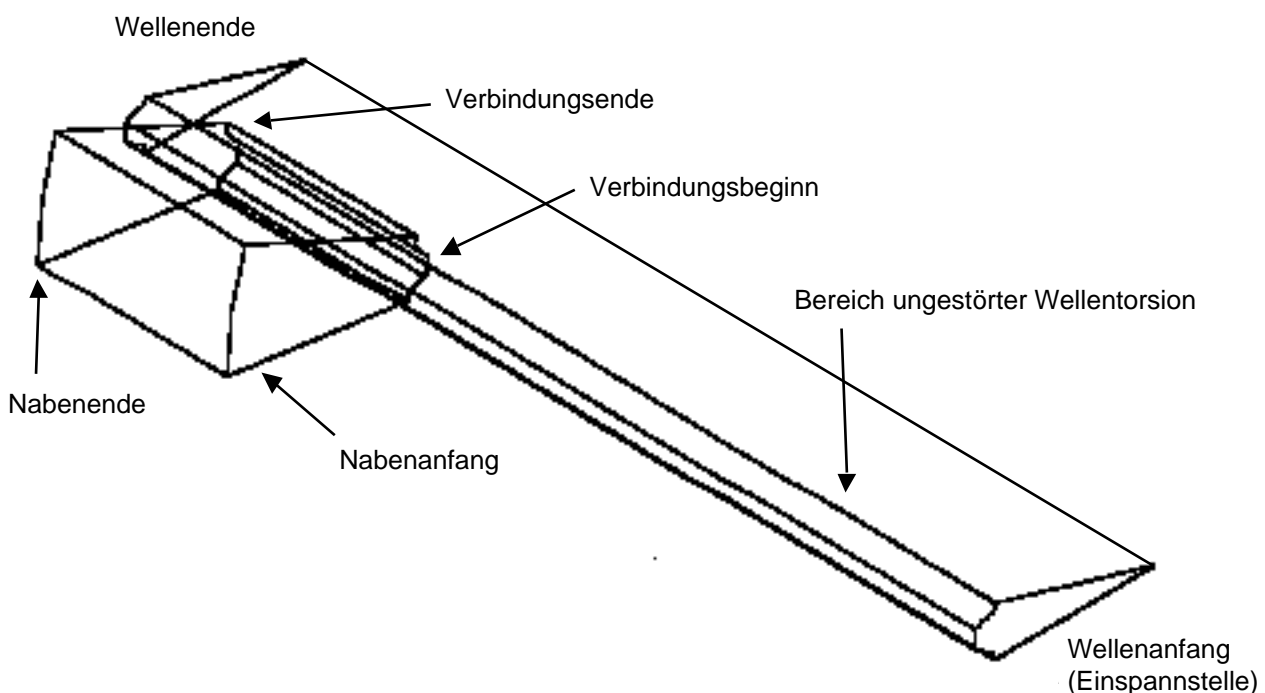


Bild 4: FE-Sektormodell einer räumlichen Zahnwellen-Verbindung, Welle und Nabe in Kontakt

3 Ergebnisse

Die Auswertung der Kontaktrechnungen erfolgte durch Aufnahme der Vergleichsspannung nach der Gestaltänderungsenergiehypothese ($\sigma_{\text{V,Mises}}$) in den Zahnfußbereichen auf der Zug- und Druckseite der Welle und auf der Zugseite der Nabe sowie die Bestimmung der Pressungsverteilung auf der Zahnflanke im Kontaktbereich (Verbindungsbreite b). Dieser Überdeckungsbereich von Welle und Nabe ist in den nachfolgenden Diagrammen grauschraffiert.

3.1 Beanspruchung der Welle

3.1.1 Einfluß der Zähnezahl

Beim Vergleich der Spannungsverläufe im Zahnfußbereich können grundsätzliche Unterschiede zwischen Verbindungen mit kleinen und großen Zähnezahlen festgestellt werden, **Bild 5**. Bei kleinen Zähnezahlen tritt kein ausgeprägtes Spannungsmaximum Verbindungsbeginn (a) auf. Die maximale Vergleichsspannung befindet sich für sehr kleine Zähnezahlen im Bereich vor der Kontaktzone, in dem die Zahnbiegung abgeklungen ist und der Zustand der ungestörten Torsion (u) vorliegt /3,4/. Mit zunehmender Zähnezahl wird ein ausgeprägtes Spannungsmaximum am Verbindungsbeginn erkennbar, wobei das Maximum auf der Druckseite vor dem Verbindungsbeginn liegt, auf der Zugseite hingegen direkt am Kontaktbeginn zu finden ist. Ursache dafür ist der Verlauf des Kraftflusses von der Nabe über die Kontaktzone in die Welle. Zahnwellen mit geringer Zähnezahl weisen bei gleicher Drehmomentbelastung eine höhere Vergleichsspannung im Bereich ungestörter Torsion auf als Verbindungen mit vielen Zähnen, da bei gleichem Bezugsdurchmesser das Trägheitsmoment bei niedrigen Zähnezahlen wesentlich kleiner ist als bei hohen Zähnezahlen (**Bild 6**). Analog zur Spannungsberechnung tordierter kreiszylindrischer Stäbe gilt auch für Zahnwellen-Verbindungen der umgekehrt proportionale Zusammenhang zwischen Schubspannung und Widerstandsmoment, woraus sich die unterschiedliche Höhe der Vergleichsspannung im Bereich der ungestörten Torsion erklärt. Wellen mit geringer Zähnezahl werden vorrangig auf Torsion beansprucht, Verbindungen mit großer Zähnezahl unterliegen

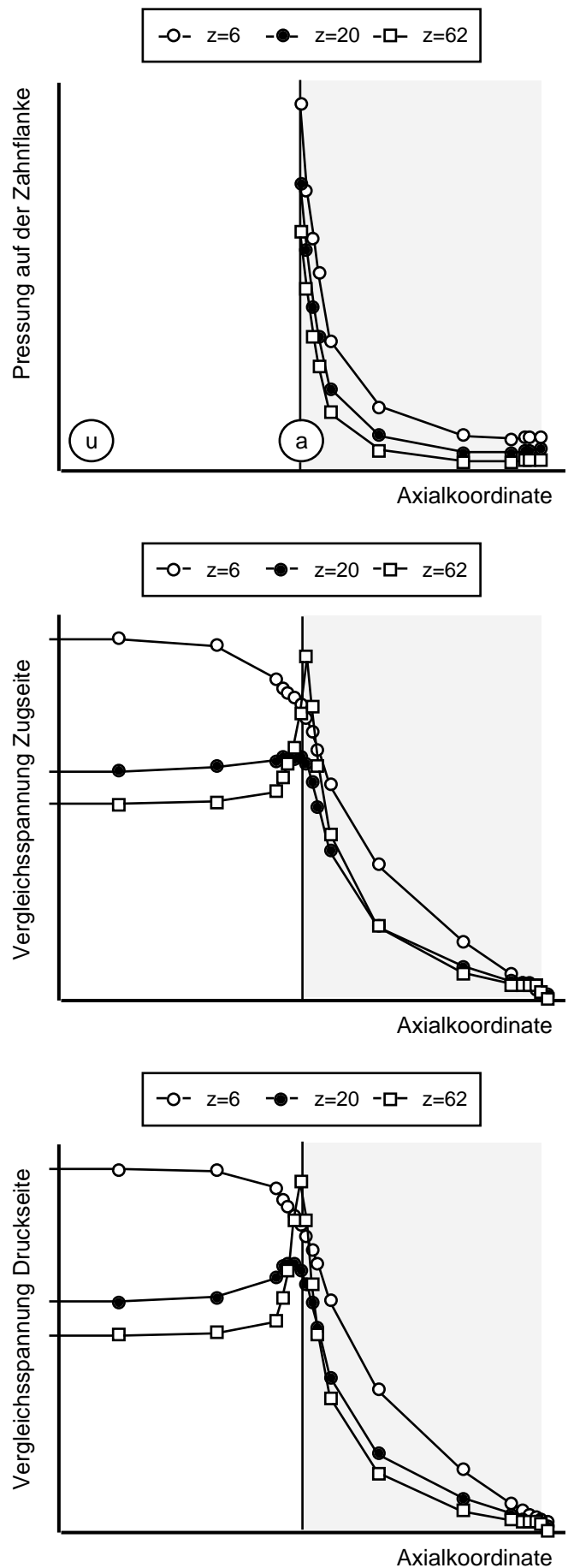


Bild 5: Vergleich der Pressungs- und Zahnfußspannungsverläufe von Zahnwellen-Verbindungen mit unterschiedlicher Zähnezahl ($d_{e2}/d_B=2$), DIN 5480

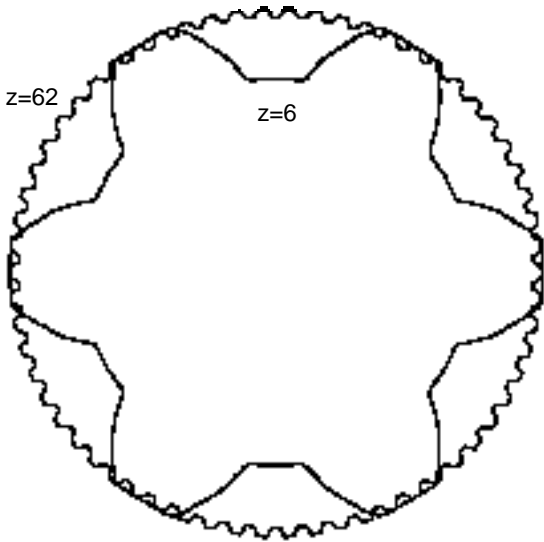


Bild 6: Vergleich der Querschnittsfläche für kleine und große Zähnezahl bei gleichem d_B

speziell am Verbindungsbeginn erhöhter Biegebeanspruchung. Verbindungen im Zähnezahlbereich 12..13 z 16..18 verfügen über einen gleichmäßigen Spannungsverlauf bis zum Kontaktbeginn, der dann zum Verbindungsende hin aufgrund des Kraftflusses abfällt.

Die am Verbindungsbeginn auftretende maximale Pressung verringert sich mit zunehmender Zähnezahl, da das zu übertragende Drehmoment auf mehr Zähne aufgeteilt werden kann. Gleichzeitig wird aber aufgrund der zunehmenden Zahnsteifigkeit die Lastverteilung ungleichmäßiger, wenn man zur deren Charakterisierung den Breitenfaktor k_b heranzieht /4/:

$$k_b = \frac{p_{max}}{p_0}$$

p_{max} : max.Pressung im Kontaktbereich

p_0 : mittlere Pressung im Kontaktbereich

Die prinzipielle Abhängigkeit des Breitenfaktors k_b von der Zähnezahl zeigt **Bild 7**.

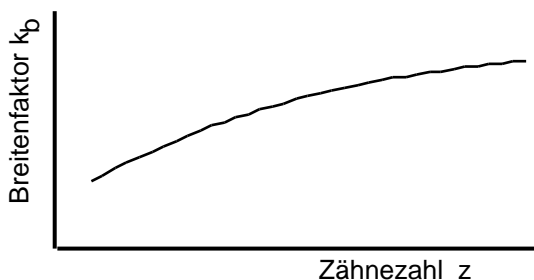


Bild 7: prinzipielle Abhängigkeit des Breitenfaktors von der Zähnezahl

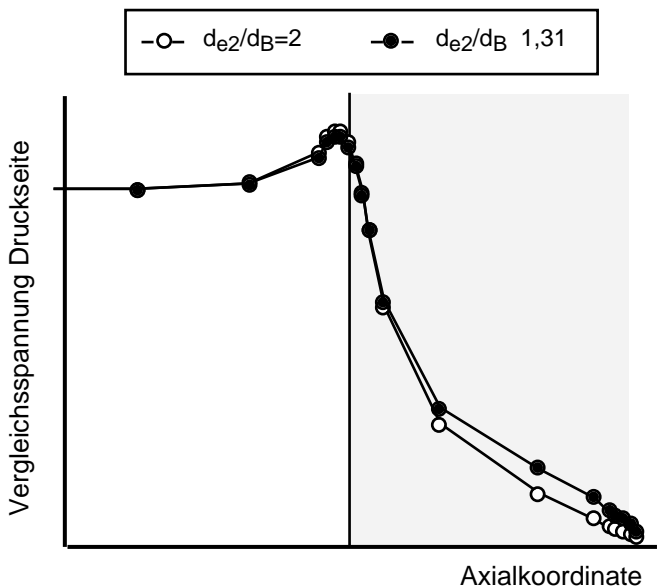
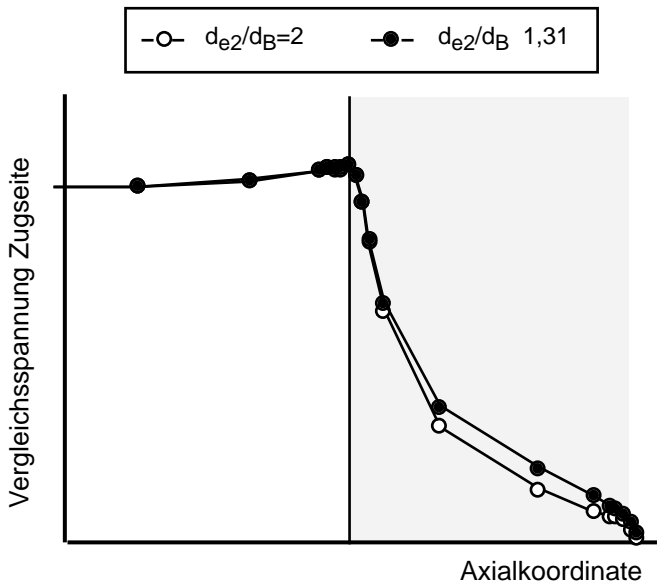
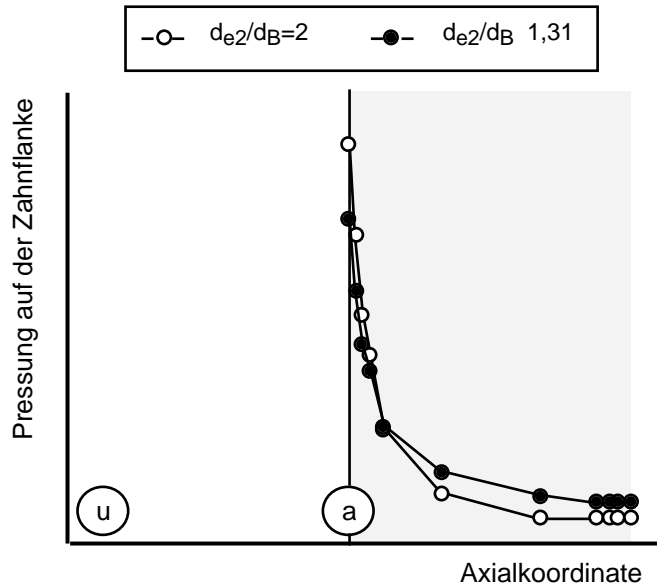


Bild 8: Vergleich der Pressungs- und Zahnfußspannungsverläufe von Zahnwellen-Verbindungen mit unterschiedlichen Nabenaußendurchmessern, DIN 5480, 20 Zähne

3.1.2 Einfluß des Naben-Außendurchmessers

Die derzeitige Berechnungsnorm DIN 5466E /1/ gilt nur für Zahnwellen-Verbindungen mit einem Durchmesser Verhältnis von d_{e2}/d_B 1,5. Ab diesen Verhältnis kann davon ausgegangen werden, das sich die Zahnfußspannung nahezu unabhängig vom Naben-Außendurchmesser verhält, da der Anteil der Nabengrundkörpersteifigkeit an der Gesamtsteifigkeit der Welle-Nabe-Verbindung überwiegt /3,4/. Wird der Naben-Außendurchmesser auf Werte unter $1,5 \cdot d_B$ verringert, so wird die Nabe verformungsweicher gestaltet und die Zahnfußspannung verändert sich entsprechend **Bild 8**. Deutlich ist zu erkennen, daß bei Verbindungen mit $d_{e2} < 1,5 \cdot d_B$ auch Wellenbereiche am Verbindungsende verstärkt in den Tragprozeß mit eingebunden werden. Auf der Druckseite mit den gegenüber der Zugseite höheren Spannungswerten wird eine Reduzierung der maximalen Vergleichspannung erreicht. Das beschriebene Verhalten ist bei Verbindungen mit großer Zähnezahl noch stärker ausgeprägt.

Die Verwendung von dünnwandigen Naben bewirkt eine starke Reduzierung des Pressungspeaks am Verbindungsbeginn (a). Infolge der verformungsweicheren Nabe wird die Lastverteilung auf der Zahnflanke gleichmäßiger.

3.1.3 Einfluß der Nabeneinspannung

Das Beanspruchungsverhalten von Zahnwellen-Verbindungen mit dünnwandigen Naben wird neben dem Naben-Außendurchmesser auch noch durch die Nabeneinspannung bestimmt. Als Vergleichsgrundlage dient dabei der Fall der Lasteinleitung über die gesamte Breite (*ges. Breite*) der Nabe, **Bild 9**. Aufgrund des kurzen Kraftflussweges bei der Drehmomenteinleitung über den Verbindungsbeginn (*V.beginn*) wird trotz gleicher Geometrie eine etwas steifere Nabe simuliert. Die Zahnfußbereiche am Verbindungsende unterliegen geringeren Beanspruchungen und die maximale Pressung am Verbindungsbeginn (a) erhöht sich. Ein verformungsweiches Verhalten ergibt sich durch die Lasteinleitung am Verbindungsende (*V.ende*) der Nabe, bei der der Kraftfluß vom Nabenende über die Kontaktzone zum Wellenanfang erfolgt (vgl. **Bild 4**). Die Flankenpressung am Kon-

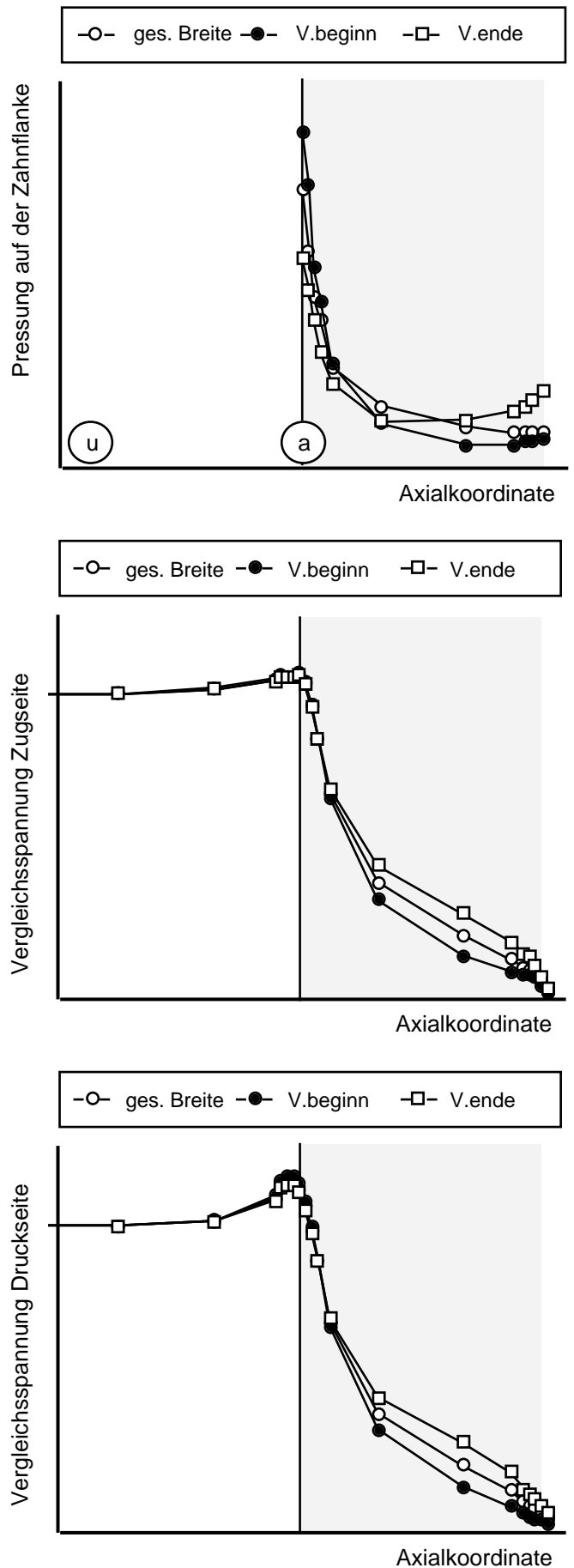


Bild 9: Vergleich der Pressungs- und Zahnfußspannungsverläufe von Zahnwellen-Verbindungen mit unterschiedlichen Lasteinleitungsorten an einer dünnen Nabe (d_{e2}/d_B 1,31), DIN 5480, 20 Zähne

taktende wird erhöht, die Druckspitze am Verbindungsbeginn wird abgebaut. Gegenüber den beiden anderen Lasteinleitungsfällen ergibt sich eine gleichmäßigere Pressungsverteilung. Durch den längeren Kraftflussweg unterliegt auch das Verbindungsende erhöhten Kerbbeanspruchungen.

3.1.4 Einfluß des Zahnüberstands

Die Ausführung der Zahnwellen-Verbindung mit einseitigem Nabenüberstand (*einseitiger NÜ*) und dünnwandiger Nabe, die über das freie Wellenende hinaussteht, führt zu einem deutlich anderen Beanspruchungsverhalten der Welle als bei Verbindungen mit beidseitigem Wellenüberstand (*beidseitiger WÜ*) und Lasteinleitung über die gesamte Verbindungsbreite, **Bild 10**. Ähnlich den Ausführungen zu Zahnwellen mit Lasteinleitung am Verbindungsende dünnwandiger Naben in Kap.3.1.3, verringert sich die maximale Flankenpressung und die Lastverteilung im Kontaktbereich wird gleichmäßiger. Bedingt durch das Überstehen der Nabe über die Welle hinaus erfolgt die Drehmomenteinleitung in die Welle bereits an deren Ende, woraus sich höhere Zahnfußbeanspruchungen auf Zug- und Druckseite am Verbindungsende ergeben.

3.2 Beanspruchung der Nabe

3.2.1 Einfluß der Zähnezahzahl

Die mit ansteigender Zähnezahzahl zunehmende Zahnsteifigkeit bewirkt bei konstanten Drehmoment ein ausgeprägtes Spannungsmaximum am Kontaktbeginn (a) der Nabe, das bei Verbindungen mit geringer bzw. mittlerer Zähnezahzahl nicht feststellbar ist, **Bild 11**. Diese Naben werden im Zahnfußbereich annähernd gleichmäßig beansprucht. Naben, die nicht über die lastfreie Seite der Welle hinausstehen, werden vorrangig auf Zahnbiegung beansprucht. Der Zustand der reinen Torsion kann sich nur bei langen Naben mit Nabenüberstand auf der lastfreien Wellenseite ausbilden /3/.

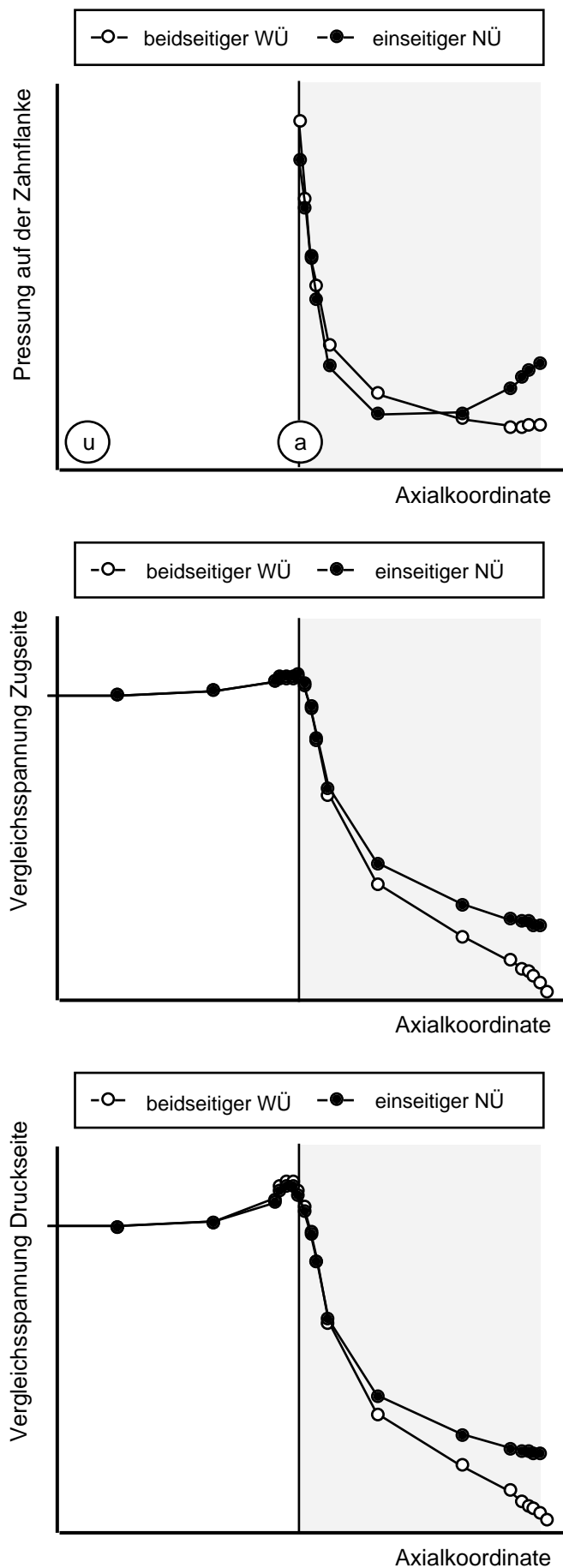


Bild 10: Vergleich der Pressungs- und Zahnfußspannungsverläufe von Zahnwellen-Verbindungen mit unterschiedlichen Zahnüberständen, DIN 5480, 20 Zähne (d_{e2}/d_B 1,31)

3.2.2 Einfluß des Naben-Außendurchmessers

Die Verringerung des Naben-Außendurchmessers bewirkt eine deutliche Erhöhung der Kerbspannung am Verbindungsbeginn (a) (**Bild 12**), da die aus der Nabenaufweitung resultierenden Tangentialspannungen sich auf einen geringeren Querschnitt des Nabengrundkörpers verteilen müssen. Aufgrund des Kraftflusses unterliegt das Verbindungsende (e) der Nabe nur unwesentlich höheren Beanspruchungen.

3.2.3 Einfluß der Nabeneinspannung

Bei Verwendung dünnwandiger Naben sollte nach Möglichkeit des Drehmoment am Verbindungsende (e) der Nabe eingeleitet werden, weil dadurch eine gleichmäßigere Zahnfußbeanspruchung und ein Absenken der maximalen Kerbspannung erreicht wird, **Bild 13**. Die Wahrscheinlichkeit des Aufplatzens einer dünnwandigen Nabe ist für den Fall der Lasteinleitung am Kontaktbeginn (a) am größten, da infolge der schroffen Kraftflussumlenkung lokal höhere Beanspruchungen verursacht werden als bei den beiden anderen Lasteinleitungsvarianten.

3.2.4 Einfluß des Zahnüberstands

Bild 14 zeigt die Kerbspannungsverläufe im Nabenfußbereich bei Verbindungen mit unterschiedlichen Zahnüberständen. Erfolgt die Drehmomenteinleitung am Ende der über die lastfreie Wellenseite hinausstehenden Nabe, so kann die Vergleichsspannung am Verbindungsbeginn (a) gegenüber einer nichtüberstehenden Nabe (Lasteinleitung über die gesamte Verbindungsbreite) erheblich reduziert werden. Infolge der veränderten Steifigkeitsverhältnisse tritt nun ein Steifigkeitssprung am Verbindungsende (e) auf, der sich durch den Anstieg der Kerbspannung äußert. Trotz dieser Tatsache wird eine gleichmäßigere Fußbeanspruchung erzielt. In genügend weiter Entfernung von der Verbindung ist der Einfluß der Naben-zahnbiegung abgeklungen und der Zustand der reinen Torsion kann sich in der Nabe ausbilden.

4 Ausblick

Die derzeit gültige Berechnungsnorm zur Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbin-

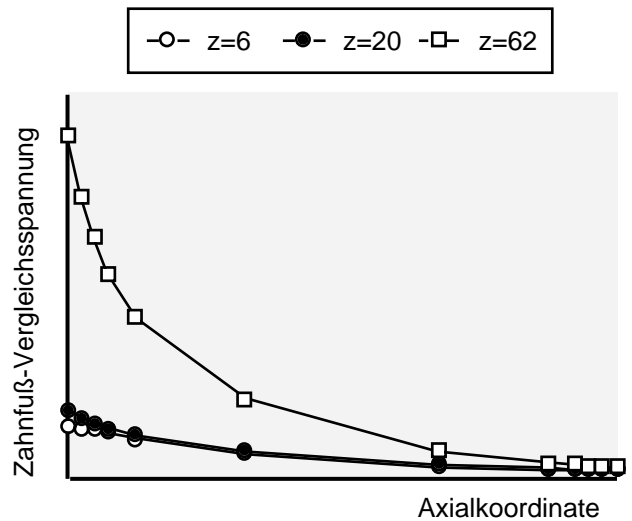


Bild 11: Vergleich der Zahnfußspannungsverläufe von Zahnradnaben mit unterschiedlicher Zähnezahl, ($d_{e2}/d_B=2$), DIN 5480

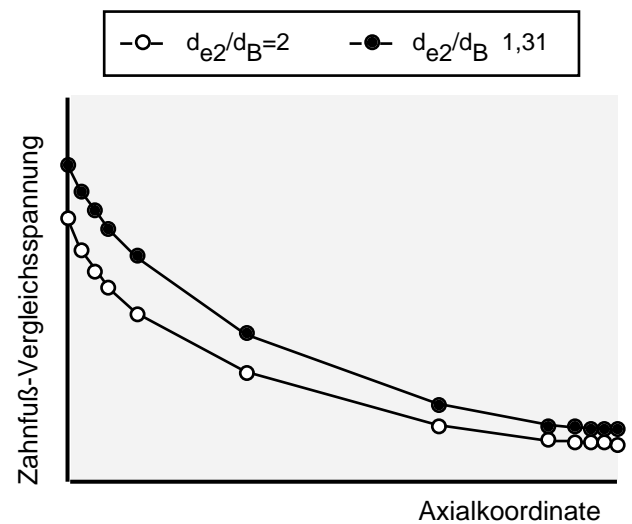


Bild 12: Vergleich der Zahnfußspannungsverläufe von Zahnradnaben mit unterschiedlichen Naben-Außendurchmessern, DIN 5480, 20 Zähne

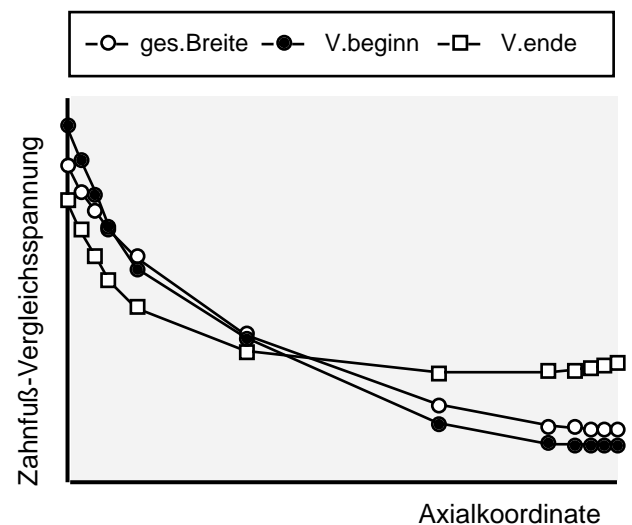


Bild 13: Vergleich der Zahnfußspannungsverläufe von Zahnradnaben mit unterschiedlichen Lasteinleitungs-orten an einer dünnen Nabe, DIN 5480, 20 Zähne ($d_{e2}/d_B=1,31$)

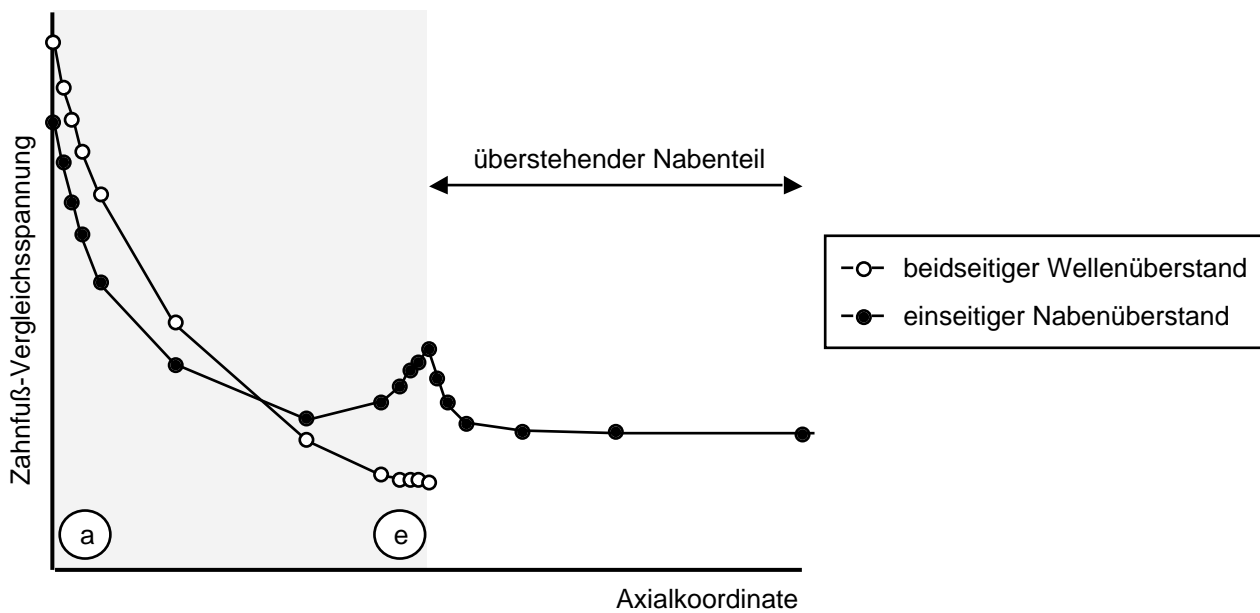


Bild 14: Vergleich der Naben Zahnfußspannungsverläufe von Zahnwellen-Verbindungen mit unterschiedlichen Zahnüberständen (d_{e2}/d_B 1,31), DIN 5480, 20 Zähne,

dungen DIN 5466E gilt nur für ein Durchmesser Verhältnis von d_{e2}/d_B 1,5. Die Untersuchungen zum Einfluß der Nabengeometrie auf das Beanspruchungsverhalten sind ebenso noch nicht abgeschlossen wie die Untersuchungen zum Einfluß von Axialkraft-, Querkraft- und Biegemomenteneinflüssen. Die für einige Geometrieparameter ermittelten hohen Zahnfußbeanspruchungen führen bei gleicher Drehmomentbelastung zu früherer Überschreitung der Werkstoffstreckgrenze und damit zu eher einsetzenden Plastifizierungen. Auch in diesem Bereich laufen derzeit Untersuchungen.

Am Institut für Maschinenwesen ist ein Berechnungsprogramm auf Basis von Microsoft EXCEL[®] erstellt worden, das die Auslegung von Zahnwellen-Verbindungen nach dem gegenwärtigen Erkenntnisstand ermöglicht /5/. Das Tabellenkalkulationsprogramm wird permanent durch neue Untersuchungsergebnisse erweitert.

Literatur

- /1/ DIN 5466E: Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen, Beuth-Verlag, Berlin 1996
- /2/ Wesolowski, K.: Ausnutzung von Symmetrieebenen zur Berechnung drehmomentbeanspruchter Bauteile. Institutsmitteilung Nr. 19, IMW TU Clausthal 1994, ISSN 0947-2274

- /3/ Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung. Dissertation TU Clausthal 1996
- /4/ Garzke, M.: Untersuchungen zum Beanspruchungs- und Pressungsverhalten von Zahnwellen-Verbindungen unter Drehmomentbelastung mit der Finite-Elemente-Methode. Unveröffentlichte Studienarbeit, IMW TU Clausthal 1994
- /5/ Burgtorf, U.: Tabellenkalkulationsprogramm zur Tragfähigkeitsberechnung von Zahnwellen-Verbindungen. Institutsmitteilung Nr. 21, IMW TU Clausthal 1996

Tabellenkalkulationsprogramm zur Tragfähigkeitsberechnung von Zahnwellen-Verbindungen

Burgtorf, U.

Zur Tragfähigkeitsberechnung von Zahnwellen-Verbindungen wurde ein Tabellenkalkulationsprogramm erstellt, das auf DIN 5466E "Tragfähigkeitsberechnungen von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen" basiert. Zur Weiterentwicklung der Norm - insbesondere des geometriespezifischen zweiten Teils für Verzahnungen nach DIN 5480 - werden die Ergebnisse aus dem DFG-Vorhaben Zahnwellenfestigkeit verwendet und in die Berechnung eingearbeitet, so daß die Tabellenkalkulation jeweils den aktuellsten Erkenntnisstand widerspiegelt. Der Artikel gibt einen Überblick über den Programmaufbau und die Berechnungsmöglichkeiten.

A spreadsheet program is developed for calculating the load capacities of involute splines. The calculation method conforms to the german standard DIN 5466E "Splined joints: calculation of load capacity". Results of the ongoing research to develop the second part of this standard, that will set geometric specifications for involute splines according to DIN 5480, will be built into the program, ensuring that the calculation methods continue to meet this developing and advancing standard. This article describes the program structure and its areas of application.

1 Berechnung von Zahnwellen-Verbindungen

Ein Forschungsschwerpunkt am Institut für Maschinenwesen ist die Untersuchung von Zahnwellen-Verbindungen /1-6/. Im Rahmen der Mitarbeit im DIN-Arbeitsausschuß AA 2.7 "Berechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen" wird an der Weiterentwicklung der DIN 5466E "Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen" /9/ gearbeitet. In Teil 1 der Norm, der inzwischen den Status eines Gelbdrucks erreicht hat, sind die grundlegenden, geometrieunabhängigen Berechnungsgleichungen beschrieben. Der zweite Teil enthält die geometriespezifischen Kenngrößen für Zahnwellen-Verbindungen mit Evolventenflanken nach DIN 5480 /10/. Dieser Teil befindet sich in der Entwicklung, da noch nicht alle

Kenngrößen abschließend ermittelt worden sind. Die aus dem DFG-Forschungsvorhaben Di 289 /9-2 "Zahnwellenfestigkeit" resultierenden Ergebnisse werden jeweils aktuell in den zweiten Normteil eingearbeitet.

Der erste Teil von DIN 5466E ist auch für Zahnwellen-Verbindungen mit einer von DIN 5480 abweichenden Zahnform verwendbar. Die zur Berechnung erforderlichen Kenngrößen können jedoch nicht mit Hilfe des zweiten Teils bestimmt werden, da dieser ausschließlich für Verzahnungen nach DIN 5480 gültig ist. Die Kennwerte müssen auf eine andere Art (z.B. mit der Finiten-Elemente-Methode) bestimmt werden.

2 Berechnungsprogramm

Anhand DIN 5466E wurde ein Tabellenkalkulationsprogramm auf Basis von Microsoft EXCEL[®], Version 5.0 erstellt. Die Verwendung dieser weit verbreiteten Programmplattform ermöglicht nahezu jedem PC-Benutzer den Zugang zu diesem Berechnungsprogramm. Aktuelle Erkenntnisse bezüglich der geometriespezifischen Werte werden jeweils eingearbeitet, die Tabellenkalkulation ist somit immer auf dem neuesten Stand der Forschung. Erfahrungswerte aus dem industriellen Einsatz haben gezeigt, daß die berechneten Geometrie Kenngrößen eine sichere Auslegung der Zahnwellen-Verbindungen ermöglichen. Im Zuge weiterer Untersuchungen erfolgt eine Überarbeitung der Kennwerte, so daß eine noch größere Ausnutzung der Verbindungen möglich sein wird.

Obwohl der nur für Verzahnungen nach DIN 5480 gültige zweite Normenteil implementiert wurde, ist die Verwendung des Programms auch für abweichende Zahnformen möglich. Dies läßt sich durch eine Überarbeitung des geometriespezifischen Programmteils oder aber auch durch die manuelle Eingabe anderweitig bestimmter Geometrie Kenngrößen erreichen. Aufgrund der Komplexität des Berechnungsvorgangs und der zu verwendenden Verzahnungsparameter ist die Kenntnis der DIN 5466E zur Anwendung des Pro-

gramms unbedingt erforderlich. Die Berechnungsmöglichkeiten und die Handhabung des Programms werden im folgenden dargestellt.

2.1 Programmaufbau

Das Berechnungsprogramm kann grundsätzlich in drei Blöcke unterteilt werden:

Block 1:

Eingabe der Verzahnungsgeometrie, der Belastungen, der Zentrierart und der Verbindungsform

Block 2:

Berechnung der erforderlichen Kenngrößen und der Beanspruchungen

Block 3:

Ausgabeteil der Beanspruchungen aus Drehmoment, Biegemoment, Querkraft, Fliehkraft ...

Eine abgewandelte Programmversion enthält als vierten Block einen Berechnungs- und Ausgabeteil für Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz. Die Untersuchungen zur Entwicklung dieses Berechnungsabschnittes werden durch das Forschungsvorhaben Nr. 250 "Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz" /6/ der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) gefördert, daher ist dieser Programmteil nur für FVA-Mitgliedsfirmen verfügbar.

Das Programmlayout weist 6 Spalten mit folgendem Inhalt auf (Zeilen mit Überschriften oder Schaltfeldern ausgenommen):

Spalte 1:

Bezeichnung der jeweiligen Variablen

Spalte 2:

für diese Variable verwendetes Kurzzeichen

Spalte 3:

Gleichheitszeichen

Spalte 4:

Zahlenwert oder logischer Wert der jeweiligen Variablen

Spalte 5:

Leerspalte als Abstandhalter

Spalte 6:

Einheit der Variablen

In dem Programm werden einige besonders gekennzeichnete Felder eingesetzt. Dies sind zum einen die in Spalte 4 grundsätzlich grau hinterlegten Eingabefelder. Die Eingabe der Zahlenwerte bzw. der Buch-

staben bei Toleranzen erfolgt von oben nach unten, mit Hilfe der Tabulatortaste kann direkt zum nächsten Eingabefeld gesprungen werden. Einige Eingabefeldern enthalten bereits einen Vorschlag, der übernommen oder überschrieben werden kann. In den restlichen Eingabefeldern steht in der Regel das Variablenkurzzeichen, das durch einen Zahlenwert der entsprechenden, in Spalte 6 angegebenen Einheit ersetzt werden muß.

Zum anderen handelt es sich bei den in Spalte 2 und 4 umrandeten Feldern um Schaltflächen. Mit diesen Feldern ist eine Auswahl (z.B. ja, nein, wälzgefräst, wälzgestoßen usw.) auf die entsprechende Fragestellung aus Spalte 1 möglich. Durch Anklicken der Schaltfelder mit der Maustaste wird ein Makroprogramm aufgerufen, das eine zu dieser Antwort gehörende Zuordnung durchführt. Die gewählte Antwort bzw. die Voreinstellung wird einer darauffolgenden Zeile mit "derzeitige Einstellung" angegeben.

Zur Information werden beim Ausdruck der Programmblätter Dateiname, Datum und Seitenzahlen als Fußnoten angegeben.

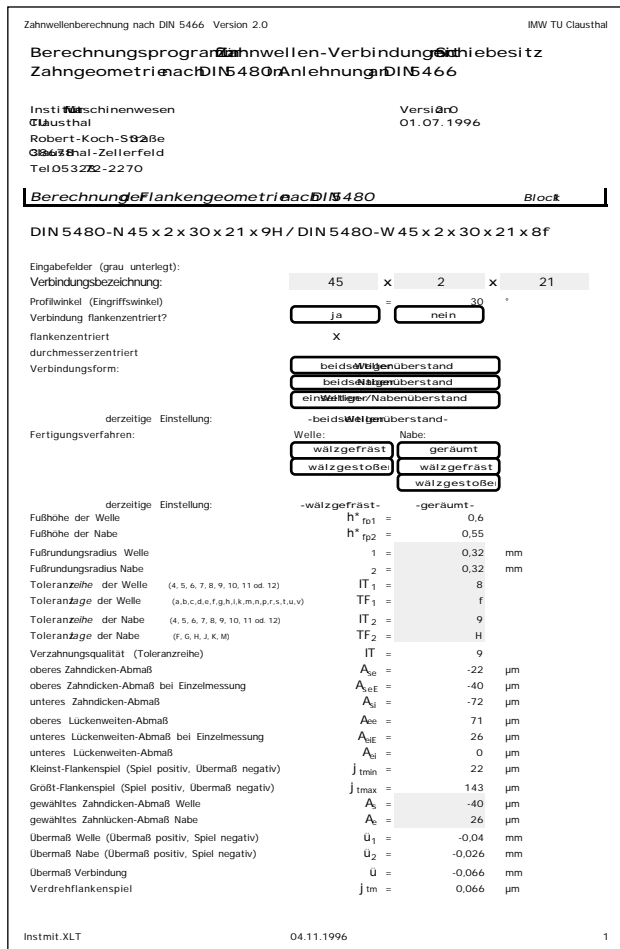


Bild 1: Darstellung eines Ausschnittes aus dem Eingabebereich des Programms

In **Bild 1** und **Bild 2** sind Ausschnitte aus dem Programm am Beispiel einer Zahnwellen-Verbindung DIN 5480 - 45 x 2 x 30 x 21 9H 8f dargestellt. In Bild 1 handelt es sich um den Beginn des Eingabebereiches und in Bild 2 um den Beginn des Ausgabebereiches.

Zahnwellenberechnung nach DIN 5466 Version 2.0		IMW TU Clausthal	
Zahnwellenberechnung nach DIN 5466		Block 2	
DIN 5480-N 45 x 2 x 30 x 21 x 9H / DIN 5480-W 45 x 2 x 30 x 21 x 8f			
Geometrie			
Bezugsdurchmesser	$d_b =$	45	mm
Modul	$m =$	2	mm
Zahnezahl	$z =$	21	
Zahnfußausrundung	$r =$	0,32	mm
Verhältnis Zahnfußausrundung/Modul	$r/m =$	0,16	
Welleninnendurchmesser	$d_{i1} =$	0	mm
Nabenaußendurchmesser	$d_{e2} =$	67,5	mm
Gemeinsame Zahnbreite	$b =$	27	mm
Verzahnungsqualität	$IT =$	9	
Verdrehtflankenspiel	$j_{tm} =$	0,066	mm
Spannungskorrekturfaktor Zugseite	$Y_{1,z} =$	1	
Zahnfußfaktor	$Y_{1,d} =$	1	
Teilungsgesamtabweichung (plastisch)	$F_{\sigma,pl} =$	35,25	μm
Zentrierungsart (Flanke/Durchmesser)			Flanke
Betriebszustand			III
Umfangsfaktor (plastisch)	$k_{\sigma,pl} =$	10,50	
Breitenfaktor (plastisch)	$k_{b,pl} =$	2,83	
Werkstoff			
Werkstoff Welle			
Werkstoff Nabe			
E-Modul Welle	$E_1 =$	210	kN/mm ²
E-Modul Nabe	$E_2 =$	210	kN/mm ²
Ersatz-E-Modul	$E =$	210	kN/mm ²
Reibungskoeffizient	$\mu =$	0,15	
Belastung			
Querkraft	$Q =$	0,01	N
Axialkraft	$F_{ax} =$	0	N
Drehmoment	$T =$	100	Nm
Drehzahl	$n =$	1000	min ⁻¹
Biegemoment am Verbindungsbeginn Welle	$M_{b1,a} =$	0	Nm
Biegemoment im ungestörten Bereich Welle	$M_{b1,u} =$	0	Nm
Biegemoment am Verbindungsende Nabe	$M_{b2,e} =$	0	Nm
Axialkraft zum Verschieben unter Last	$F_{j,ax} =$	824,79	N
Vergleichsspannung Welle			
Zugseite (Verbindungsbeginn)	$v_{1,z,a} =$	80,95	N/mm ²
Druckseite (Verbindungsbeginn)	$v_{1,d,a} =$	67,62	N/mm ²
ungestörter Bereich	$v_{1,u} =$	23,13	N/mm ²
Zulässige Vergleichsspannung Welle	$v_{1,zul} =$		N/mm ²
Vergleichsspannung Nabe			
Verbindungsbeginn	$v_{2,a} =$	260,50	N/mm ²
Verbindungsende	$v_{2,e} =$	0,00	N/mm ²
Zulässige Vergleichsspannung Nabe	$v_{2,zul} =$		N/mm ²

Bild 2: Darstellung eines Ausschnittes aus dem Ausgabebereich des Programms

2.2 Block 1: Eingabe der Verzahnungsgeometrie und der Belastungen

Außer den Angaben zur Verzahnungsgeometrie, den Toleranzen und Belastungen wird in diesem Bereich die Zentrierart festgelegt (Bild 1). Die Zentrierung beeinflusst die möglichen Betriebszustände und die Lastüberhöhung infolge von Teilungsabweichungen. Mit der Auswahl der Verbindungsform werden die Auswirkungen des Verzahnungsüberstandes auf die Zahnfußbeanspruchungen der Verbindungen berücksichtigt. Je nach Verbindungsform erfolgt die Auswahl verschiedener Berechnungsgleichungen und -faktoren. Durch weitere Schaltfelder ist das Fertigungsverfahren auswählbar mit Auswirkungen auf die Durchmesser der Fußkreise von Welle und Nabe.

2.3 Block 2: Berechnung der erforderlichen Kenngrößen und Beanspruchungen

Aus den eingegebenen Daten werden im zweiten Programmblock die Betriebszustände, die maximalen Belastungen, die geometriespezifischen Kenngrößen, die einzelnen Beanspruchungskomponenten und die resultierenden Beanspruchungen berechnet. Die Reihenfolge der Berechnung und die Einteilung der Abschnitte entspricht der DIN 5466E, Teil 1. In diesem Block gibt es keine Eingabe- oder Schaltfelder, da alle Größen nach DIN 5466E, Teil 2 automatisch berechnet werden können.

2.4 Block 3: Ausgabebereich

Alle wichtigen Berechnungsdaten werden in diesem Bereich geordnet nach charakteristischen Geometrie- und Passungsgrößen der Zahnwellen-Verbindung, nach Werkstoff, Belastung und Beanspruchung ausgegeben (Bild 2). In den Datenblöcken Werkstoff und Beanspruchungen sind zu Kontroll- und Protokollierungszwecken Eingabefelder für die Bezeichnung der Werkstoffe und der zulässigen Beanspruchungen vorgesehen. Diese Eingaben sind optional und haben keinen Einfluß auf die Berechnungsergebnisse.

3 Hinweise zu Forschungsergebnisse am IMW

Die am IMW zum Thema Zahnwellen-Verbindungen durchgeführten Forschungsvorhaben haben bisher zu zahlreichen Erfahrungswerten bzw. Konstruktions- oder Auslegungsregeln geführt, die sich nicht mit einer formelmäßigen Beschreibung nachvollziehen lassen. Daher folgen einige Hinweise zu einzelnen Auswahl- bzw. Berechnungskriterien.

3.1 Qualität und Passung

Die Qualität der Wellen- (Außenverzahnung) und der Nabenverzahnung (Innenverzahnung) wird nach der für Laufverzahnungen aufgestellten Norm 3962 "Toleranzen für Stirnradverzahnungen" /8/ ermittelt, die eine tabellarische bzw. rechnerische Beziehung zwischen der Qualität und der Teilungs-Gesamtabweichung F_p angibt. Welle und Nabe weisen im allgemeinen unterschiedliche Verzahnungsqualitäten auf. Bei der Passung von Welle und Nabe überlagern sich die Verzahnungsabweichungen /1,3/, in erster Näherung

ist die Qualität des schlechteren Partners maßgebend zur Ermittlung der resultierenden Teilungs-Gesamtabweichung der Zahnwellen-Verbindung.

Aus fertigungstechnischen Gründen läßt sich eine Exzentrizität zwischen Wellenachse und Außenverzahnungsachse bzw. Naben- und Innenverzahnungsachse nicht vermeiden. Bei der Vermessung von Zahnwellen-Verbindungen wird in der Regel der Ursprung auf die Achse einer zylindrischen Fläche des Wellen- bzw. Nabenkörpers gelegt. Die gemessene Teilungs-Gesamtabweichung der Zahnwelle bzw. Zahnnahe ist abhängig von diesem Koordinatenursprung, so daß die gemessenen Werte die Exzentrizität e zwischen Verzahnungsachse und Wellen- bzw. Nabenachse beinhalten.

Mittels Fourier-Transformation kann die erste harmonische Schwingung der Einzelabweichungen (Einfluß der Exzentrizität) unterdrückt und die exzenterkorrigierte Teilungs-Gesamtabweichung F_p - e ermittelt werden. Dieser exzenterkorrigierte Wert entspricht der auf die Verzahnungsachse bezogenen Teilungs-Gesamtabweichung. Die Verzahnungsqualität, die aus der exzenterkorrigierten Teilungs-Gesamtabweichung F_p - e ermittelt werden kann, ist im statistischen Mittel um ca. 2 Qualitäten besser als die Qualität der auf die Wellen- bzw. Nabenachse bezogenen Teilungs-Gesamtabweichung F_p /2/.

Bei flankenzentrierten Zahnwellen-Verbindungen erfolgt die Positionierung der Verbindungspartner über die Zentrierkräfte auf der Zahnflanke. Die sich einstellende Exzentrizität zwischen den Verzahnungsachsen wird durch die Verzahnungsabweichungen, die Einbaustellung, die Exzentrizität zwischen der Verzahnungsachse und Wellen- bzw. Nabenachse sowie der Belastung beeinflusst. Da die Ausrichtung dieser Verbindungsart an den Zahnflanken erfolgt, ist bei flankenzentrierten Zahnwellen-Verbindungen die Verzahnungsqualität aus der auf die Verzahnungsachse bezogenen Teilungs-Gesamtabweichung F_p - e zu ermitteln.

Bei durchmesserzentrierten Zahnwellen-Verbindungen laufen Wellen- und Nabenachse nahezu zentrisch. Den Achsen der Verzahnungen wird eine Exzentrizität aufgezwungen, die größer sein kann als die Exzentrizität zwischen der Wellen- bzw. Nabenachse und der Innen- bzw. Außenverzahnung. Sie verursacht in der Regel relativ hohe Zwangskräfte inner-

halb der Verbindung. Bei Durchmesserzentrierung ist daher die Verzahnungsqualität aus der auf die Wellen- bzw. Nabenachse bezogenen Teilungs-Gesamtabweichung F_p zu bestimmen. Für identische Zahnwellen-Verbindungen ist die effektive Teilungs-Gesamtabweichung (-> effektive Qualität) und damit die Lastverteilung bei Flankenzentrierung grundsätzlich besser als bei Durchmesserzentrierung.

Das Berechnungsprogramm ermittelt aus der effektiven Qualität des schlechteren Partners von Welle und Nabe (Eingabefelder Toleranzreihe) die Teilungs-Gesamtabweichung F_p für die Zahnwellen-Verbindung entsprechend der Berechnungsformel nach DIN 3962. Die Teilungs-Gesamtabweichung beeinflusst entscheidend die - durch den Umfangsfaktor k gekennzeichnete - Lastverteilung der Verbindung. Die sich real einstellende Lastverteilung der Verbindung hängt von der Einbaustellung ab und streut statistisch um den berechneten Wert.

Neben der Lastverteilung wird vor allem bei Übergangs- und Preßsitzen das Passungsverhalten einer Zahnwellen-Verbindung entscheidend durch die Verzahnungsabweichungen beeinflusst. Weitere Erläuterungen siehe DIN 5480, Teil 14.

3.2 Einlaufverhalten und Plastifizierung

Zahnflanke

Die Zahnflanken weisen im Lieferzustand vom Herstellungsverfahren abhängige Oberflächenrauigkeiten und Formabweichungen auf. Die Qualität und die damit in Beziehung stehende Teilungs-Gesamtabweichung F_p (siehe 3.1) wird in der Regel für den Lieferzustand angegeben. Beim Zusammenfügen von Welle und Nabe einer Zahnwellen-Verbindung mit Spiel, wird das Anfangs-Drehflankenspiel j_0 durch die erste lastfreie Flankenberührung begrenzt. Durch die Belastungen im Betrieb, kommt es zu einem Einlaufvorgang auf den Zahnflanken, bei dem sich Wellen- und Nabenverzahnung aneinander anpassen. In Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis aus Drehmoment zu Querkraft (Hebelarm $H = T/Q$, siehe /1/) entstehen unterschiedlich stark ausgeprägte Relativbewegungen zwischen den Flanken der Verzahnung, die zur Glättung der Oberflächenrauigkeiten und zum Einläppen der Flanken beitragen. Das Drehflankenspiel der Verbindung nimmt dabei zu, der Einlauf-

vorgang ist jedoch unabhängig vom Betriebszustand nach ca. 1×10^5 Umdrehungen abgeschlossen. Bei Preßsitzen kann eine entsprechende Anpassung bereits durch den Fügevorgang erfolgen.

Im Betrieb können sich die Teilungs-Gesamt- und Einzelabweichungen der Wellen- und Nabenverzahnung und damit deren Qualitäten durch den zunehmenden Flankenverschleiß ständig ändern (verbessern oder verschlechtern), die Größenordnung ist dabei vom Betriebs- und Schmierungszustand abhängig. Bleibt die Zahnwellen-Verbindung immer in der gleichen Einbaustellung, führt der Anpaßvorgang von Außen- und Innenverzahnung während des Einlaufs zu einer effektiven Qualitätssteigerung der gepaarten Verbindung, die in diesem Maße durch eine Vermessung der einzelnen Verzahnungen nicht feststellbar ist. Diese erzielte Qualitätssteigerung bleibt bei überwiegendem Drehmoment ($H > H_{\text{grenz}}$, Betriebszustand III /9/) im weiteren Betrieb erhalten.

Im Berechnungsprogramm kann der Einlaufvorgang mit Hilfe des "Plastifizierungsfaktors Zahnflanke" p_F berücksichtigt werden (Wertebereich 0% p_F 100%). Dieser Faktor beeinflusst den Tragbreitenfaktor $k_{b,pl}$ (Lastverteilung über der Verbindungsbreite) und die effektive Teilungs-Gesamtabweichung $F_{p,pl}$. Die Voreinstellung $p_F = 25\%$ entspricht ungefähr der Verbesserung des Tragverhaltens durch den Einlauf der Verbindung bei spanender Herstellung der Zahnflanken. Aus der effektiven Teilungs-Gesamtabweichung $F_{p,pl}$ wird im Programm die durch den Einlauf verbesserte effektive Qualität der gepaarten Zahnwellen-Verbindung berechnet. Ein Plastifizierungsfaktor von $p_F = 25\%$ bewirkt eine Steigerung dieser Qualität um ca. 2 Stufen. Für umformtechnisch (z.B. Walzen oder Rollen) hergestellte Verzahnungen, sollte zur Simulation des Einlaufs ein geringerer Plastifizierungsfaktor Zahnflanke eingesetzt werden.

Durch eine sehr hohe Belastung, z.B. einen Momentenstoß (seltenes Ereignis), kann es zu plastischen Verformungen auf den Flanken kommen. Auch diese Verformungen lassen sich mit Hilfe des Plastifizierungsfaktors simulieren.

Zahnfußbereich

Die Berechnung der Spannungen im Kerbbereich nach DIN 5466E geht von einer rein elastischen Werk-

stoffbeanspruchung aus. Die maximalen Spannungen in den Kerbbereichen berechnen sich vereinfacht ausgedrückt mit $\sigma_{\text{max}} = k \cdot \sigma_{\text{nenn}}$, wobei k von der Verbindungsgeometrie abhängige Formfaktoren und σ_{nenn} die Nennspannungen der jeweiligen Berechnungsansätze darstellen. Für den Fall elastischen Werkstoffverhaltens sind Nennspannung und die nur in einem lokal sehr eng begrenzten Bereich der Kerbe auftretende Maximalspannung direkt proportional zur Last. Sobald die maximale Spannung die Fließgrenze übersteigt, hat σ_{max} die Proportionalitätsgrenze erreicht. Bei weiterhin proportional zur Last ansteigender Nennspannung σ_{nenn} und teilweise plastischen Verformungen im Kerbbereich muß sich der Formfaktor in der Berechnung verringern. Dieses wird im Berechnungsprogramm durch den "Plastifizierungsfaktor Zahnfuß p " berücksichtigt:

Die Einführung des Plastifizierungsfaktors ist eine dem heutigen, noch unvollständigen Kenntnisstand entsprechende theoretische Definition. Bei rein elastischem Werkstoffverhalten gilt für den Plastifizierungsfaktor $p = 0$ und für den Formfaktor $k_{p,pl} = k$, mit $k =$ Formfaktor der rein elastischen Auslegung. Überschreitet die maximale Kerbspannung die Fließgrenze des Werkstoffs, muß der Formfaktor aufgrund des plastischen Fließens reduziert werden. Der Grenzfall der Berechnung ist bei einem Plastifizierungsfaktor von 1 (Eingabe im Programm $p = 100\%$) erreicht, bei dem für dem Formfaktor $k_{p,pl} = 1$ folgt. In grober Abschätzung ist beim Erreichen von $p = 1$ der Einfluß der Kerbe auf die Spannungsüberhöhung im Zahnfuß nahezu abgeklungen, d.h., der gesamte Kerbbereich ist plastifiziert. Bei einer weiteren Laststeigerung ist bei einem Werkstoff, der genügend große plastische Dehnungen zuläßt, von einer Ausdehnung der plastischen Zone in den Wellengrundkörper auszugehen /2/. Diese Simulation kann mit dem Berechnungsprogramm nicht nachvollzogen werden.

Der hier vorgestellte unvollkommene Berechnungsansatz dient zu einer groben Abschätzung der Beanspruchungen im Kerbbereich, wenn die maximale Spannung die Fließgrenze übersteigt. Vorausgesetzt wird ein Werkstoff, der gutes plastisches Fließvermögen aufweist. Nach den bisherigen Erfahrungen liegt die maximale plastische Dehnung bei ausreichendem Wellenüberstand im Fall $p = 100\%$ im Kerbbereich unter 5%. Als Auslegungskriterium muß daher die größte auftretende plastische Dehnung herangezogen

gen werden, die nicht größer als die zulässige plastische Dehnung des Werkstoffs sein darf. Eine Belastung, die erfaßbare plastische Verformungen hervorruft, kann vom Bauteil jedoch nicht dauerhaft ertragen werden. Eine wechselnde Beanspruchung mit $p = 1$ kann höchstens im Bereich des Low Cycle Fatigue ertragen werden!

Beim Erreichen der Streckgrenze $R_{P0,2}$ weist ein Werkstoff bereits 0,2% plastische Dehnung auf. Unter der Voraussetzung, daß als maximale Spannung im Zahnfuß $\sigma_{\max} = R_{P0,2}$ zugelassen wird, kann eine Zahnwelle unter Berücksichtigung des Werkstoffverhaltens und des plastischen Spannungsabbaus in der Kerbe bei maximal 0,2% plastischer Dehnung ein um ca. 1,5 mal größeres Drehmoment T_{pl} übertragen als elastisch berechnet.

Der im Berechnungsprogramm voreingestellte Wert $p = 25\%$ läßt einen sehr geringen, technisch nicht erfaßbaren, plastischen Spannungsabbau im Zahnfußbereich zu, der nach dem derzeitigen Kenntnisstand bei Fußrundungsradien mit $r = 0,16 \cdot m$ keine Auswirkungen auf die Dauerfestigkeit der Verbindung hat. Für größere Fußausrundungen sollte wegen des geringeren Spannungsgradienten im Kerbbereich der Plastifizierungsfaktor p zur dauerhaftesten Auslegung etwas reduziert werden (Hinweise zur dauerhaftesten Auslegung in /2,9/).

Literatur

- /1/ Dietz, P.: Die Berechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen. Büttelborn, Juli 1978, Selbstverlag des Verfassers
- /2/ Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung, Dissertation TU Clausthal 1996
- /3/ Schäfer, G.: Der Einfluß von Oberflächenbehandlungen auf das Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellen-Verbindungen mit Schiebesitz. Dissertation TU Clausthal 1996
- /4/ Dietz, P.; Wesolowski, K.: DFG-Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Zahnwellenfestigkeit, Di 289 /9-1, IMW TU Clausthal 1994

- /5/ Dietz, P.; Schäfer, G., Wesolowski, K.: Zahnwellenverbindungen - Beanspruchungs- und Verschleißverhalten. Konstruktion, Heft 7/8, Juli/August 1993, S. 227 - 234, Springer Verlag
- /6/ Burgtorf, U.: Untersuchung von Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz bezüglich ihrer Montage- und Betriebseigenschaften. Institutsmitteilung Nr. 20, IMW TU Clausthal 1995
- /7/ Burgtorf, U.; Garzke, M.: Anleitung zum Berechnungsprogramm zur Tragfähigkeitsberechnung von Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5466E, Geometrie nach DIN 5480. IMW TU Clausthal 1996
- /8/ DIN 3962: Toleranzen für Stirnradverzahnungen, Teil 1, Beuth-Verlag, Berlin 1978
- /9/ DIN 5466E: Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen, Teil 1 und 2, Beuth-Verlag, Berlin 1994/1995
- /10/ DIN 5480: Zahnwellen-Verbindungen mit Evolventenflanken, Teil 1 bis 14 Beuth-Verlag, Berlin 1991

Realisierung einer kostengünstigen Positioniersteuerung

Gieleßen, H.

Für eine intermittierend arbeitende Papiertransportvorrichtung wird ein einfach und kostengünstig zu realisierendes Antriebskonzept vorgestellt. Dieses erlaubt eine exakte Positionierung, automatische Arbeitsweise und manuellen Eingriff durch den Bediener.

A concept for a simple and cost efficient mechanism for intermittent paper advancement, allowing precise positioning in both automatic and manual operation modes, is presented.

1 Anforderungen an die Transporteinheit

Eine komplette Papiertransporteinheit, bestehend aus den mechanischen Komponenten und den Komponenten der Steuerung wurde von einem Projektteam des IMW entworfen. Die in einem größeren Gerät integrierte Transporteinheit arbeitet für sich autonom. Die Kommunikation mit dem Hauptgerät besteht lediglich in der Entgegennahme eines Startimpulses und dem Absetzen einer Meldung über die erfolgte Positionierung.

Die Transporteinheit hat die Aufgabe, innerhalb einer möglichst kurzen Zeit das sich im Arbeitsbereich befindende Papier aus diesem heraus zu bewegen und dem Arbeitsprozeß einen neuen Papierabschnitt zur Verfügung zu stellen. Für den automatischen Betrieb ist der Vorgang des Transportierens und Positionierens auf Anforderung ständig fortlaufend zu wieder-

holen. Beim Ausbleiben des Startimpulses bleibt die Transporteinheit in Wartestellung. Die Transportrichtung im automatischen Betrieb ist Vorwärts. Für Korrekturen durch das Bedienpersonal ist ein manueller Rückwärtsbetrieb vorgesehen.

2 Funktionsprinzip

Das zu transportierende Papier wird dem Gerät als Rollenware zugeführt. Der Papiervorrat ist in **Bild 1** als Wickel bezeichnet. Dem Arbeitsprozeß wird das Papier auf einer ebenen Fläche in der Mitte der Transporteinheit zur Verfügung gestellt. Nach Beendigung des Prozesses wird die Papierbahn von Motor 2 um eine Prozeßlänge transportiert und neues Papier in den Arbeitsbereich gebracht. Dieser Transport erfolgt mit hoher Geschwindigkeit, damit der folgende Arbeitsprozeß mit möglichst geringer Wartezeit begonnen werden kann.

Begrenzend für die Beschleunigung sind das Motorträgheitsmoment und das Trägheitsmoment des Antriebsstranges, bestehend aus den Andruckrollen und einem Zahnriementrieb. Der Transportgeschwindigkeit kann der Papierwickel aufgrund seines hohen Trägheitsmomentes nicht unmittelbar folgen. Aus diesem Grunde befindet sich zwischen dem Wickel und der Arbeitsfläche eine Pufferschleufe. Diese stellt ca. die Hälfte der in einem Arbeitsprozeß benötigten Papiermenge zur Verfügung. Wenn der Motor 2 das Pa-

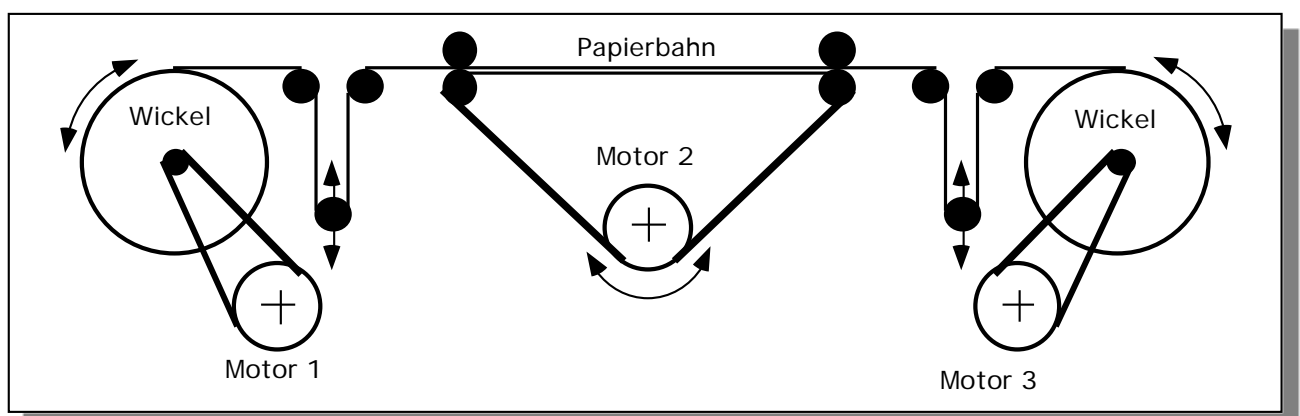


Bild 1: Prinzipskizze des Papierlaufs der Transporteinheit

pier transportiert, entnimmt er es zunächst der Vorratschlaufe. Die Verringerung des Schlaufeninhalts wird detektiert und Motor 3 läuft an, um die Schlaufe wieder zu füllen. Dieser Vorgang wird im automatischen Betrieb nur vom Schlaufenfüllstand gesteuert. Der Vorgang ist so eingestellt, daß während des Transportes die Schlaufe fast geleert wird, bevor der Papierwickel soweit beschleunigt ist, daß ein Gleichgewicht zwischen der in die Schlaufe zulaufenden und der abgezogenen Papiermenge besteht.

Der Vorgang der Papieraufwicklung läuft im Prinzip analog zur Papierabwicklung. Auch hier kann aufgrund des Trägheitsmomentes des Papierwickels die Aufwicklung nicht unmittelbar mit der Papiertransportgeschwindigkeit erfolgen. Eine zweite, mit einem Gewicht belastete, Pufferschlaufe sorgt für eine kontrollierte Zwischenspeicherung des abgelaufenen Papiers. Das gemessene Schlaufenvolumen steuert auch hier die Wickelgeschwindigkeit des Motors 3 der Aufwicklung. Diese Steuerungseinheit arbeitet im automatischen Betrieb autonom und wird ebenfalls nur durch den gemessenen Schlaufeninhalt gesteuert.

3 Steuerung des Papiertransportes

Aus Kostengründen wurden einfache Gleichstromtriebmotoren eingesetzt, wie sie in hohen Stückzahlen am Markt verwendet werden. Durch ein integriertes Schneckengetriebe besitzen sie ein hohes Drehmoment bei immer noch für diesen Zweck ausreichenden Drehzahlen. Gleichstrommotore besitzen eine weiche Kennlinie, wodurch sie für diesen Einsatzzweck ideal geeignet sind. Durch den relativ sanften Anlauf treten übermäßige Stoßbelastungen in der Papierbahn nicht auf. Dadurch, daß ein Rutschen der Antriebswalzen im Moment des Anfahrens nicht auftritt, kann erst die hohe Positioniergenauigkeit erreicht werden und es wird

eine Beschädigung der Papieroberfläche vermieden. Ferner ist keine besondere Anlaufschaltung notwendig, vielmehr kann der Motor direkt mit dem maximalen Motorstrom beschleunigt werden.

Nachteilig gegenüber z.B. Schrittmotoren ist es, daß der zurückgelegte Drehwinkel nicht unmittelbar als Wert bekannt ist und auch nicht aus der Ansteuerung des Motors abgeleitet werden kann. Es ist also ein zusätzlicher Drehgeber erforderlich, um die Istposition zu erhalten.

Die Einfachheit der realisierten Steuerung besteht darin, daß auf eine Regelung im herkömmlichen Sinne verzichtet wurde und stattdessen mit einem simplen Soll-Ist-Vergleich eine präzise Positionierung erreicht wird. Charakteristika der Komponenten des Antriebsstranges, wie die Kennlinie des Motors, das Bremsverhalten des Motors, Trägheitsmomente etc. spielen praktisch keine Rolle. Auf eine aktive Bremsung des Motors wurde ebenso verzichtet.

Der Transportzyklus gliedert sich in zwei Teilabschnitte (**Bild 2**). Im ersten Abschnitt wird ein schneller Transport bis nahe an die Zielposition ausgelöst. Hieran schließt sich ein zweiter Abschnitt an, welcher der Feinpositionierung dient.

Im Bereich der Grobpositionierung wird der Motor zunächst mit der vollen Nennspannung angesteuert.

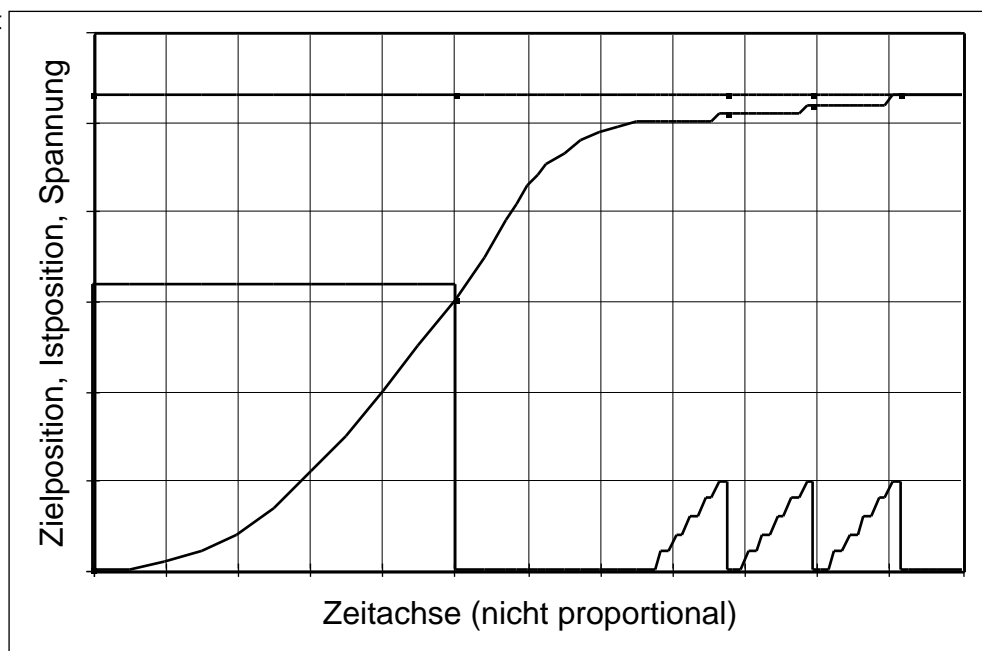


Bild 2: Zeitlicher Verlauf der Motorspannung und der Position

Nach einer bestimmten Zeit, die empirisch ermittelt wurde, wird die Motorspannung abgeschaltet und der

Motor läuft, gebremst von den verschiedenen Reibungsverlusten des Antriebsstranges, aus. Der Abschaltpunkt ist so gelegt, daß der Papiertransport die Zielposition sicher nicht überschreitet. Die exakte Position wird mit einer anschließenden Feinpositionierung erreicht. Die Motorspannung wird stufenweise soweit erhöht, bis über den Drehgeber eine Bewegung erkannt wird. Die Motorspannung wird nun wieder abgeschaltet. Ist die Zielposition noch nicht erreicht, dann wird dieser Vorgang wiederholt (die Zeitachse in Bild 2 ist zur Illustration des Vorganges gedehnt). Es wird eine Positioniergenauigkeit, die der Auflösung des Drehwinkelgebers entspricht, erreicht. Dieses "Mikroschrittverfahren" überträgt den Vorteil einer winkelgenauen Ansteuerung, wie sie von Schrittmotoren her bekannt ist, auf einen Gleichstrommotor. Sobald die vom Antrieb geforderte Leistungsabgabe den Kleinstleistungsbereich überschreitet ist diese Methode wesentlich kostengünstiger als die Realisierung mit Schrittmotoren. Gleichzeitig erlauben Gleichstrommotoren bei hohem Motormoment höhere Drehzahlen als Schrittmotoren.

4 Schaltungstechnik

Alle drei Motoren verfügen über identische Motorsteuerungen, bei denen jeweils Sollwertverarbeitung und Endstufe auf einer Europakarte zusammengefaßt sind. Auf der Fläche einer weiteren Europakarte sind Funktionen zur Verarbeitung von Benutzereingriffen und zur manuellen Richtungsumschaltung realisiert.

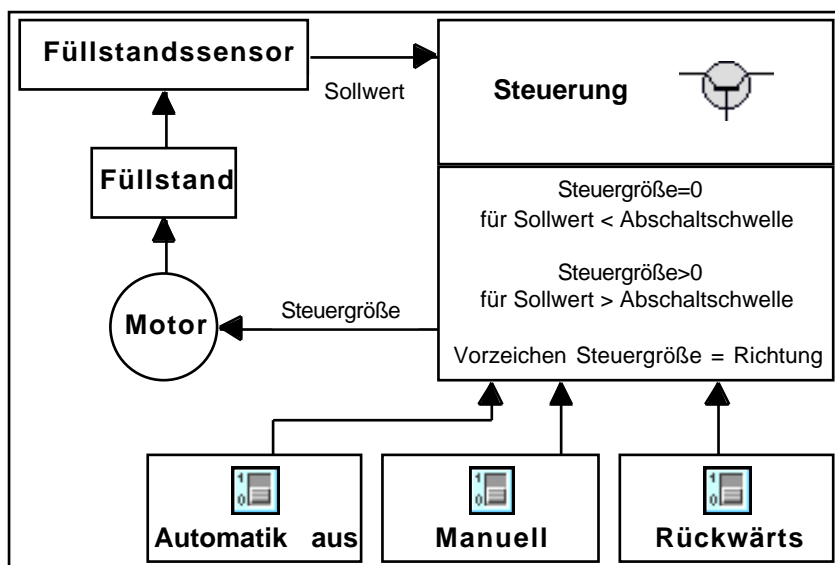


Bild 3: Blockschaubild Schlaufenregelung

4.1 Schlaufenregelung

Die Erfassung des Schlaufenfüllstandes erfolgt durch einen verstellbaren Widerstand. Dieser gibt seinen ohmschen Wert als Sollgröße an die Motorsteuerung (Bild 3), die hieraus eine Steuergröße für den Motor ableitet. Der Rückkopplungszweig arbeitet als negative Rückkopplung, die in einer stabilen Endlage konvergiert. Für die Abwicklung (Motor 3) ist diese Endlage erreicht, wenn die Pufferschlaufe gefüllt ist, für die Aufwicklung (Motor 1) entsprechend, wenn die Pufferschlaufe geleert ist. Das Erreichen der Endlagen wird detektiert, indem der vom Schlaufenfüllstandssensor abgegebene Wert mit einer einstellbaren Abschaltsschwelle verglichen wird. Die Charakteristik des Gesamtsystems ist so beschaffen, daß in der Nähe der Endlagen die Motoren nur noch mit minimaler Geschwindigkeit laufen, so daß ein sanftes Anlaufen und Stoppen erreicht wird.

Für manuelle Eingriffe kann der Bediener die Automatik abschalten. Über eine Bedientafel kann ein Transport in beide Richtungen ausgelöst werden.

4.2 Steuerung des Transportes

Für die Steuerung des Papiertransportes im Arbeitsbereich findet die gleiche Steuerungsbaugruppe Verwendung. Unterschiedlich ist lediglich die (externe) Aufbereitung der Regelgröße (Bild 4). Für die Positionserfassung wird ein 2-kanaliger Drehwinkelgeber eingesetzt, dessen Impulse an einen Steuerrechner

(PC), der in der Anlage mit anderen Steuerungsaufgaben befaßt ist und der Einfachheit halber mitbenutzt wird, geleitet werden. Der PC gibt über 4 I/O-Leitungen einen binären Wert an einen D/A-Wandler aus, der eine analoge Steuerspannung für die Endstufe der Motorsteuerung erzeugt. Die Steuerspannung wird in genau derselben Art in eine Betriebsspannung für den Motor umgesetzt, wie es in der Schlaufenregelung mit dem Signal des Füllstandssensors geschieht. Hierdurch ist es möglich, dieselbe Steuerelektronik für alle drei Motoren zu verwenden.

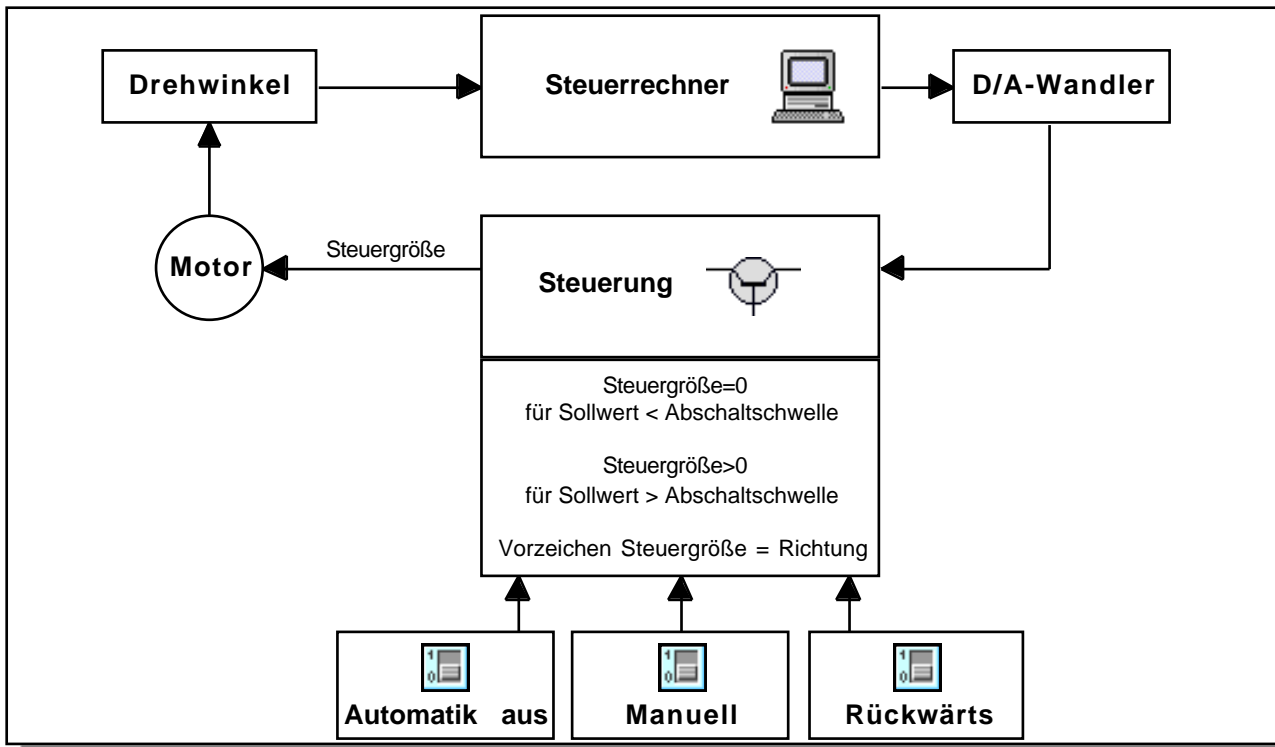


Bild 4: Blockschaltbild Transportsteuerung

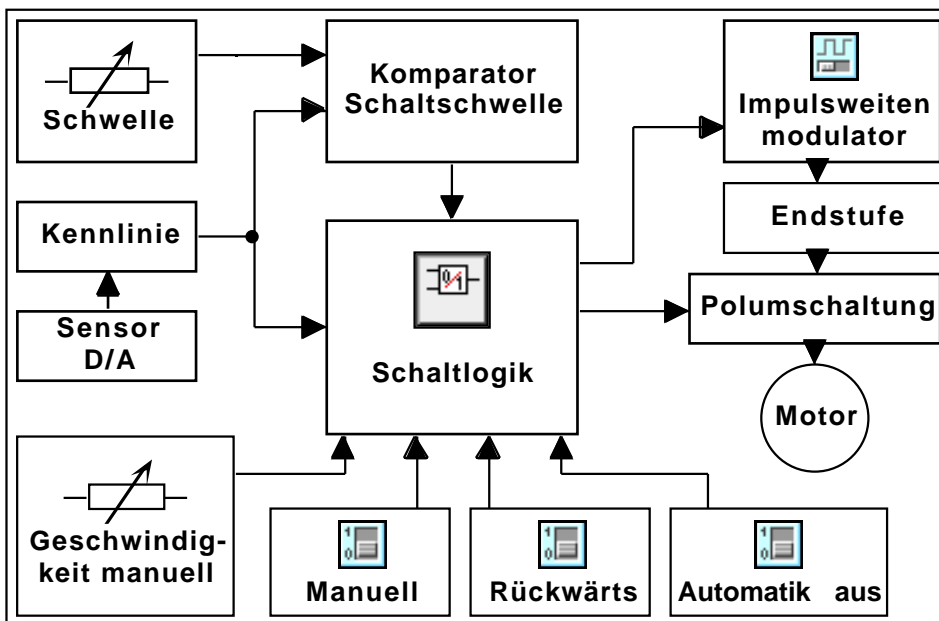


Bild 5: Details der Steuerung

Motor wird über einen Impulsweitenmodulator und eine Endstufe mit einer gepulsten Betriebsspannung versorgt. Die IWM-Schaltung hält die Verlustleistung gering. Eine Schaltlogik, bestehend aus mehreren in Motornähe angebrachten Bedientafeln und einer Logikplatine steuert die Motorsteuerung gemäß der benötigten Funktion an. Eine ebenfalls von der Schaltlogik angesteuerte Polumschaltung (Relais) bewirkt die Richtungsumkehr.

4.3 Details der Steuerung

Der Aufbau der Steuerelektronik inklusive der assoziierten Einheiten zur Verarbeitung von Benutzereingriffen und zur manuellen Richtungsumschaltung ist in **Bild 5** im Überblick dargestellt. Die Kennlinie des Füllstandssensors bzw. die Stufung der analogen Steuerspannung kann gespreizt und verschoben werden. Ein Komparator mit optischem Indikator vergleicht das Signal mit der Schaltschwelle und setzt gegebenenfalls die Ansteuerung des Motors still. Der

5 Fazit

Die Zielvorgabe einer kosteneffizienten, autonomen und schnellen Transportsteuerung für Papierbahnen wurde mit einfachen Mitteln realisiert. Das Konzept hat im Praxiseinsatz seine Zuverlässigkeit nachgewiesen, obwohl es aufgrund der vorgegebenen Restriktionen nicht die technisch optimale Lösung darstellt. Eine Adaption für verschiedene Einsatzgebiete ist einfach und eine Realisierung ist für beliebige Leistungsklassen möglich.

Lebensdauerabschätzung für Zahnwellen-Verbindungen

Schäfer, G.

Die experimentelle und theoretische Untersuchung von Zahnwellen-Verbindungen ist ein Forschungsschwerpunkt des IMW. Neben der Beanspruchungsermittlung werden die Gestaltfestigkeit, der Abrasiv- und der Ermüdungverschleiß betrachtet. In diesem Artikel werden speziell die Einflußfaktoren der Ermüdung diskutiert.

The focus of research at IMW is experimental and theoretical investigation of involute splines. In addition to the stress analysis we test the strength depending on design, fretting wear and repeated stress wear. First of all the parameters of fatigue will be discussed in these minutes.

1 Einleitung

Als Einführung für die theoretischen Untersuchungen sollen hier die drei charakteristischen Verschleißbereiche von Zahnwellen-Verbindungen, **Bild 1**, erläutert werden.

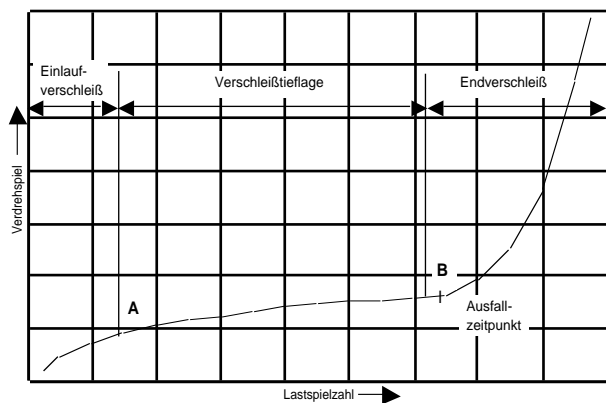


Bild 1: Prinzipieller Verschleißverlauf

Der Einlaufverschleiß stellt die erste Verschleißphase dar, sie reicht vom Laufzeitbeginn zum Punkt A. Diese Phase ist durch mehrere Lastausgleichende Vorgänge gekennzeichnet. Zum einen werden die bei realen spanend hergestellten Zahnwellen-Verbindungen vorhandenen Oberflächenrauigkeiten eingeebnet. Im Fall einer umformtechnisch erzeugten Zahnwelle werden noch die Rauigkeiten auf den üblicherweise nur spanend erzeugten Nabenflanken geglättet. Dieser plastische Umformvorgang findet zu Beginn des

Einlaufverschleißes statt und wirkt sich lastvergleichsmäßig aus. Die notwendigen plastischen Verformungen sind nach [1] im Bereich bis 10^{-3} mm bei Stahlwerkstoffen grundsätzlich möglich, unabhängig davon, ob sich das Material makroskopisch spröde oder plastisch verhält. D.h. auch bei gehärteten Oberflächen ist dieser Ausgleichvorgang möglich. Durch die anfängliche Punktberührung der Flanken an den Oberflächenspitzen, kommt es zu lokal begrenzten Flächenpressungen in der Größe der Fließspannung des weicheren Flankenwerkstoffes. Während des Einlaufvorganges werden diese Spannungsspitzen durch Fließ- und Abrasionsvorgänge abgebaut. Im klassischen Sinn handelt es sich bei der Einebnung von Oberflächenrauigkeiten nicht um Verschleiß, sondern um eine Formänderung gegenüber dem Einbauzustand. Da die Auswirkungen auf die Zahnwellen-Verbindung als Verbindungselement identisch mit denen eines minimalen Verschleißbetrages sind, wird die Einebnung global wie ein Verschleißbetrag behandelt.

Der zweite lastausgleichende Vorgang in den realen Zahnwellen-Verbindungen ist der Ausgleich von relativen Verzahnungsabweichungen zwischen Wellen- und Nabenverzahnung. Dieser Ausgleich findet durch klassische Adhäsions- und Abrasionsverschleißvorgänge statt. Bei diesen Abweichungen kann es sich z.B. um Teilungsabweichungen oder Flankenlinienabweichungen handeln. Der Ausgleich findet nicht absolut sondern nur relativ statt, da das Gegenstück, Welle oder Nabe, auch mit den Abweichungen eines Serienteils hergestellt ist.

Der dritte lastausgleichende Vorgang innerhalb der Einlaufverschleißphase ist nicht nur auf reale Verzahnungen beschränkt, sondern würde grundsätzlich auch bei idealen, abweichungsfreien Verzahnungen, auftreten. Durch die endliche Breitenausdehnung der Zahnwellen-Verbindungen kommt es an den Verbindungsrändern zu einer Lastüberhöhung, allgemein als Kantentragen bekannt. Diese Lastüberhöhung führt lokal zu erhöhtem Verschleiß und in dessen Fol-

ge zu ebenso lokal begrenztem Absinken der Belastung. Die integrale Belastung der Flanke bleibt dabei konstant, es findet lediglich eine Vergleichmäßigung über der Verbindungsbreite statt.



Bild 2: Flankenoberfläche in der Einlaufverschleißphase

Diese drei Vorgänge innerhalb der Einlaufverschleißphase sind in **Bild 2** gut zu erkennen. Auffällig ist der fast kontaktlose Bereich etwas exzentrisch von der Verzahnungsmitte. Hier sind nur die Oberflächenrauigkeiten weitestgehend eingeebnet. In den sich daran nach beiden Seiten anschließenden glänzenden Bereichen ist es neben einer vollständigen Einebnung der Rauigkeiten auch schon zu geringen Verschleißerscheinungen gekommen, die weiter zu den Verbindungsrändern hin noch zunehmen und dort ihr charakteristisch stumpfes Aussehen haben.

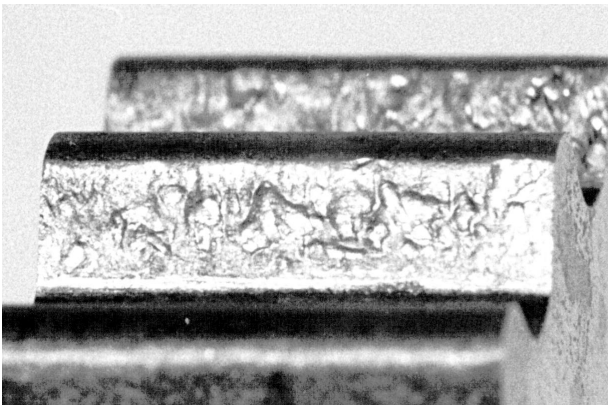


Bild 3: Flankenoberfläche in der Endverschleißphase

2 Einfluß der Ermüdungsfestigkeit

Genauere Untersuchungen dieser stumpfen Bereiche über der Laufzeit ergaben in Übereinstimmung mit /2/, daß unabhängig von der Ausgangsrauhtiefe eine Grenzrauhtiefe erreicht wird. Die dabei entstehenden Oberflächennarben, **Bild 3**, sind Flach und weisen keine scharfen Kerben auf, ihre Kerbwirkung ist daher zu vernachlässigen. Ähnlich wie bei der Untersuchung der Flankenpassungen durch Zapf /3/ ist

für das Reibkorrosionsverhalten auch die Ausgangsrauhtiefe der Flankenoberflächen unbedeutend. Durch die sich einstellende einheitliche Grenzrauhtiefe konnten von /2/ in **Bild 4** keine Unterschiede in den erreichten Reibdauhaltbarkeiten für die beiden Ausgangsrauhtiefen $R_t \ 5 \mu\text{m}$ und $R_t=(23\pm 2)\mu\text{m}$ festgestellt werden.

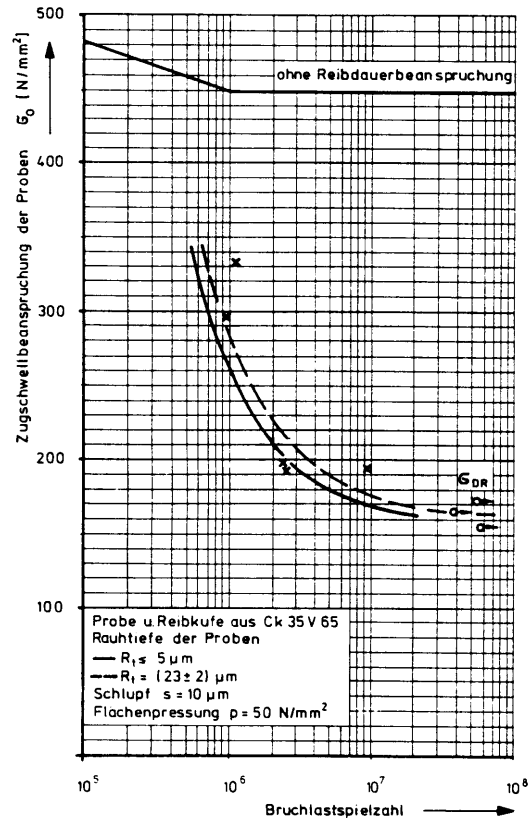


Bild 4: Rauhtiefeneinfluß auf die Reibdauhaltbarkeit/2/

Als Ergebnis dieser Betrachtungen kann gesagt werden, daß die wirtschaftlicher zu produzierenden Zahnwellen-Verbindungen mit größeren Spielpassungen und Oberflächenrauigkeiten durchaus nicht die technisch minderwertigeren Verbindungen darstellen. In einer Gesamtbewertung können sie z.B. in Verbindung mit einer Ölschmierung sogar die technisch-wirtschaftlich beste Lösung darstellen.

Die Einlaufverschleißphase ist relativ kurz und durch instationäre Lastverhältnisse gekennzeichnet.

Die Verschleißtieflage ist der technisch bedeutsamste Bereich, da er im Regelfall mindestens 50% der Gesamtlebensdauer darstellt. Diese zweite Lebensphase der Zahnwellen-Verbindungen ist durch einen geringen konstanten Verschleiß gekennzeichnet. Es handelt sich fast ausschließlich um Adhäsions- und Abrasionsverschleiß mit entsprechenden Reibrostanteilen. Bei axial bewegten Verbindungen ist der

Verschleiß auch konstant, liegt aber höher und hat einen geringeren Reibrostanteil. Reibkorrosionsvorgänge sind nach [2,3] auf einen Relativverschiebungsbereich bis $50\mu\text{m}$ beschränkt. Ab $20\mu\text{m}$ beginnt der abrasive Verschleiß wirksam zu werden. Dadurch werden Oberflächenbereiche mit Mikroanrissen zunehmend schneller abgetragen, als sich der Mikroanriss ausbreiten kann. Relativverschiebungen im rein elastischen Bereich (etwa $2\mu\text{m}$) rufen keine Reibkorrosion hervor. Der lineare Verschleißanstieg in der Verschleißtieflage erlaubt eine Lebensdauerabschätzung anhand des abgetragenen Verschleißvolumens [4].

Die rechnerische Auslegung einer Zahnwellen-Verbindung erfolgt daher bis zum Ende der Verschleißtieflage sinnvollerweise durch einen Tragfähigkeitsnachweis in Kombination mit einer Lebensdauerabschätzung.

Die letzte Lebensphase der Zahnwellen-Verbindungen stellt der Endverschleiß dar. Er ist durch einen exponentiellen Anstieg der Verschleißkurve gekennzeichnet. Der bestimmende Verschleißmechanismus in dieser Phase ist der Ermüdungverschleiß. Dieser führt zu Anrissen an der Flankenoberfläche und zum Ausbrechen größerer Flankenpartikel. Neben dem Ermüdungverschleiß tritt auch noch abhängig vom ideellen Radius Adhäsions- und Abrasionsverschleiß auf. Rechnerisch ist dieses Zusammenwirken nur näherungsweise erfaßbar. In Anbetracht der nur geringen zeitlichen Ausdehnung der Endverschleißphase und dem Umstand, daß die Zahnwellen-Verbindung wesentliche Funktionen wie Zentrieren und zum Teil auch ihre Tragfähigkeit verloren hat, sind Lebensdauer- und Tragfähigkeitsberechnungsversuche hier verfehlt.

Unbedingt notwendig ist aber die Betrachtung der Ermüdungsfestigkeit für die Berechnung des Übergangspunktes B zwischen Verschleißtieflage und Endverschleiß. Ohne die Festlegung dieses Übergangspunktes kann weder die Gültigkeit der Berechnungen in der Verschleißtieflage abgesichert werden, noch eine maximal erreichbare Lebensdauer angegeben werden. Ausgangspunkt für die Ermüdungsbetrachtungen ist der vorliegende Spannungszustand.

3 Spannungszustand an der Flanke

Allgemein können die in **Bild 5** in Komponenten dargestellten Zahnkräfte an den Zähnen einer reibungsbehafteten Zahnwellen-Verbindung wirken. Bei flan-

kenzentrierten Zahnwellen-Verbindung mit Schiebesitz nach DIN 5480 treten die Kopfzentrierungskräfte F_K und Fußzentrierungskräfte F_f nicht auf. Durch ausreichendes Kopf- und Fußspiel wird dies in der Praxis sichergestellt. Desweiteren treten bei den hier vorlie-

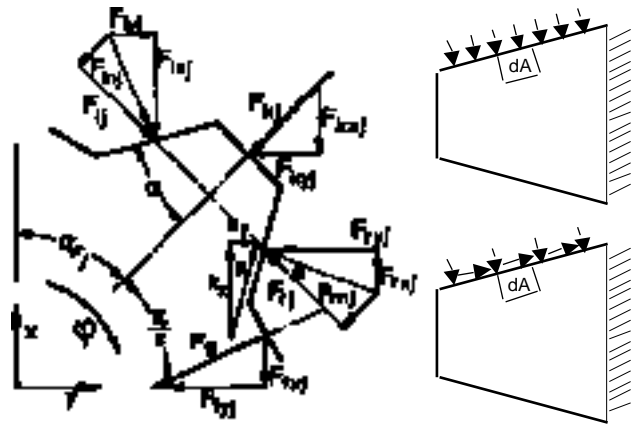


Bild 5: Zahnkraftkomponenten mit Reibung allgemein [5]

genden Verbindungen mit Schiebesitz, d.h. mittleres Verdrehflankenspiel $j_{tm} > 0$, bei überwiegender Drehmomentbeanspruchung nur noch an der der Drehmomentenrichtung zugeordneten Flanke Zahnkräfte F_F auf, d.h. $F_f = 0$. Im Realfall mit Reibung zwischen den Wellen- und Nabenflanken treten Reibungskräfte R an den drehmomentbelasteten Flanken auf.

Für die folgenden Betrachtung wird als Näherung ein ebener Spannungszustand an der Flankenoberfläche in dem Flächenelement dA vorausgesetzt.

- Im ersten Schritt wird eine reine Flankennormalbeanspruchung angenommen, d.h. es treten keine Reibungskräfte an den Flanken auf, **Bild 5** oben. Dieser Grenzfall stellt zunächst eine weitere Vereinfachung dar, die für die ideale (abweichungsfreie) Verbindung unter reiner Drehmomentbelastung gültig ist, und somit auf reale Verbindungen als Grenzwert übertragen werden kann.

Durch die reine Flankennormalbeanspruchung treten ausschließlich Druckspannungen σ_y senkrecht zur Flankenoberfläche auf. Sie sind in der Größe durch die maximale Flankenpressung festgelegt, $\sigma_y = p_{\text{max}}$. Voraussetzungsgemäß sind keine Reibkräfte vorhanden, sodaß weder an der Flankenoberfläche Schubspannungen noch an den übrigen Elementkanten zugeordnete Schubspannungen auftreten,

$$\sigma_x = \sigma_y = 0.$$

Der entsprechende Mohr'sche Spannungskreis ist in **Bild 6** dargestellt. Die maximale Schubspannung tritt unter einem Winkel von $\alpha = 45^\circ$ zur Flankenoberflä-

che auf. Dieser Winkel stellt den oberen Grenzwert für den Schubspannungsfreien Fall dar.

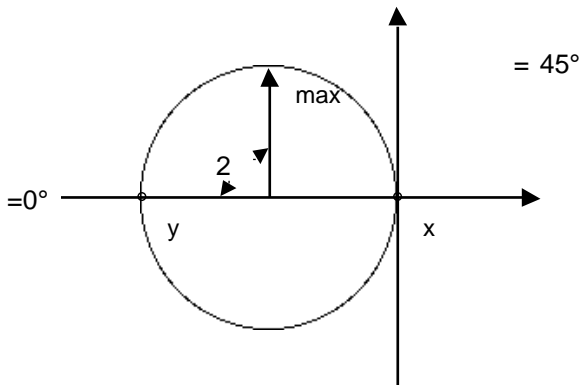


Bild 6: Mohr'scher Spannungskreis ohne Reibung

- Im zweiten Schritt wird zur Erfassung dieser realen Bedingungen zusätzlich eine Flankenreibkraft eingeführt, Bild 5 unten. Unter den oben gemachten Voraussetzungen ohne Axialbewegung soll auch hier von einem ebenen Spannungszustand ausgegangen werden.

Das Flächenelement dA , Bild 5, ist wiederum durch die Druckspannung $y=p_{\max}$ belastet. Zusätzlich tritt im Reibungsfall an der Flankenoberfläche die Schubspannung y_x auf, der über die Gleichgewichtsbedingungen am Flächenelement dA die Schubspannungen x_y und y_x an den übrigen drei Kanten zugeordnet sind. Die Schubspannung y_x kann über die vorliegende Flächenpressung p_{\max} und den Reibungskoeffizienten μ bestimmt werden, gemäß

$$y_{x\max} = p_{\max} \cdot \mu.$$

Diese Formel ist für die Betriebszustände I und II gültig. Die Betriebszustände beschreiben nach DIN 5466 die Belastungskombination aus Drehmoment und Querkraft. Im Betriebszustand III, $R_i > R_{i\text{grenz}}$ ist das Produkt aus Flächenpressung, Fläche und Reibungskoeffizient größer als die angreifende Querkraft. Es treten theoretisch keine Relativbewegungen zwischen Wellen- und Nabenflanken auf und die Schubspannung $y_{x\text{grenz}}$ ist im Betriebszustand III durch die Querkraft Q begrenzt, gemäß:

$$y_{x\text{grenz}} = Q/A$$

Damit gilt für die am Flächenelement dA angreifende Schubspannung y_x

$$0 < y_x < y_{x\max} = p_{\max} \cdot \mu$$

mit der zusätzlichen theoretischen Begrenzung im Betriebszustand III

$$y_x \leq y_{x\text{grenz}} = Q/A$$

In Bild 7 ist ein entsprechender Mohr'scher Spannungskreis mit $y_x > 0$ dargestellt. Die maximale Schubspannung tritt hier unter einem Winkel $0 < \mu < 45^\circ$ auf, abhängig von der Oberflächen-Schubspannung. Je größer die Oberflächen-Schubspannung ist, desto kleiner wird der Winkel μ , d.h. desto flacher verläuft der Riß in der Flankenoberfläche.

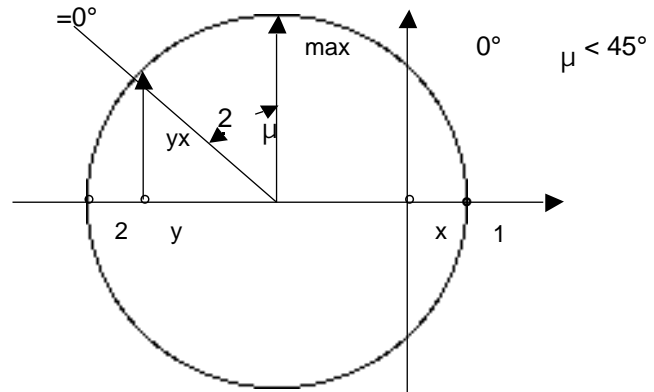


Bild 7: Mohr'scher Spannungskreis mit Reibung

Aus diesen Betrachtungen des reibungsfreien und reibungsbehafteten Flankenkontaktes wird auch deutlich, daß neben der Flächenpressung der Reibungskoeffizient im Kontakt einen erheblichen Einfluß auf die Werkstoffbelastung hat. Eine Verdoppelung des Reibungskoeffizienten bedeutet ca. die 1,5-fache Schubspannungsbelastung.

/2/ und /3/, deren Reibkorrosionsuntersuchungen dem Flankenkontakt bei Zahnwellen-Verbindungen sehr ähnlich sind, haben für die trockene Reibung von Stahl auf Stahl Reibungskoeffizienten von $\mu = 0,7 \pm 0,3$ ermittelt. Fettgeschmierte Paarungen (SHELL Fett IV) lagen ebenso bei $\mu = 0,7$. Günstigere Werte wurden nur mit Öl $\mu = 0,15 \dots 0,3$ und einer relativ dicken zwischengelegten PTFE-Folie $\mu = 0,13$ erreicht.

Literatur

/1/ Funk, W.: Der Einfluß der Reibkorrosion auf die Dauerhaltbarkeit zusammengesetzter Maschinenelemente, Dissertation, TH Darmstadt 1968

/2/ Kreitner, L.: Die Auswirkung von Reibkorrosion und von Reibdauerbeanspruchung auf die Dauerhaltbarkeit zusammengesetzter Maschinenteile, Dissertation, TH Darmstadt 1977

/3/ Julius, A.: Zum Mechanismus des Reibdauerbruchs, Dissertation, TH Darmstadt 1972

/4/ Zapf, R.: Betriebs- und Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen mit Schiebesitz, Dissertation, TU Clausthal 1986

/5/ Dietz, P.: Die Berechnung der Zahn- und Keilwellenverbindungen, Büttelborn 1978, Selbstverlag des Verfassers

Prozeßsimulation und -optimierung am Beispiel der Fertigung von Zahnkantenabdachungen

Heimannsfeld, K.; Schiedeck, N.

Aufgrund der komplexen Prozeßkinematik ist die Konstruktion von fertigen Zahnkantenabdachungen schwierig. In einem ersten Ansatz wurde die Berechnung durch eine CAD-basierte Simulation realisiert. Damit konnte die notwendige Zeit zur Berechnung der Prozeßparameter von mehreren Tagen auf 4-8 Stunden verkürzt werden. Dafür waren bisher ein teures, parametrisches 3D CAD-System und ein erfahrener Konstrukteur nötig. Die Erfahrungen aus der CAD-basierten Simulation wurden zur Entwicklung eines automatisierten Berechnungs- und Optimierungsprogramms genutzt, so daß die Auslegungszeit auf 1 Stunde reduziert werden konnte. Die Arbeiten erfolgten in Kooperation mit der Robert Bosch GmbH in Hildesheim.

Due to the kinematics of the manufacturing process the design of toothed chamfers is a very complex task. In a first approach a CAD-based simulation was used. The design time for the tool parameters were reduced from a few days to 4-8 hours. Unfortunately this requires an expensive parametric 3D CAD-system and an experienced designer. The experience gained from the design of the CAD-simulation was applied to the design of a new fully automatic optimizer. This approach reduced the design time to approx. 1 hour. This research was conducted in cooperation with Robert Bosch GmbH, Hildesheim.

1 Einleitung und Problembeschreibung

An Zahnrädern, die Schaltvorgänge ausführen müssen, werden die Zahnkanten abgedacht. Dabei haben sich je nach Einsatz der Zahnräder unterschiedliche Abdachformen als geeignet erwiesen. Für die Fertigung werden neben umformenden Verfahren auch spanende Verfahren eingesetzt (s. **Bild 1**).

An Starterritzeln befinden sich zwei asymmetrisch angeordnete Abdachungen, die mit einem zweischneidigen Fräs Werkzeug hergestellt werden. Das Verfahren besitzt eine Anzahl von variablen Parametern, z. B.

die Einstellung der Fräserachse im Raum, die Startwinkel von Werkzeug- und Werkstückspindel etc. Weitere variable Parameter besitzt das Werkzeug, an dem die Position der Hauptschneiden variiert werden kann.

Das anwendungstechnische Hauptproblem besteht in der Ermittlung von geeigneten Werten für die genannten Prozeßparameter. Bisher wurde diese Aufgabe mit Hilfe einer CAD-basierten Simulation /1/ gelöst. Damit kann das Fertigungsergebnis bei unterschiedlichen Prozeßeinstellungen simuliert werden. Je nach Geschick und Erfahrung des Anwenders konnte innerhalb eines Zeitrahmens von 4 bis 8 Stunden eine geeignete Einstellung gefunden werden.

Die Robert Bosch GmbH stellt eine sehr hohe Anzahl von unterschiedlichen Starterritzeln her. Viele sind für Nutzfahrzeuge und werden nur in kleiner oder mittlerer Stückzahl hergestellt. Für die Fertigung dieser Teilefamilie sollte ein Softwarewerkzeug entwickelt werden, mit dem die geeigneten Maschinen- und Werkzeugeinstellungen berechnet werden können. Die Berechnung soll vollkommen automatisch ablaufen, eine manuelle Iteration war unter anderem auch aus Zeitgründen nicht akzeptabel. Da im Fertigungsbereich keine CAD-Systeme vorhanden sind, mußte ein eigenständiges Berechnungsprogramm implementiert werden.

2 Prozeßsimulation und -optimierung

Als Lösungskonzept wurde eine Optimierung mit Hilfe eines Simulationsmodells gewählt. Eine analytische Lösungsfindung ist aufgrund der Komplexität der geometrisch-kinematischen Zusammenhänge nicht durchführbar (s. **Bild 2**).

Das Konzept besteht daraus, daß mit einem Startvektor für die Prozeß- bzw. Optimierparameter eine Prozeßsimulation durchgeführt wird. Durch Auswertung bestimmter Optimierkriterien erzeugt ein Optimierungsalgorithmus eine neue, besser geeignete Generation

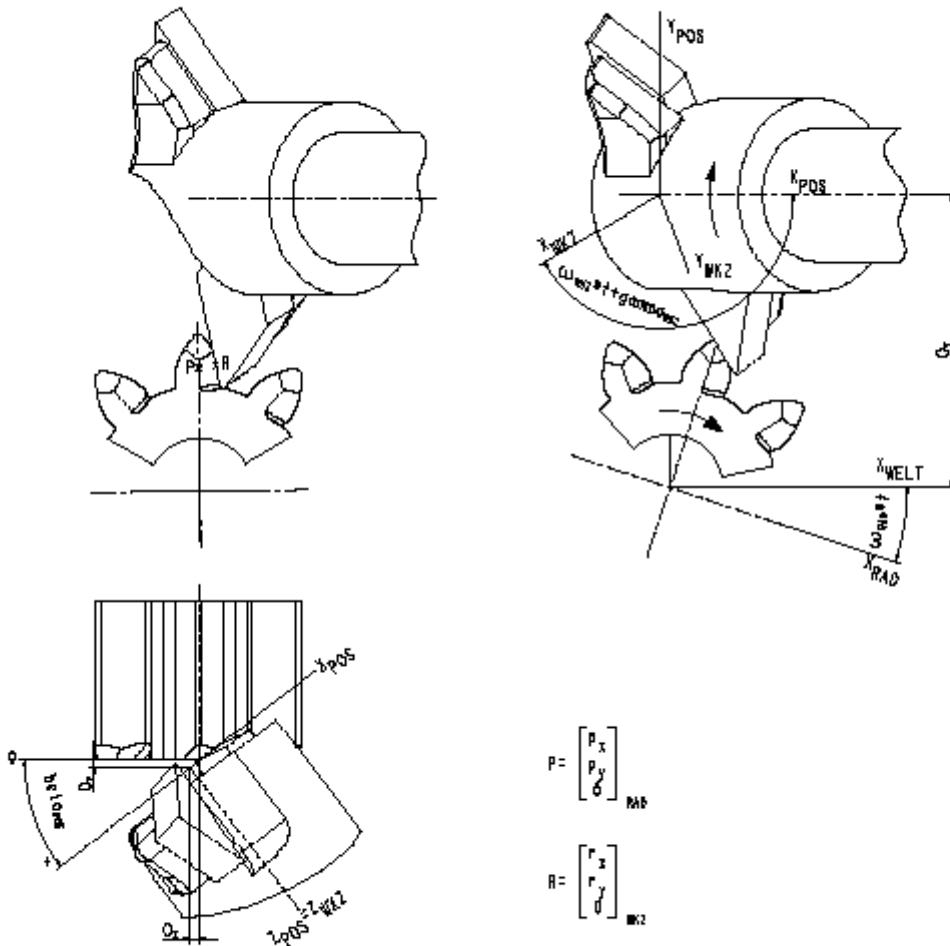


Bild 1: Kinematische Optimierparameter des Zahnkantenabdachprozeß

von Optimierparametern, die zur Simulation genutzt werden. Sind die Sollwerte für die Optimierkriterien innerhalb der definierten Toleranzen, so bricht diese Optimierschleife ab und die jüngste Generation von Prozeßparametern wird als Ergebnis ausgegeben (s. **Bild 3**).

Der Realisierung des Systems ist eine ausführliche

Modellierung und Spezifikation vorangegangen. Zu Projektbeginn wurden für alle relevanten kinematischen Prozeßmerkmale eindeutige Bezeichnungen festgelegt. Großen Aufwand erforderte das Aufstellen und Validieren der Gleichungen für die Gestaltsberechnungen.

Anschließend erfolgte die Festlegung der Optimierkriterien, mit denen das Simulationsergebnis bewertet wird. Sie wurden identisch mit den Gestaltsparametern für die Zahnkantenabdachungen gewählt, die in den Konstruktionszeichnungen vorgegeben sind. Gleichzeitig wurden die (variablen) Optimierparameter ausgewählt. Nach diesen Arbeiten mit mehr vorbereitenden Charakter wurde durch systematische Untersuchungen am Simulationsmodell herausgefunden, welchen Einfluß die (prozeßbezogenen) Optimierparameter auf die (gestaltsbezogenen) Optimierkriterien besitzen. Aufbauend auf

$$\begin{aligned}
 R^h x_{RAD} &= -\sin(t \omega_{RAD}) \left(O_y - l_{Rh} \cos(\gamma_{WKZ} + t \omega_{WKZ} \text{ zeich}) + \right. \\
 &\quad \left. \text{Versatz}_{Rh} \text{ zeich} \sin(\gamma_{WKZ} + t \omega_{WKZ} \text{ zeich}) \right) \\
 &\quad + \cos(t \omega_{RAD}) \left(O_x + \cos\beta_{POS} \right. \\
 &\quad \left. \text{Versatz}_{Rh} \text{ zeich} \cos(\gamma_{WKZ} + t \omega_{WKZ} \text{ zeich}) + \right. \\
 &\quad \left. l_{Rh} \sin(\gamma_{WKZ} + t \omega_{WKZ} \text{ zeich}) \right) \\
 R^h y_{RAD} &= \cos(t \omega_{RAD}) \left(O_y - l_{Rh} \cos(\gamma_{WKZ} + t \omega_{WKZ} \text{ zeich}) + \right. \\
 &\quad \left. \text{Versatz}_{Rh} \text{ zeich} \sin(\gamma_{WKZ} + t \omega_{WKZ} \text{ zeich}) \right) \\
 &\quad + \sin(t \omega_{RAD}) \left(O_x + \cos\beta_{POS} \right. \\
 &\quad \left. \text{Versatz}_{Rh} \text{ zeich} \cos(\gamma_{WKZ} + t \omega_{WKZ} \text{ zeich}) + \right. \\
 &\quad \left. l_{Rh} \sin(\gamma_{WKZ} + t \omega_{WKZ} \text{ zeich}) \right) \\
 R^h z_{RAD} &= O_z + \sin\beta_{POS} \left(\text{Versatz}_{Rh} \text{ zeich} \cos(\gamma_{WKZ} + t \omega_{WKZ} \text{ zeich}) + \right. \\
 &\quad \left. l_{Rh} \sin(\gamma_{WKZ} + t \omega_{WKZ} \text{ zeich}) \right)
 \end{aligned}$$

Bild 2: Koordinatengleichungen der Hüllfläche, die die Rhombusschneide relativ zum Werkzeug beschreibt.

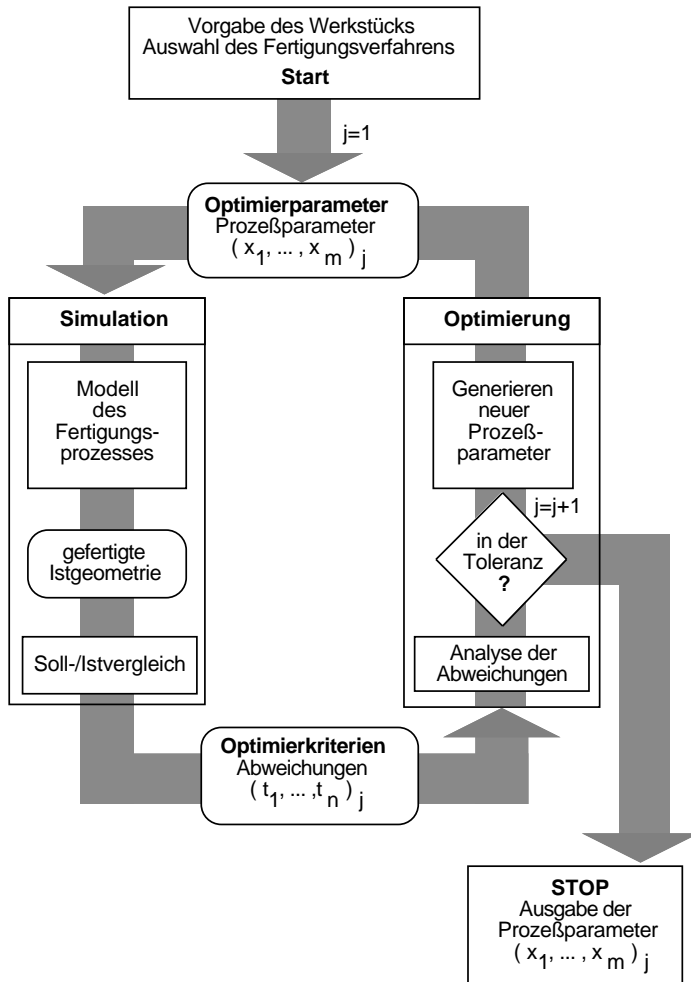


Bild 3: Konzeptioneller Aufbau eines Simulation- und Optimierungssystem

PC lauffähiges Programm. Da die Größe des Projektes aber mit ca. 10000 Zeilen (3/4 Mannjahre) für die Implementierung des Optimierers angesetzt wurde, stellte die Vorgabe von Fortran 77 eine erhebliche Einschränkung der Modularisierbarkeit der Software dar. Eine Softwareentwicklung nach dem heutigen Stand der Technik wäre nicht möglich gewesen. Auch die Implementierung einer komfortablen Benutzerschnittstelle für den Anwender wäre unter Fortran 77 nur bedingt möglich gewesen.

Da für eine teamorientierte Entwicklung von Software unter dem Zielbetriebssystem Windows NT keine geeignete Software zur Verfügung stand, wurde die komplette Programmentwicklung auf den im Institut vorhandenen SUN Solaris Workstations durchgeführt. Die damit notwendige Portabilität verbot natürlich die Nutzung von systemspezifischen Bibliotheken (z.B. QuickWin von Microsoft) zur Implementierung der Benutzerschnittstelle. Deswegen wurde in Absprache mit der Robert Bosch GmbH das in Bild 4 dargestellte Systemkonzept gewählt.

Das Gesamtsystem wird in zwei unabhängige Teilsysteme gegliedert, die mit unterschiedlichen Werkzeugen realisiert werden und über die von den verschiedenen betriebssystemspezifische Mechanismen kommunizieren. Glücklicherweise unterstützt Windows NT ei-

diesen Erkenntnissen konnten Optimierbausteine für die Optimierung jeweils eines Kriteriums entwickelt werden, aus denen sich der Optimieralgorithmus aufbaut. Die vollständige Entwicklung des Optimieralgorithmus erfolgte am bereits realisierten Softwaresystem. Insbesondere die Spezifikation von korrekten Abbruchkriterien interner Iterationsschleifen erforderte eine beachtliche Versuchsphase.

3 Implementierung

Die Hauptanforderung der Robert Bosch GmbH bestand in einer Implementierung in Fortran 77 und ein auf einem Industrie

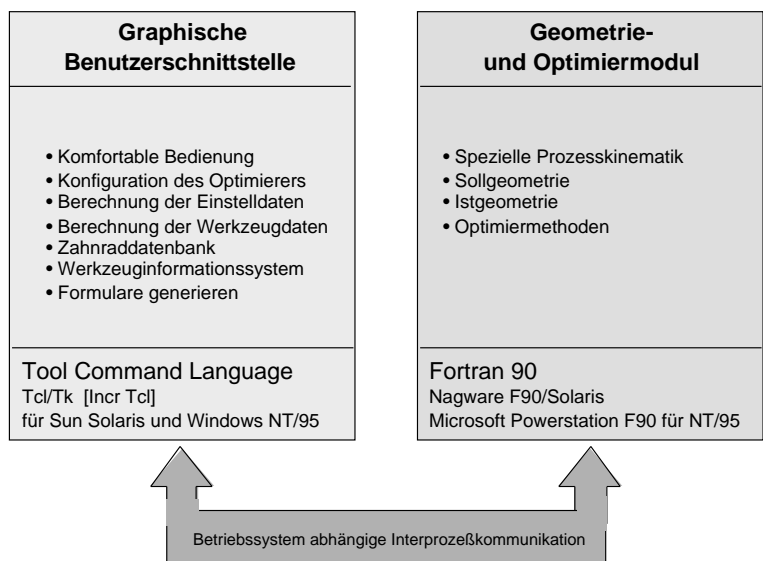


Bild 4: Systemkonzept der Implementierung

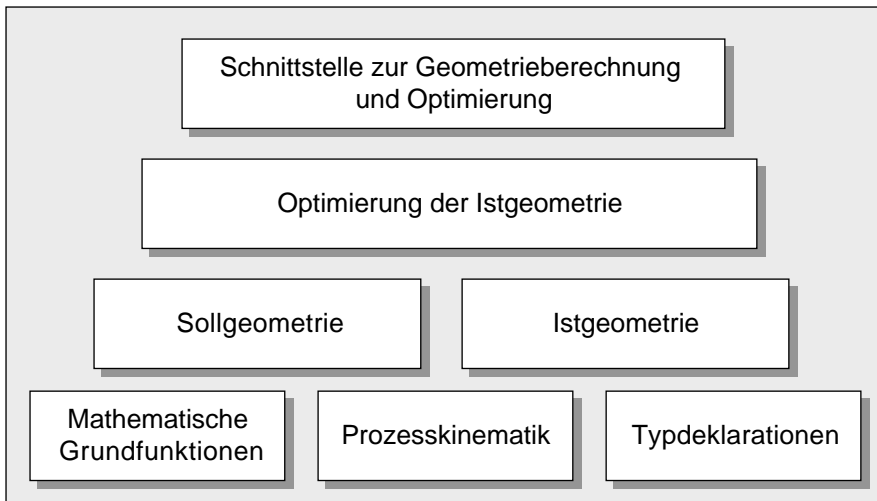


Bild 5: Modulstruktur Optimierer

ne dem UNIX sehr verwandte Prozeßkommunikation, so daß der Portierungsaufwand gering ist.

Durch die Trennung der Benutzerschnittstelle von dem eigentlichen Berechnungs- und Optimieralgorithmus kann jederzeit einer der Teile weiterentwickelt werden, ohne das weitere Veränderungen an dem anderen Programmteil notwendig sind. Dadurch kann zu einem späteren Zeitpunkt z.B. eine Kopplung an ein PPS-System erfolgen, ohne daß der Optimierer geändert werden muss.

3.2 Realisierung des Optimierers

Zur Implementierung des Berechnungs- und Optimiermodul wurde die Programmiersprache Fortran 90 /2,3,5/ gewählt. Fortran 90 erweitert das im wissenschaftlichen Umfeld häufig eingesetzte Fortran 77 um Konzepte zur Strukturierung und Modularisierung. Viele der neue Sprachkonstrukte sind aus den Programmiersprachen C und Modula-2 übernommen worden. Von der Realisierung in der Programmiersprache C wurde wegen der oft verwirrende Zeigerkonstrukte zur Implementierung von Matrixoperationen Abstand genommen.

Bild 5 zeigt die Modulstruktur der Implementierung. Insgesamt entstanden 10 verschiedene Module, die über ihre Schnittstellen eine saubere Trennung der verschiedenen Berechnungsebenen und -funktionen realisieren. Insgesamt umfassen alle Module ungefähr 8000 Programmzeile mit 264 Unterprozeduren und Funktionen.

Die unterste Ebene der Modulstruktur bilden die ma-

thematischen Grundfunktionen, die nicht in den bereits umfangreichen Bibliotheken der Fortran 90 Entwicklungs-umgebung enthalten sind, spezielle Funktionen zur Berechnung der Kinematik bei der Herstellung der Zahnkantenabdachungen und die Datentypdeklarationen. Dabei enthalten die Module zur Datentypdeklaration nicht nur die eigentliche Deklaration von einfachen und zusammengesetzten Datentypen,

sondern auch die Zugriffsfunktionen. Damit wird eine Kapselung aller Datenstrukturen von der eigentlichen Implementierung erreicht.

Ein wesentlicher Anteil der Arbeiten an den mathematischen Grundfunktionen hatte die Entwicklung von stabilen Verfahren zur numerischen Lösung von Gleichungen und von allgemeinen, stabilen Methoden zur ein- und mehrdimensionalen Optimierung. Viele der in der Literatur dokumentierten Verfahren erwiesen sich in diesem Anwendungsfall als instabil und problematisch.

Die zweite Modulschicht ist für die Berechnung der Soll- und Istgeometrien der gefertigten Zahnradabdachungen zuständig. Sie greift über die definierten Schnittstellen auf die Gleichungslösungsverfahren, die definierten Datenstrukturen und die speziellen kinematischen Funktionen zu. Durch die Trennung von Schnittstelle und Implementierung konnten nachträglich notwendig gewordene Änderungen in der Berechnung der Zahnradgeometrie ohne Probleme und ohne Nebeneffekte auf andere Programmteile durchgeführt werden.

Die Funktionen zur Optimierung bilden die dritte Schicht der Implementierung. Unter Benutzung der Differenz der Sollgeometrie und der Istgeometrie berechnet eine anwendungsspezifische Zielfunktion die geometriestimmenden Parameter. Der Versuch einen allgemeinen, mehrdimensionalen Optimierungsalgorithmus zu verwenden ergab nur unbefriedigende Ergebnisse. Dies ist auf die im Zielbereich sehr flache und mit vielen lokalen Extrema versehenen Optimierungsfunktion zurückzuführen.

Die Portierung der Fortran 90 Quellprogramme von dem Entwicklungssystem unter *SUN Solaris Workstations* auf das Zielsystem *Windows NT* mit dem Microsoft Compiler *Fortran PowerStation* erwies sich trotz aller Vorbehalte als unproblematisch. Die einzigen Probleme ergaben sich bei der unterschiedlichen Benennung von systemspezifischen Modulen, die zur Realisierung der Interprozeßkommunikation verwendet wurden.

3.3 Realisierung der Benutzerschnittstelle

Die Realisierung der Benutzerschnittstelle war ursprünglich in Fortran 90 geplant. Da in Fortran 90 die Entwicklung einer einfachen textuellen Oberfläche denselben Aufwand wie die Implementierung einer graphischen Benutzeroberfläche mit spezialisierten Werkzeugen bedeutet, wurde die Programmiersprache Tcl/Tk (Tool Command Language/Toolkit) /4/ ausgewählt. Tcl ist eine interpretierte Programmiersprache, die insbesondere zur schnellen Entwicklung von graphischen Benutzeroberflächen entworfen wurde. Tk ist eine Bibliothek die wichtige Grund-

lemente zusammenfaßt und als Grundlage für komplexere anwendungsspezifische Benutzeroberflächen zur Verfügung stellt.

Tcl/Tk stammt aus dem universitären Umfeld wird heute aber von der Firma Sun Microsystems weiterentwickelt und frei zur Verfügung gestellt. Im Rahmen ihrer Internetaktivitäten wird Tcl/Tk ergänzend zu Java als Internet Scripting Language propagandiert. Mittlerweile existieren sogar sogenannte *Plugins* für Internetbrowser mit denen Tcl/Tk Applikationen innerhalb eines HTML Dokument ausgeführt werden können. Durch die daraus resultierende notwendige Verfügbarkeit ist Tcl/Tk für alle gängigen Computerplattformen erhältlich. Im Rahmen dieses Projektes wurde ferner auch die objektorientierte Erweiterung [incr Tcl] von Tcl/Tk genutzt, um auf die erweiterten Klassenbibliotheken von Fensterelementen zurückzugreifen.

Die Benutzerschnittstelle umfasst ca. 2500 Programmzeile und wurde mit einem Aufwand von ca 1 Mannmonat implementiert. Der erhebliche Zeitun-

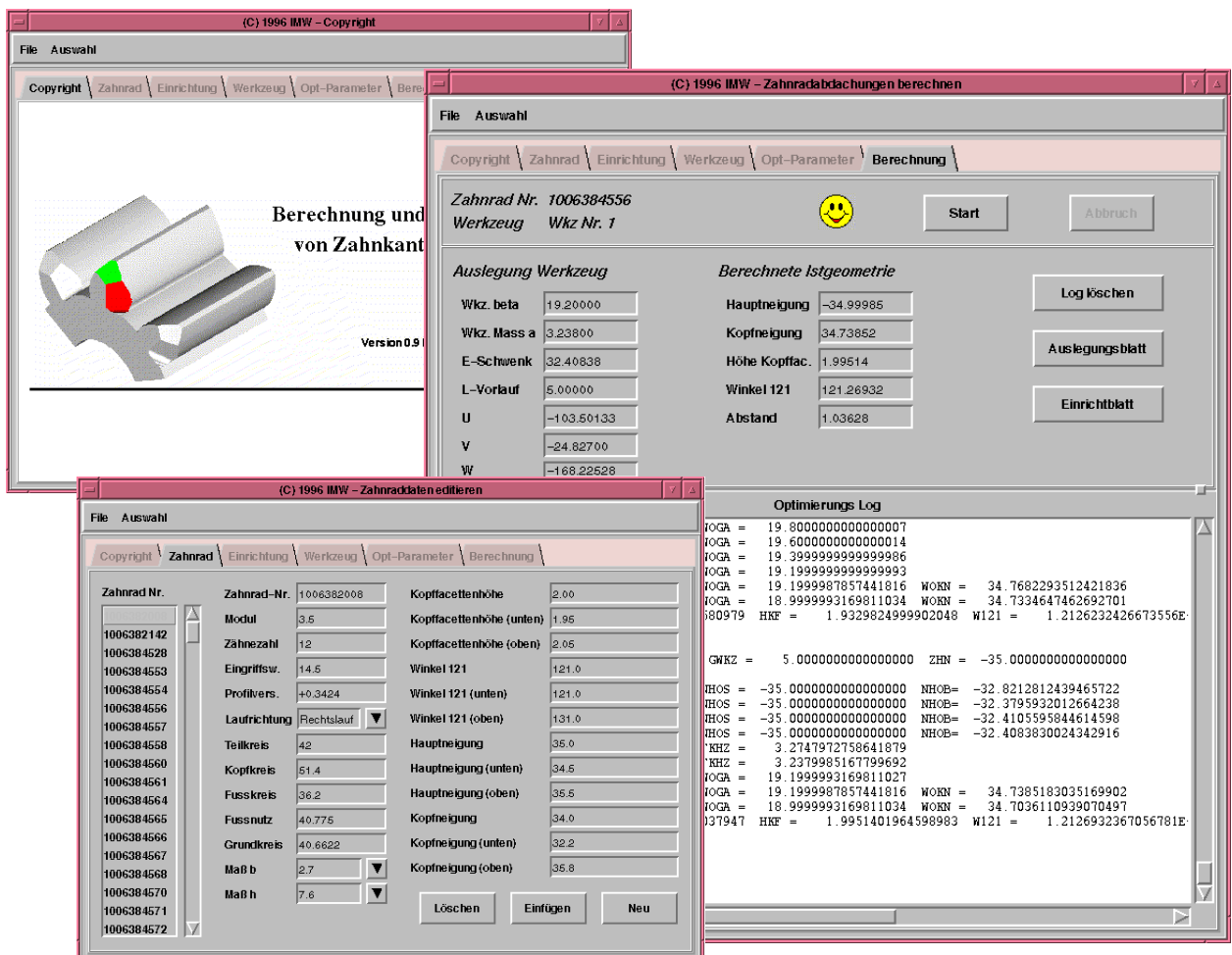


Bild 6: Die graphische Benutzeroberfläche

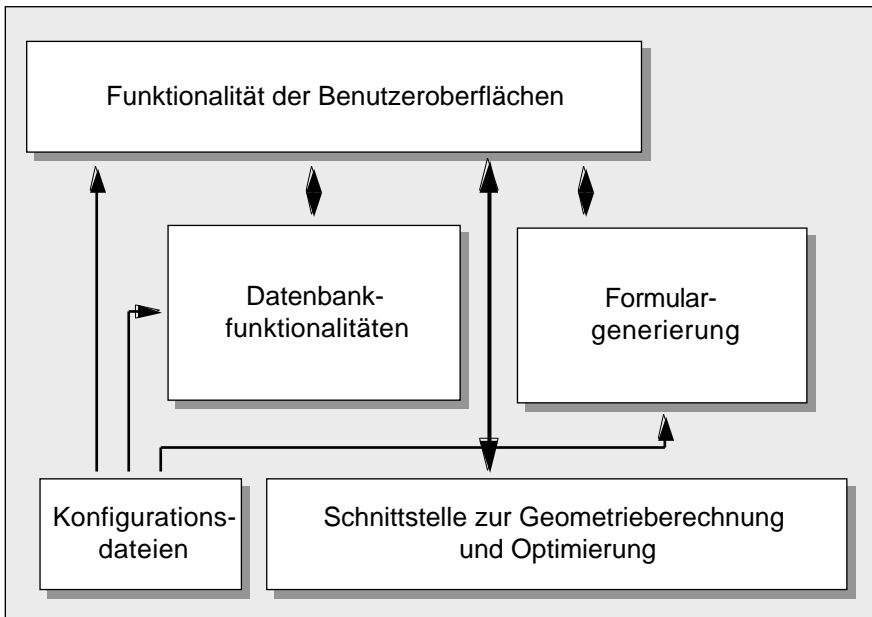


Bild 7: Modulstruktur Benutzeroberfläche

terschied in dem Verhältnis zwischen Zeile/Zeit zwischen den Fortran 90 Modulen und der Benutzerschnittstelle resultieren hauptsächlich aus den oftmals sehr komplexen und dichten mathematischen Quellcode, der einen erheblichen Aufwand bei der Programmierung und der Validierung erfordert. **Bild 6** zeigt die verschiedenen Elemente der graphischen Benutzeroberfläche.

Die Benutzerschnittstelle wurde in vier Teilbereiche gegliedert. **Bild 7** zeigt die Struktur der graphischen Benutzerschnittstelle. Der größte Teil stellt hier bei die eigentliche Realisierung der Bedienungselemente und deren Funktionalität dar. Ungefähr 1000 Zeilen und damit 50% der Programmieraufwandes entfielen auf dieses Modul. Zur Verwaltung der Zahnrad- und der Werkzeugdaten wurde eine einfache Datenbank und die benötigten Zugriffsfunktionen implementiert. Das Datenbankmodul enthält auch alle Funktionen zum Speichern, Laden und Konvertieren von Dateien.

Auf besonderen Wunsch wurde als drittes Modul eine automatische Generierung von Auslegungsformularen für die Fräswerkzeuge und die Einrichtdaten der Werkzeugmaschinen realisiert. Ausgehend von einer Formularkonfigurationsdatei und einer Formulervorlage in der Seitenbeschreibungssprache *Postscript* können die zwei Formulare nach erfolgreichem Abschluß der Optimierung automatisch generiert, angezeigt und ausgedruckt werden. Die In-

halte des Formulars können dabei über die Konfigurationsdatei leicht verändert und angepasst werden.

Das vierte Modul stellt die Verbindung zwischen dem Optimierer und der Benutzeroberfläche her. Dabei wurde eine echte programmtechnische Parallelität realisiert, so daß mit der Datenbank gearbeitet werden kann, während eine Optimierung im Gange ist.

4 Zusammenfassung

Durch die Integration von Simulation und Optimierung konnte erstmals ein vollständig automatisiertes Verfahren zur Auslegung und Berechnung der Prozeßparameter bei der Fertigung von Zahnkantenabdachungen realisiert werden. Dabei hat sich gezeigt, daß ein wesentlicher Punkt bei dem Einsatz von Optimierungsverfahren die Einschränkung des mehrdimensionalen Suchraums d.h. die Verwendung von anwendungsspezifischen Wissen ist. Dies ist insbesondere für die Auswahl eines geeigneten Startpunktes der Optimierung notwendig.

5 Literatur

- /1/ Schiedeck, N.: Zahnkantenabdachungen - Fertigungsgerechte Gestaltung und Prozeßauslegung mit CAD-basierter Simulation. Mitteilungen Nr.20 Institut für Maschinenwesen, 1995
- /2/ Brainerd, W. S. et al.: Fortran 90, Oldenburg (1991)
- /3/ Metcalf, M. & Reid J.: Fortran 90 explained, Oxford University Press (1991)
- /4/ Ousterhout J.K.: Tcl und Tk, Entwicklung grafischer Benutzerschnittstellen, Addison-Wesley (1995)
- /5/ N.N.: Microsoft Fortran 90 Powerstation, Reference Guide, Language Guide (1995)

Konstruieren - Kunst oder Handwerk

Dietz, P.

Fachvortrag des neuen Rektors anlässlich der feierlichen Übergabe des Rektoramts der Technischen Universität Clausthal am 25. Oktober 1996

Paper of the new rector of Technical University of Clausthal on the occasion of the official ceremony of the entrance upon office at 25th of October 1996

Meine Damen und Herren!

Wir können das Thema, ob es sich beim Konstruieren um ein eher künstlerisches oder eher handwerkliches Tätigkeitsfeld handelt, sicherlich in verhältnismäßig kurzer Zeit erschöpfend behandeln, denn die meisten von Ihnen haben ja heimlich schon ihr Häkchen an die richtige Stelle eingetragen (**Bild 1**).

Konstruieren	
<input type="checkbox"/>	Kunst ?
<input type="checkbox"/>	Handwerk ?

Bild 1: Kunst oder Handwerk?

- Die Konstrukteure unter Ihnen selbstverständlich bei "Kunst".
- Die anderen, insbesondere die, die unter den Konstrukteuren zu leiden haben, weil diese sich meist wie verhinderte Künstler gebärden, haben "Handwerk" angekreuzt oder suchen noch nach einem dritten Kästchen.

Beide Ansichten haben etwas für sich. Die in **Bild 2** gezeigte Konstruktion eines Hubschraubers von Leonardo da Vinci ist sicherlich der Ausdruck künstlerischer Schöpfungskraft eines begnadeten Genies. Denken Sie dagegen an das DIN-Blatt Nr. 15 - das ist

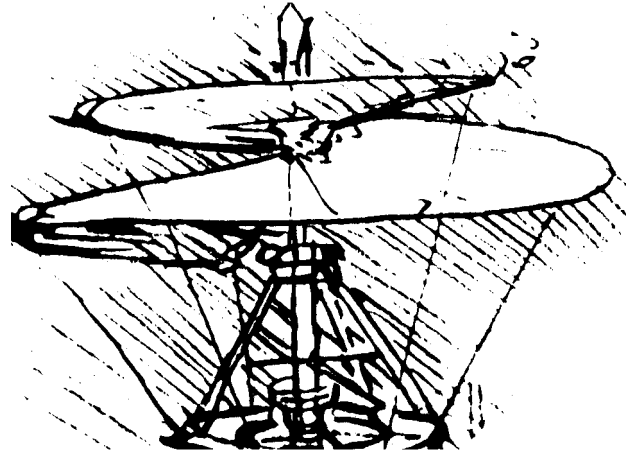


Bild 2: Konstruktionzeichnung eines Hubschraubers (Leonardo da Vinci)

die Norm zur Festlegung der Strichstärken in technischen Zeichnungen - so sind wir meilenweit von jedem schöpferischen Akt entfernt.

In beiden Welten muß aber der Konstrukteur leben. Lassen Sie uns daher der Frage nach dem Konstruktionsprozeß mindestens in Teilbereichen und den Fähigkeiten der Personen, die ihn ausführen, etwas differenzierter nachgehen.

Für uns Hochschullehrer hat die eingangs gestellte Frage eine weitere Bedeutung. Beruht die Fähigkeit zu Konstruieren auf einer angeborenen, individuellen Begabung oder läßt sich das Konstruieren mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden analysieren und verbessern? Nur im zweiten Falle ist Konstruieren auch lehr- und lernbar.

Worin besteht denn nun die Aufgabe des Konstruierens?

Fest steht zunächst, daß der Erfolg eines Unternehmens wesentlich von seinen Produkten abhängt. Handelt es sich dabei um industrielle Produkte, dann wird die Funktionsweise und die Gestaltung meist von Konstrukteuren entworfen. Dies möge zunächst die Wichtigkeit dieser Funktion untermauern.

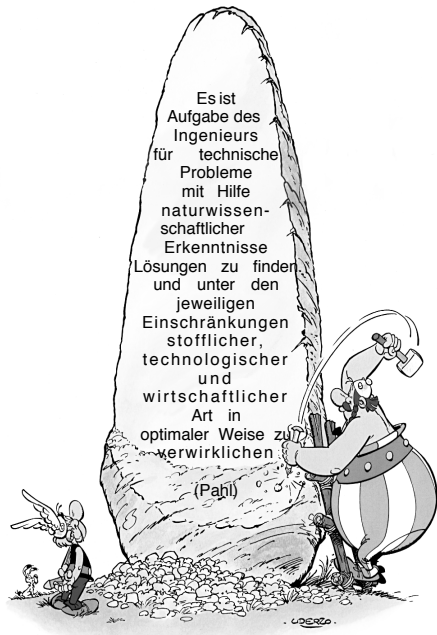


Bild 3: Die Aufgabe des Ingenieurs nach /1/

Fest steht auch, daß das Konstruieren die wohl typischste technische Problemlösung ist, die es gibt. Und hier darf ich einen Merksatz meines verehrten Lehrers, Herrn Prof. Pahl zitieren, der die Aufgabe des Ingenieurs generell beschreibt (**Bild 3**):

Es ist Aufgabe des Ingenieurs für technische Probleme mit Hilfe naturwissenschaftlicher Erkenntnisse Lösungen zu finden und unter den jeweiligen Einschränkungen stofflicher, technologischer und wirtschaftlicher Art in optimaler Weise zu verwirklichen.

Dieser Satz hat zwei Teile, die wir nacheinander betrachten wollen. Zunächst einmal bekommt der Konstrukteur von seinem Vorgesetzten, dem Kunden, der Werbeabteilung oder wem auch immer ein technisches Problem vorgesetzt, daß es gedanklich zu lösen gilt. Hierbei können ihm seine Kenntnisse, die er im Studium oder durch Berufserfahrungen gelernt hat und die ihm in einer freundlichen Wolke entgegen-schweben, helfen. Ergebnis ist ein Konzept, die gedankliche Lösung des Problems, er könnte sich also beispielsweise eine neue Methode zur Zerkleinerung

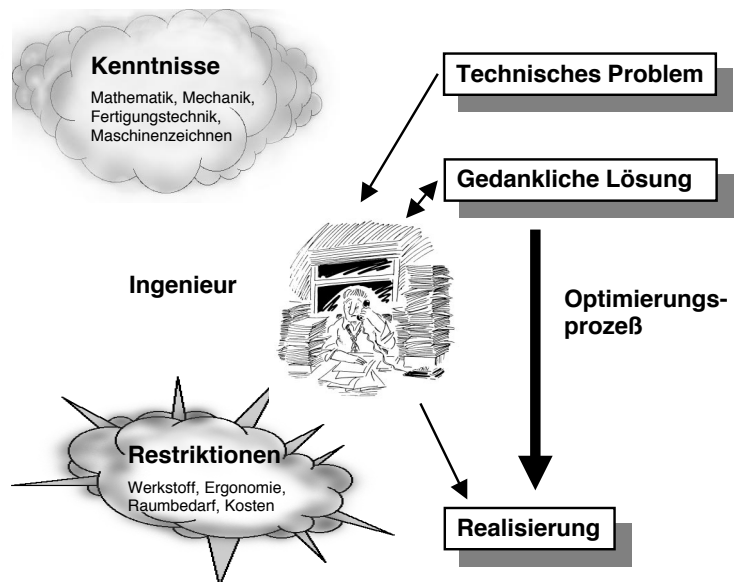


Bild 4: Aufgabe, Konzept und Ausführung

organischer Stoffe ausdenken, weil er die Aufgabe hat, einen neuen Rasenmäher zu konstruieren (**Bild4**).

Damit ist es aber nicht genug, denn jetzt kommt der zweite sehr wesentliche Halbsatz von Prof. Pahl, der die Verwirklichung dieses Gedankens in ein erfolgreich verkaufbares Gerät betrifft, wobei dem Konstrukteur in einer in Bild 4 andeutungsweise gezeigten unfreundlichen Kaltwetterfront Schwierigkeiten entgegenstehen, die er überwinden muß:

Das Gerät darf unter mechanischen Beanspruchungen nicht kaputtgehen, es muß fertigbar, montierbar und handhabungsgerecht konstruiert werden, man darf sich beispielsweise an unserem Rasenmäher nicht verletzen können, er muß leise sein und schließlich muß er preiswerter sein als der Rasenmäher der Konkurrenz.

Diese Problematik macht einen sehr großen Teil der Arbeit des Konstrukteurs aus und wird von ihm auch nicht immer geliebt, hier liegt aber die Wurzel der Produktqualität und damit auch des Unternehmenserfolges.

Zwei Dinge, die mit dem Produktlebenszyklus zu tun haben, begleiten die Arbeit des Konstrukteurs. Das eine ist ein Zeitproblem. **Bild 5** zeigt den typischen

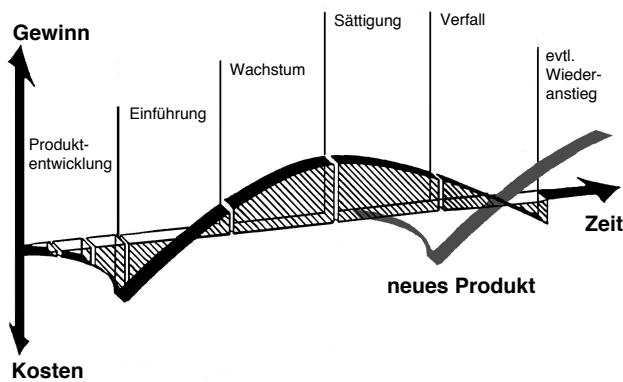


Bild 5: Gewinn über Produktlebensdauer

Gewinnverlauf über der Lebensdauer eines Produktes. Während die Konstruktion zunächst einmal Geld kostet, bevor das Produkt verkauft ist, und damit eine Investition darstellt (die man gering halten möchte) gibt es dann nach einer Einführung eine gewinnträchtige Phase, bevor das Produkt veraltet und ersetzt werden muß.

Um den Gewinn für das Unternehmen zu sichern, muß der Konstrukteur sich ein neues Produkt ausdenken zu einem Zeitpunkt, in dem das Unternehmen gerade mit dem vorhandenen Produkt auf dem Höhepunkt seines Umsatzes ist. Diese Aufgabe ist nicht ganz einfach und der Konstrukteur wird auch hier sehr oft allein gelassen, denn für alle anderen Bereiche des Unternehmens ist das vorhandene Produkt gerade "das beste Produkt der Welt" und man kann sich garnicht vorstellen, daß es jemals veraltet und ersetzt werden muß. Die Lösung dieses Problems wird von den Unternehmen unterschiedlich angegangen.

Das andere Problem ist das Informationsproblem. In **Bild 6** habe ich wieder eine Auftragung über der Produktlebensdauer vorgenommen. Während der Konstrukteur die charakteristischen Eigenschaften eines Produktes wesentlich bestimmt - beispielsweise werden über 70 % der Kosten eines Produktes bereits in der Konstruktion festgelegt - können die Informationen über diese Eigenschaften des Produktes aber erst langsam bei der Fertigung, der Einführung und der Handhabung gewonnen werden. Diese Informationslücke, die den Konstrukteur dazu zwingt Ent-

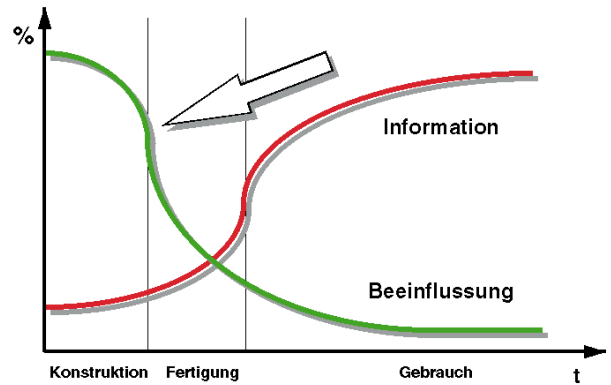


Bild 6: Das "Informationsloch" des Konstrukteurs

scheidungen zu treffen ohne die für diese Entscheidung notwendigen Grundlagen zur Verfügung zu haben, ist meines Erachtens das größte Hindernis bei der Entwicklung neuer Produkte. Sie ist Gegenstand einer Reihe von Forschungsvorhaben gerade an der Technischen Universität Clausthal, die mit Hilfe rechnerunterstützter Methoden bereits an anderen technischen Problemlösungen gewonnene Erfahrung auf die neue Aufgabenstellung projizieren helfen.

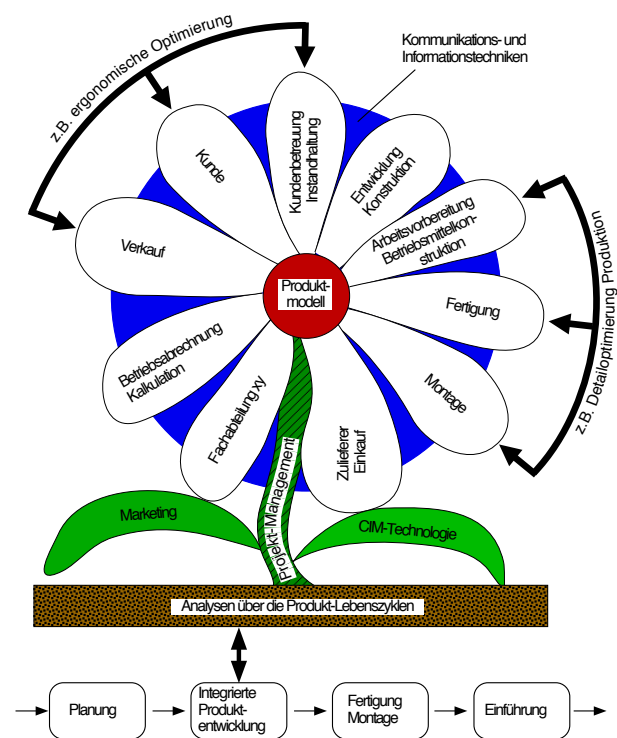


Bild 7: Concurrent Engineering als Gemeinschaftsaufgabe aller Abteilungen

In der Praxis werden unter dem Stichwort "Concurrent engineering" Lösungen für dies Problem angestrebt, in dem das gesammelte Wissen von Erfahrungsträgern für die Entwicklung eines neues Produktes genutzt wird und die Entwicklung als Gemeinschaftsaufgabe für das gesamte Unternehmen angesehen wird (**Bild 7**).

Nach dem wir nun die Aufgabenstellung und das Umfeld zur Konstruktionsarbeit geklärt haben, wollen wir uns dem Vorgang des Konstruierens selbst zuwenden. Hierzu gibt es eine ganze Reihe wissenschaftlicher Untersuchungen, die seit den sechziger Jahren gemeinsam von Konstruktionswissenschaftlern und Arbeitspsychologen angestellt werden, und die sich ganz grob in drei Analysen unterscheiden.

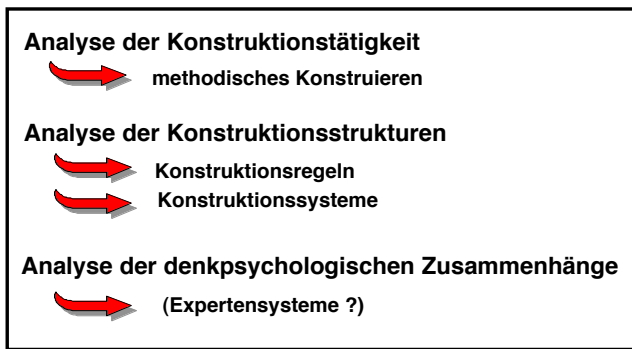


Bild 8: Analysen zur Konstruktionstätigkeit

- Analyse der Konstruktionstätigkeit. Ziel dieser Analyse ist es den Vorgang des Produktentstehungsprozesses in zeitliche oder logische Abschnitte zu unterteilen und für die einzelnen Tätigkeiten innerhalb dieser Abschnitte Methoden zu entwickeln, die das Produkt und den Konstruktionsprozeß optimieren helfen. Ergebnis ist das heute als "Methodisches Konstruieren" bezeichnete Vorgehen, das sich zumindestens im deutschsprachigen Raum durchgesetzt hat und das wir auch unseren Studenten in der Vorlesung vermitteln.
- Analyse von Konstruktionsstrukturen. Grundgedanke dieser Analyse ist, daß hierbei untersucht wird, wie man das meist branchenspezifisch erwor-

bene Wissen um Konstruktionsprobleme und deren Lösungen methodisch so zusammenfassen kann, daß es als allgemeine Konstruktionsregeln formulierbar ist. Das Ergebnis sind Wissensspeicher z.B. zum korrosionsgerechten Konstruieren oder zum Konstruieren von Baustrukturen, die Wärmedehnungen unterworfen sind.

- Analyse der denkpsychologischen Zusammenhänge. Die Frage, was im Kopf des Künstlers oder Handwerkers - noch wissen wir es ja nicht - vor sich geht, ist noch am allerwenigsten gelöst und für uns Ingenieure, die es mehr mit realen und anfaßbaren Problemen zu tun haben, am schwierigsten. Der Hintergedanke dieser Analysen besteht darin, daß man gewisse Tätigkeiten, die Wiederholcharakter haben oder algorithmisch aufgebaut sind, automatisieren und dem Computer übertragen kann.

Für unsere Fragestellung sind besonders die erste und letzte Analyse interessant. Ihre Ergebnisse lassen sich unter anderem in zwei Darstellungen zusammenfassen. **Bild 9** zeigt ein Grobschema des grundsätzlichen Ablaufes einer konstruktiven Entwicklung.

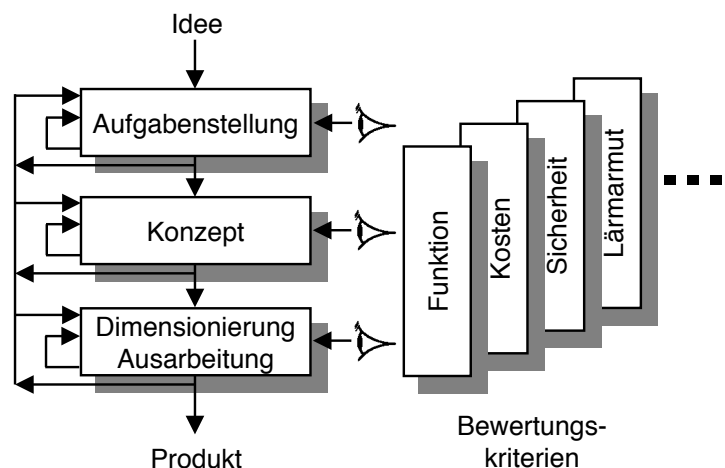


Bild 9: Produktentstehungsprozeß nach VDI 2221 /2/

Man erkennt, daß nach einer grundsätzlich notwendigen Klärung der Aufgabenstellung eine Konzeptphase erfolgt, in der zunächst Wirkprinzipien festgelegt werden. Mit steigendem Wissen über die Funktionsweise, die Kraft- und Leistungsflüsse usw. werden

dann Dimensionierungen vorgenommen, Werkstoffe ausgesucht, Fertigungsbedingungen festgelegt und schließlich Kosten optimiert.

Dabei kann der Fortschritt der Produktentwicklung und der Prozeß selbst aus verschiedenen Sichten beurteilt werden, die sich im wesentlichen aus den zuvor betrachteten Restriktionen ergeben. Kennzeichnend für eine solche Vorgehensweise ist der bewußte Einsatz von Konstruktionsentscheidungen entsprechend dem dabei vorherrschenden Kenntnisstand und die Möglichkeit, mittels rekursiver Schleifen sowohl in den einzelnen Konstruktionsphasen als auch darüber hinaus bewußte und dokumentierbare Veränderungen vorzunehmen.

Die einzelnen Phasen des Vorgehens werden von angepaßten Methoden unterstützt, die Definition von Zwischenzielen und Reihenfolgen erlaubt eine Optimierung des Produktentwicklungsprozesses.

Es fehlt übrigens nicht an Versuchen wirklichkeitsfremder Hochschullehrer dieses Schema mit wissenschaftlicher Akribie zu verfeinern und zu einem Kochrezept für Konstrukteure weiterzuentwickeln, wovon ich nur warnen kann, denn - und jetzt zitiere ich wieder Prof. Pahl - "je ausgefuchster das Schema ist, desto geringer wird die Problemlöseleistung des Konstrukteurs".

Dem gezeigten Schema zum Gesamtablauf ist aber in allen Teilaufgaben und weiteren Vorgehensweisen eine generelle Vorgehensweise überlagert, die sich im folgenden Schema darstellen läßt und die typisch für den Ablauf einer technischen Problemlösung ist (**Bild 10**). Der Klärung und Formulierung des Problems folgt ein Schritt, in dem es nur darum geht, in möglichst kurzer Zeit möglichst viele Lösungen zu finden - ungeachtet ihrer Realisierbarkeit, ihrer Kosten oder weiterer Restriktionen. In einem abschließenden Schritt wird aus dieser Auswahl von Lösungen diejenige herausgesucht, die sich nach einer eingehenden Prüfung aus all den vorher erwähnten Sichten als opti-

male Lösung für die gestellte Aufgabe erweist.

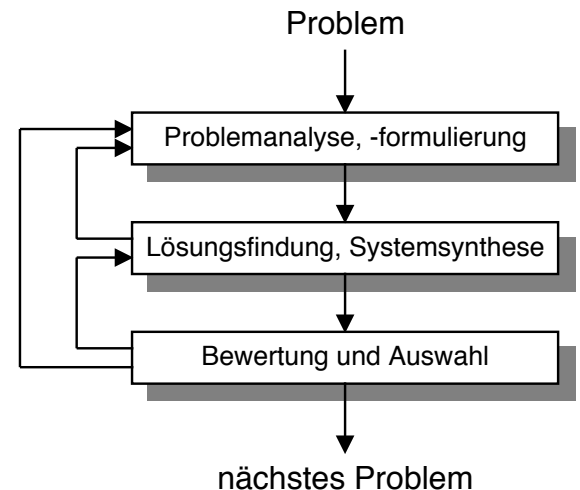


Bild 10: Problemlöseprozeß

Mit diesem zweiten Bild, das die Kerntätigkeiten des Konstruierens charakterisiert, kommen wir unserer eingangs gestellten Frage schon etwas näher. Der letzte Punkt, die Auswahl und Entscheidung, stellt eine Managementtätigkeit dar, die - wie wir gut nachvollziehen können - nichts mit Kunst zu tun hat. Aber schon bei der Analyse der Problemstellung und viel mehr noch bei der Suche nach Lösungen werden Fähigkeiten gefordert, die mit Kreativität, dem Hauptbestandteil jeder künstlerischen Tätigkeit zu tun haben.

Wie ist das mit der Kreativität? Geht das automatisch vor sich? Wird sie bewußt angewandt? Kann sie erlernt werden? Alles dies sind Fragen, mit denen sich die Arbeitspsychologen und der Teil der Konstruktionslehrer beschäftigen, die dem Prozeß der Lösungsfindung weiter auf die Spur kommen wollen. Bis jetzt - zum Glück - ohne viel Erfolg. Kreativität ist - wie der Denkprozeß selbst - individuell verteilt und wird von jedem Menschen unterschiedlich angewendet. Auch die Einteilung in bestimmte Typen von Problemlösern, wie sie in **Bild 11** gezeigt ist, kann nur ganz grob sein und der Übersicht dienen.

Forschungen haben bewiesen, daß Kreativität und Intelligenz nicht unmittelbar in Zusammenhang stehen - was besonders die Nicht-Konstrukteure unter Ihnen trösten soll. Forschungen und Erfahrungen haben

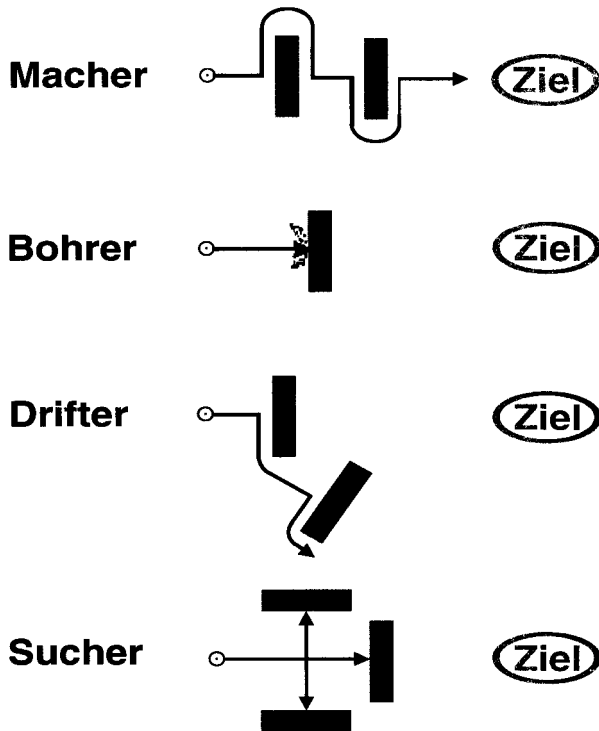


Bild 11: Problemlösertypen

auch bewiesen, daß man wegen der Vielfältigkeit individueller Ansätze die Kreativität durch Gruppenarbeit erheblich steigern kann.

Lassen Sie mich aus der Vielfalt der Themenstellungen zu Denken und Kreativität nur einen Aspekt herausgreifen, der mir gerade beim Erfinden technischer Produkte bedeutsam erscheint:

Grundlage jeder kreativen Erfindung ist die Überwindung von Blockaden oder Vorfixierungen, die aus dem täglichen Berufsfeld, aus der Erziehung oder dem Kulturkreis kommen, und denen wir alle verfallen sind. Hier gibt es eine innere Verbindung zu Künstlern, deren hervorstechendste Eigenschaft meist die Loslösung von den Konventionen des täglichen Lebens ist. Wir Konstrukteure haben es da etwas schwerer, denn wir sollen ja kein Kunstwerk schaffen, sondern ein Produkt, das von unseren Mitmenschen verwendet werden soll, einen Arbeitsprozeß erleichtern oder erneuern soll oder das ein bekanntes Produkt mit bekannten Funktionen ablösen soll. Gerade diese Orientierung an der durchaus praktischen und realen Aufgabe bewirkt aber schon Blockaden, die uns hindern Lösungen zu finden oder sogar die Aufgabe zu erkennen.

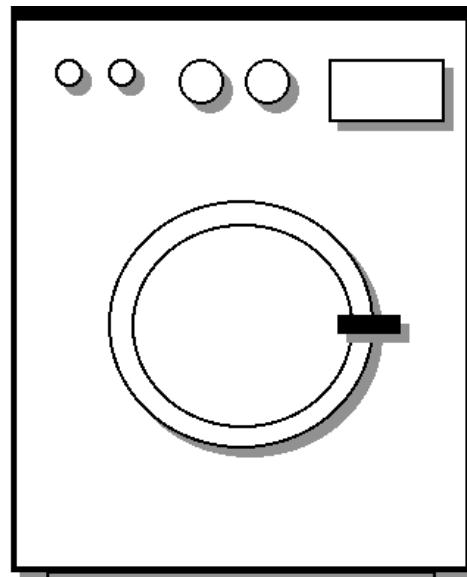


Bild 12: Vorfizierte Darstellung einer Waschmaschine

An was denken Sie, wenn Sie die Aufgabe haben eine neue Waschmaschine zu konstruieren? Das Bild einer konventionellen Waschmaschine, das man dabei vor Augen hat, stellt eine Blockade dar, die einen hindert, sich einen völlig neuen Waschvorgang auszu-denken (**Bild 12**). Die meisten Menschen verbinden mit diesem Bild auch noch ein Detail, z.B. "Kindersicherung", was unsere dringend benötigte Kreativität auf einen völlig unwichtigen Nebenkriegsschauplatz abdrängt.

Dies fängt bei der Analyse der Aufgabenstellung an, die selbst ein nicht unerhebliches Maß an Befreiung von Blockaden erfordert. Beispiel: Uns wurde seitens der Industrie einmal die Aufgabe gestellt, auf einem Blech einen "zweihundert Meter langen Strich mit einer Genauigkeit von plus minus 10 Mikrometer zu ziehen". Das ist nicht möglich! Erst als wir unserem Auftraggeber diese Unmöglichkeit der Lösung nachgewiesen hatten, bequeme er sich über die Aufgabe etwas genauer nachzudenken und uns zu verraten, was er eigentlich wollte: Nämlich zwei Bleche über die Länge von 200 m miteinander genau zu verschweißen. Das führte selbstverständlich zu der Aufgabenstellung, den gleichen Spalt zwischen den beiden Blechen einzuhalten und gleichzeitig zu der sehr einfachen

chen Lösung, mit Hilfe einer Diamantfräse eine billige Schweißnahtvorbereitung zu verwirklichen.

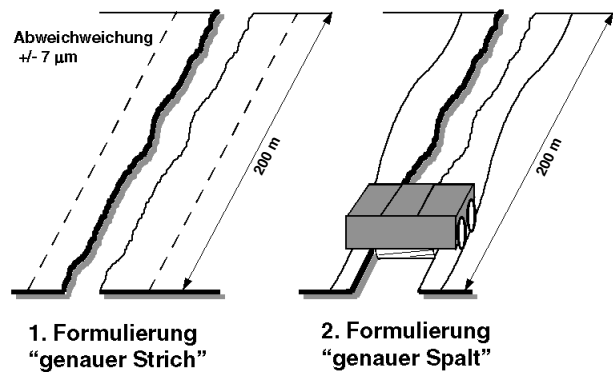


Bild 13: Definition der Aufgabenstellung

Allein die Aufgabenformulierung und die unnötige Zusatzforderung "gerader Strich" führte zur Blockade für neue Lösungen. Am schönsten sind immer die Aufgabenanalysen, bei denen herauskommt, daß man die Funktion gar nicht braucht, die man gerade erfinden will.

An einem weiteren Beispiel möchte ich dieses noch vertiefen - und der Einfachheit und Nachvollziehbarkeit halber wähle ich ein für Ingenieure typisches Bierdeckelbeispiel. Die Aufgabe lautet, die auf **Bild 14** gezeigten neun Punkte mit möglichst wenigen geraden Linien zu verbinden. Die meinen Studenten gezeigte Lösung gelingt mit vier Linien, wobei die innerliche Blockade, die es zu überwinden gilt, darin besteht, daß man über den Bierdeckel hinaus auch den Bierstisch mit verwenden und bemalen darf.

Aber so stolz brauche ich auf diese Lösung gar nicht zu sein, denn sie steckt immer noch voller Blockaden. Wenn ich darauf verzichte, daß die Linien durch die Mittelpunkte der Kreise gehen (was auch schließlich keiner verlangt hat), gelingt eine Lösung mit drei Linien (**Bild 15**).

Wenn ich darauf verzichte, den Bierdeckel als steif und unantastbar zu betrachten, gelingt mir eine Lösung, bei der die Punkte eine andere Anordnung erfahren und durch eine Linie verbunden werden können (**Bild 16**).

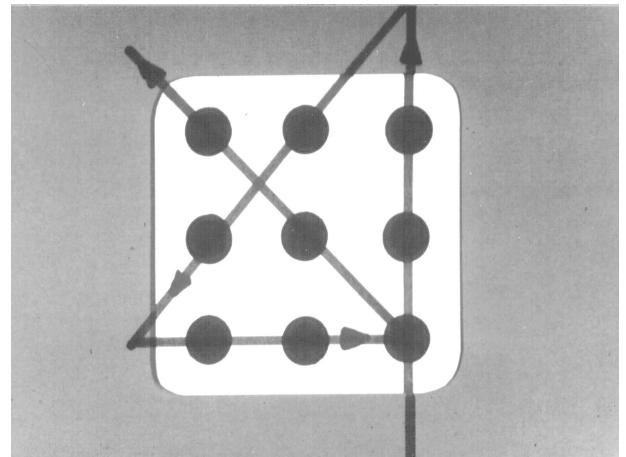


Bild 14: "Bierdeckelaufgabe" und konventionelle Lösung

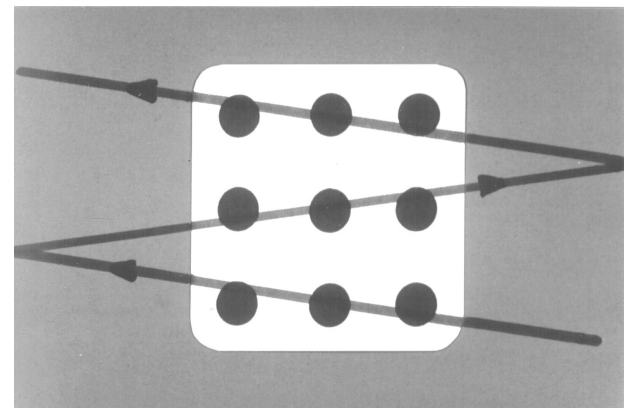


Bild 15: Lösung bei Aufgabe der Restriktion "Punktmitten"

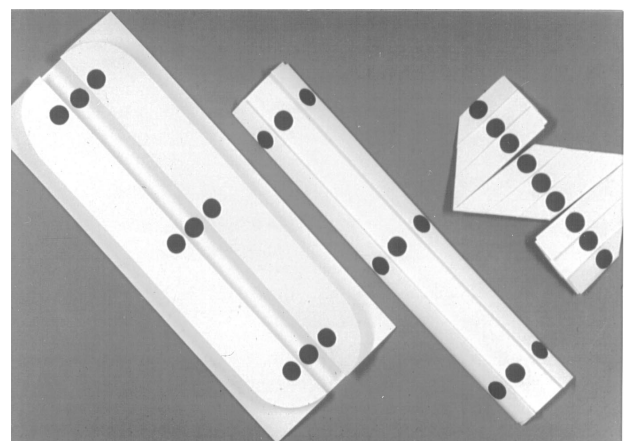


Bild 16: Lösung bei Aufgabe der Restriktion "Bierdeckel unantastbar"

Wenn ich darauf verzichte das Problem nur zweidimensional zu betrachten und den Bierdeckel als unzerstörbar, komme ich auf eine weitere Lösung mit nur einer Linie (**Bild 17**).

Es gibt eine ganze Reihe weiterer Lösungen, die mal von einem Kreativitätstechniker /3/ zusammengestellt wurden und von denen ich nur noch die "Monte Carlo" oder "Fuzzy"-Lösung zeigen möchte, die aber

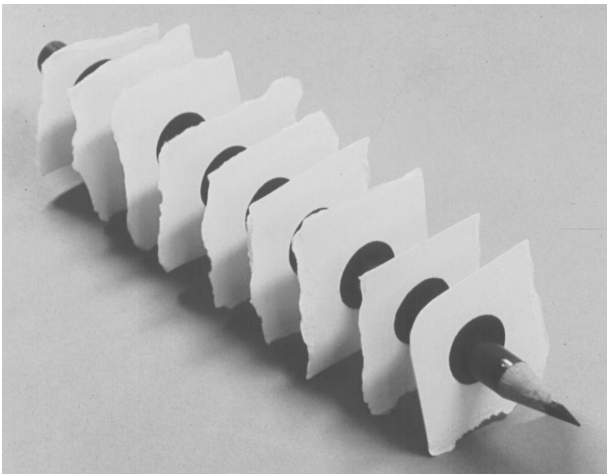


Bild 17: "Dreidimensionale" Lösung

nicht immer gelingt (**Bild 18**).

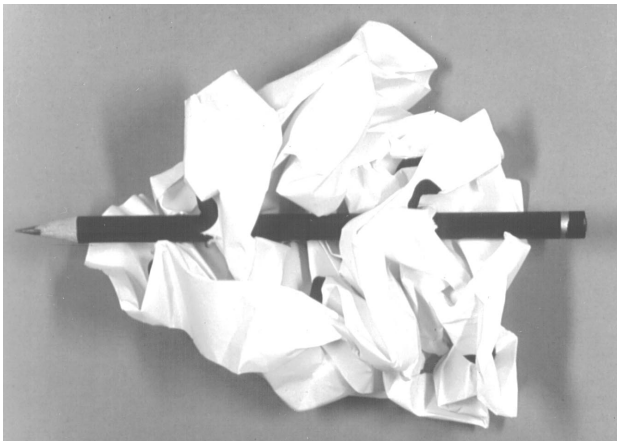


Bild 18: "Fuzzy" -Lösung

Die gezeigte Befreiung von Vorfixierungen ist eine ganz wichtige Vorbedingung zur Entfaltung von Kreativität, die sich aber zur Auffindung von Lösungen noch weiter entwickeln muß. Wie geht nun der Konstrukteur vor und wie kann man ihm dabei helfen?

Jeder Mensch fragt sich in seiner Faulheit, ob dieses Problem nicht schon mal von jemand anderem gelöst wurde. Empfehlen kann ich dabei die Natur. Von zahllosen Beispielen sei in **Bild 19** der Holzbohrer einer Holzwespe und das entsprechende technische Gegenstück hierzu gezeigt.

Eine andere Möglichkeit ist die Anregung der Kreativität durch Gruppenarbeit, modernerweise "Brainstorming", also Gedankenstürme, genannt. Die sogenannten gruppendynamischen Effekte, d.h. die Wechselwirkung verschiedener Denkweisen und Er-

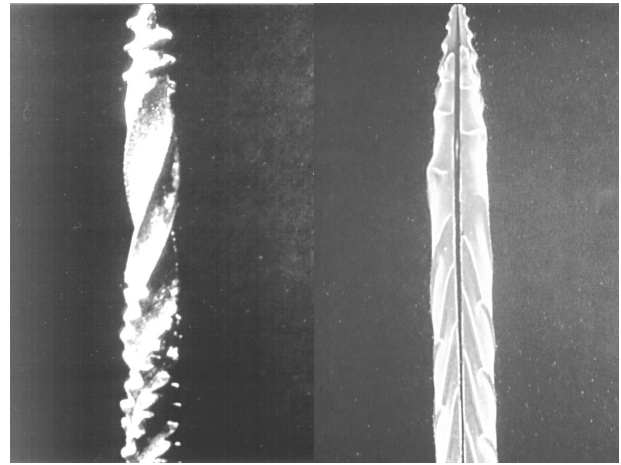


Bild 19: Natur als Beispiel für Konstruktionsideen.
Rechts: Holzbohrer einer Holzwespe.
Links: Bohrraspel als Handwerkszeug.

fahrungshintergründe, haben einen enormen Einfluß auf die Gesamtkreativität der Gruppe und geben entscheidende Anstöße bei der Entwicklung der Kreativität des Individuums. Eine Übung in meinen Konstruktionsvorlesungen besteht darin, daß ich die Hörer unterteile in "Einzelkämpfer" und Gruppen zu fünf oder sechs. Dann gebe ich ihnen eine Aufgabe, z.B. was kann man mit einem Ziegelstein alles machen? Innerhalb von 3 Minuten kommen die Einzelkämpfer auf etwa 5 bis 7 Lösungen, die alle mit Bauen zu tun haben (Haus bauen, Mauer bauen, Kirche bauen ...). Bei den Gruppen kommt unweigerlich einer darauf, daß man mit einem Ziegelstein seine Schwiegermutter erschlagen kann - was möglich, aber verboten ist. Hierauf entwickeln sich im Schneeballsystem weitere Ideen, die möglich und nicht verboten sind, z.B. Mausefalle, Diebstahlsicherung, Briefbeschwerer usw.

Neben diesen sogenannten intuitiven Methoden gibt es weitere, die durch eine Systematisierung von Charakteristiken oder Eigenschaften ein Lösungsfeld aufspannen helfen, in dem es gilt, Lücken zu füllen durch systematische Variation von Parametern. Aus unseren Übungen möchte ich hier ein Beispiel nennen, das die Entwicklung einer beweglichen Brücke betrifft (**Bild 20**). Der Student hat sich ein Schema geschaffen, in dem er in waagerechter Achse eine systematische Variation von Bewegungsarten aufgetragen hat und in achsialer Anordnung die möglichen Teilefor-

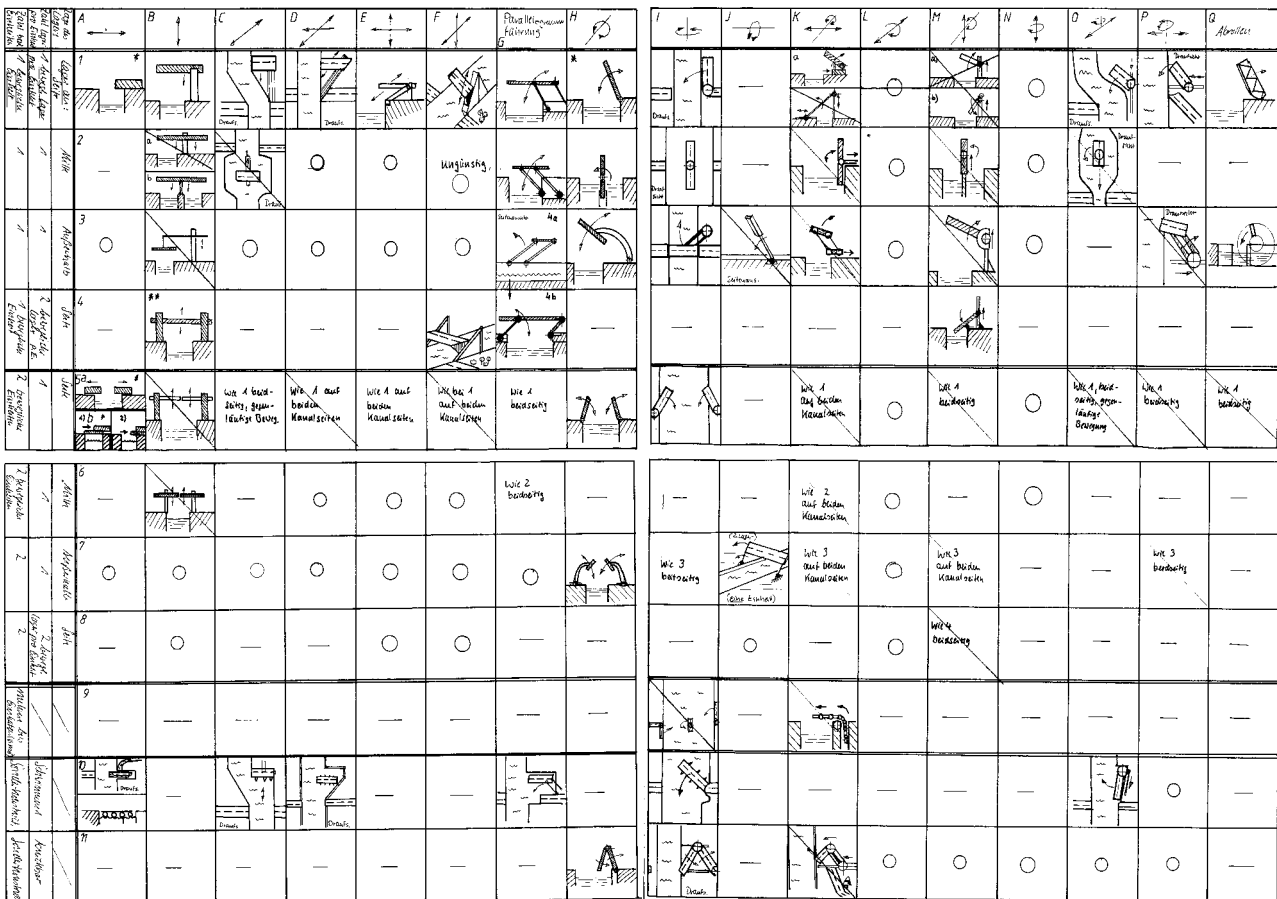


Bild 20: "Morphologischer Kasten" zur Entwicklung einer beweglichen Brücke

men. Diese Ausführung eines - von Erfahrungswissen auf diesem Gebiet praktisch unbelegten - Studenten aus den Anfängen der 80er Jahre hat mich bewegt, weltweit bewegliche Brücken zu fotografieren. Bis heute habe ich noch lange nicht alle von dem Studenten gefundene Lösungen in der wirklichen Ausführung gefunden.

Wissenschaft und Lehre haben sich dieser Problematik und der Unterstützung der Lösungsfindung angenommen und eine Konstruktionslehre entwickelt, die heute Bestandteil jeder Maschinenbauerausbildung ist. Es fehlt auch nicht an Versuchen, den Konstruktionsprozeß oder Teile davon dem Rechner zu übertragen um damit schneller und mit weniger Aufwand zum optimalen Ziel zu kommen. Schließlich fehlt es nicht an Anstrengungen zu erfahren, ob all diese neuen Errungenschaften der Konstruktionsmethodik oder der Rechnerunterstützung den Konstruktionsprozeß und das Produkt verbessern. Alle diese Unter-

suchungen kommen zu Ergebnissen, die ich kurz zusammenfassen kann und damit auch die anfangs gestellte Frage beantworte (Bild 21):

Konstruieren



Kunst
Kreativität
Befreiung



Handwerk
methodische Kreativitätshilfen
Analysen, Bewertungsmethoden
strukturiertes Vorgehen

Bild 21: Konstruktion - Kunst und Handwerk !

- Wichtigstes Element der technischen Problemlösung ist die Kreativität, danach kommt die Erfahrung. Hierzu gehört auch die Aussage, daß der Rechner nach dem Motto "Garbage in - Garbage out" die Kreativität nicht ersetzen kann und daß wir heute erst am Anfang der Entwicklung stehen, wie wir Erfahrung im Rechner ablegen können.

- Wichtigstes Element der Kreativität ist die Befreiung von Einschränkungen und Blockaden.
- Die Kreativität kann man fördern durch methodische Mittel wie z.B. das Brainstorming, die helfen unbewußt verwendete Methoden in das Bewußtsein zu holen.
- Im Bereich der Aufgabenstellung und der Konstruktionsentscheidungen helfen Analysen und Methoden, die man erlernen kann.
- Zur Erreichung von optimalen Lösungen in einer optimalen Zeit zu minimalen Kosten hilft eine strukturierte Vorgehensweise, die man erlernen kann.

Ich glaube daß wir die anfangs gestellte Frage damit so beantworten können, daß wir beim Konstrukteur den Künstler, den Genius des Ingenieurs brauchen, dies aber durch lehr- und lernbare Methoden, das Handwerk, wecken und unterstützen können. Sinn dieser Methoden ist es eigentlich, die berühmte 5%-Auslastung unseres Hirns ein wenig anzuheben.

Und schließlich gelten diese Überlegungen nicht nur für den Konstruktionsprozeß, sondern in gleicher Weise für die Gestaltung von Produktionsprozessen, von verfahrenstechnischen Prozessen, zum Bau eines Hauses oder die Gestaltung von Rektoratsfeiern und das Abhalten von Senatssitzungen - obwohl die Überwindung von traditionsschwangeren Blockaden gerade im letzten Fall ungeheuer schwierig zu sein scheint.

Ich danke für Ihre Aufmerksamkeit.

Literatur

- /1/ Pahl, G. und Beitz, W.: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung. 3. Auflage. Springer 1993
- /2/ VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf 1986
- /3/ Adams, J.L.: Ich habs! Wie man Denkblockaden mit Phantasie überwindet. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1984

Rechnergestützte Stahlauswahlmethodik für Konstrukteure

Große, A., Schiedeck, N.

Seit Mitte dieses Jahres wird das Projekt "Methodik und System zur Stahlauswahl nach konstruktiven Kriterien - Rechnergestützte Stahlauswahlmethodik für Konstrukteure" von der Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. gefördert. Ziel ist die Entwicklung einer rechnergestützten Methode, die den Konstrukteur zum technisch und wirtschaftlich optimalen Stahlwerkstoff bei der Produktentwicklung führt. In diesem Artikel sollen die Problematik und resultierende Aufgaben dargestellt werden.

Since the middle of this year the Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. has been sponsoring the project "Methodology and System for Steel Selection According to Design Criteria – Computer-Aided Methodology for Steel Selection for the Designer". The aim is to develop a computer-aided approach to lead the designer to a technically and economically optimal steel during the product development. This article describes the related problems and formulates the derived tasks.

1 Einführung

1.1 Ausgangsbasis

Die Entscheidung einen bestimmten Stahl für ein Bauteil einzusetzen, hat maßgebliche Auswirkungen auf dessen Funktion, Gestalt, Herstellung und Wirtschaftlichkeit. Aufgrund der vielfältigen Abhängigkeiten bei der Stahlauswahl sollte dieser Prozeß in den gesamten Konstruktionsablauf integriert werden. Bereits in den frühen Phasen der Konstruktion können wichtige Informationen zur Stahlauswahl gewonnen und die sich daraus ergebenden Konsequenzen für Fertigung, Qualität, Kosten usw. abgeschätzt werden. Durch eine integrierte Vorgehensweise kann zu einem frühen Zeitpunkt die Gestaltung und Stahlauswahl koordiniert und aufeinander abgestimmt werden, wodurch sich die Entscheidungssicherheit im späteren Stadium der Detailgestaltung des Bauteils erheblich erhöht.

In der betrieblichen Konstruktionspraxis können folgende Entscheidungssituationen im Rahmen der Stahlauswahl abgegrenzt werden:

- Einführung eines neuen Stahls am Markt
- Substitution eines bisher verwendeten Werkstoffes durch einen zwar bekannten aber in dieser Anwendung noch nicht eingesetzten Stahl
- Werkstoff-Varianten-Entscheidung, wobei die Varianten in ihren Auswirkungen bekannt sind und je nach Forderungen und Möglichkeiten von Fall zu Fall unterschiedlich gewählt werden.

Anhand der dargelegten Entscheidungssituationen wird deutlich, daß ein rechnergestütztes Werkzeug unterschiedlichen Anforderungen Rechnung tragen muß. Im ersten Fall, der Neueinführung eines Stahls, werden auch weiterhin Experimente unter Einsatzbedingungen nicht vollständig ersetzt werden können. Trotzdem ist der Konstrukteur mit Hilfe des EDV-Systems in der Lage neue, potentiell geeignete Stähle zu identifizieren und bereits vorhandene Informationen abzurufen. Im letzten Entscheidungstyp ist das technische Risiko sehr gering. Hier spielen neben den technischen Daten auch die wirtschaftlichen Faktoren, wie Beschaffungs-, Fertigungskosten oder Lieferzeit, eine wichtige Rolle.

Die Methodik und das unterstützende Rechnerwerkzeug zur Stahlauswahl sollen vor allem zwei Ziele verwirklichen

- Herbeiführen der Werkstoffinnovation
- Gewährleisten der Auswahlssicherheit.

1.2 Zielsetzung

Aufgrund methodischer Defizite bei der Werkstofffestlegung steht die Entwicklung einer rechnergestützten Methode zur Unterstützung der Konstrukteure und Entwickler bei der Stahlauswahl im Mittelpunkt dieses Projektes. Ganz wesentlich ist die Integration des Systems in den Konstruktionsarbeitsplatz, vorrangig mit CAD-Systemen. Damit soll Gestaltung und Stahlauswahl simultan ablaufen.

Durch systematische Erfassung aller Anforderungen an den Stahl soll der Konstrukteur zu dem für die jeweilige Aufgabenstellung optimalen Stahlwerkstoff geleitet werden. Das EDV-System wird durch eine interaktive Funktionsweise den Konstrukteur bei der Auswahl beraten. Dabei fließen nicht nur die rein technischen Aspekte in den Auswahlprozeß ein, sondern auch wirtschaftliche Kriterien, wie beispielsweise Beschaffungs-, Fertigungs-, Veredelungskosten oder Lieferzeiten und -abmessungen. Über neutrale Schnittstellen können externe Datenbanken, insbesondere die Datenbanken der Stahllieferanten an das Beratungssystem angeschlossen werden.

Folgende wesentlichen Vorteile ergeben sich aus dem Einsatz des Beratungssystems:

- Integration von Gestaltung und Stahlauswahl,
- Erhöhung der Produktqualität durch fundierte Stahlauswahl bzw. höhere Informationssicherheit,
- Optimierung der Material- und Fertigungskosten durch Kenntnis der wirtschaftlichen Faktoren der Stähle,
- Erhöhung des Wettbewerbs zwischen den einzelnen Stahllieferanten durch erhöhte Markttransparenz,
- Verkürzung der Entwicklungszeiten durch schnelle Beschaffung der gesuchten Informationen,
- geringere Anzahl von Änderungen verursacht durch Auswahl eines ungeeigneten Stahls.

In **Bild 1** ist die prinzipielle Wirkungsweise des zu entwickelnden Systems zur Unterstützung der Stahlauswahl dargestellt.

2 Stand der Technik

In den vergangenen Jahren sind die wesentlichen Impulsgeber für den deutschen Maschinenbau aus zwei Bereichen gekommen. Zum einen ist dies unstrittig die Mikroelektronik (CAx-Techniken und die Steuerungs- und Regelungstechnik), der andere Bereich ist auf gleichem Niveau die Werkstofftechnik. Fragt man weiter, was hemmend auf diese Entwicklung einwirkt, so ist ein Faktor die lange Zeitdauer bis die vielfältigen Ergebnisse der Stahlforschung in technische Anwendungen umgesetzt

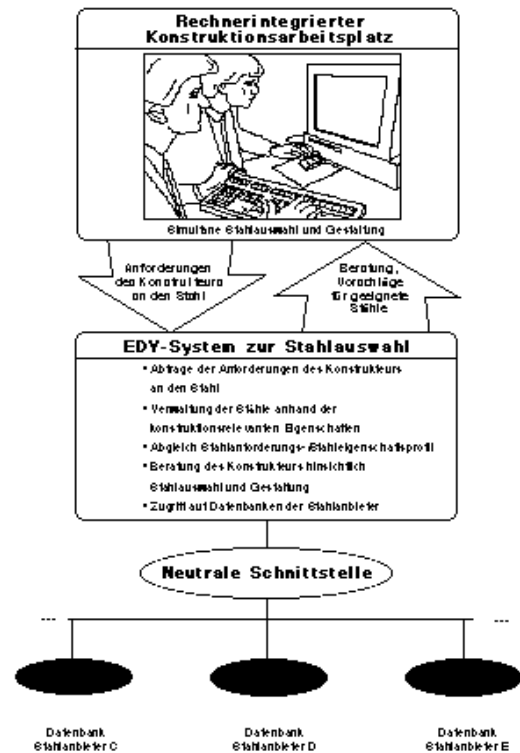


Bild 1: Komponenten des Stahlauswahlsystems

werden /1/.

Gerade in einem Hochlohnland wie Deutschland ist die schnelle Umsetzung von Forschungsergebnissen in Produktinnovationen entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen /2/.

Die Materialkosten betragen bei einem durchschnittlichen Maschinenbauprodukt ungefähr 50 %. Der Konstrukteur legt folglich mit der Entscheidung für einen bestimmten Stahl auch einen erheblichen Anteil der Produktkosten fest /3, 4/.

Der in der industriellen Praxis tätige Konstrukteur erfährt derzeit bei der Aufgabe „Auswahl eines geeigneten Stahls“ keine nennenswerte methodische oder rechnerische Unterstützung. Die Rechnerunterstützung, die mittlerweile nahezu in allen Bereichen der Produktion Einzug gefunden hat, hat bisher um die Problematik der Stahlauswahl einen Bogen gemacht.

In der Regel erfolgen die Gestaltung eines Produkts und die Festlegung des Werkstoffes sequentiell mit zeitlich erheblichem Abstand. Die Erkenntnis, daß sich Stahlauswahl und Gestaltung gegenseitig beeinflussen und dadurch erhebliches Optimierungs-

potential hinsichtlich Qualität, Kosten und Herstellzeit eines Produktes beinhalten, hat sich in der industriellen Praxis bisher wenig durchgesetzt.

Weit verbreitet ist die Ansicht, daß man sich „bei der Wahl des Werkstoffes ... auf die bereits vorliegenden Erfahrungen stützen und übliche Werkstoffe verwenden kann. Erst wenn die bisherigen Erfahrungen nicht ausreichen ... wird die Stahlauswahl zu einer Frage“. Wenn man die beachtlichen Innovationen der Stähle berücksichtigt, müßte die Aussage geradezu umgekehrt werden: „Die Frage der Werkstoffwahl stellt sich für einen verantwortungsvollen Entwickler und Konstrukteur permanent“ /1/.

Neben den mehr methodischen Defiziten (teilweise auch im Denken der Konstrukteure begründet) wird eine gezielte und technisch fundierte Stahlauswahl besonders durch die fehlende informationstechnische Unterstützung erschwert. Heute ist die Kommunikation zwischen Stahllieferant und Stahlanwender durch den Austausch von Papierdokumenten gekennzeichnet. Zusätzlich erstreckt sich in vielen Fällen die eigentliche Informationsbeschaffung über einen längeren Zeitraum von mehreren Tagen bis Wochen. Aufgrund der für den Konstrukteur geringen Markttransparenz ist eine systematische Suche nach einem Stahl oft nicht möglich.

Die Beschreibung der Stahlsorten in derzeit verfügbaren Datenbanken, Normen und anderen Übersichten erfolgt überwiegend nach chemischen und physikalischen Gesichtspunkten, die zwar für den Werkstoffwissenschaftler von großer Bedeutung sind, jedoch für den in der betrieblichen Praxis stehenden Konstrukteur keine große Hilfe darstellen. Insbesondere die für die anwendenden Konstrukteure wichtigen Informationen über Eigenschaften, Einsatzbereiche und weitere Randbedingungen werden nur unvollständig dargestellt. Daher werden diese Datenbanken von industriellen Anwendern wenig genutzt, was besonders mit der geringen Aufbereitung der Informationen und den wenig strukturierten Zugriffsmöglichkeiten begründet werden kann.

Auf dem Gebiet der Rechnerunterstützung in der Konstruktion sind bis heute zahlreiche Erkenntnisse gesammelt worden. Das betrifft sowohl den Aufbau von Informationssystemen, angefangen von der Ergonomie der Benutzeroberflächen bis zum Aufbau

der internen Systemstruktur, als auch die Integration von Rechnersystemen in den Konstruktionsprozeß, insbesondere mit CAD-Systemen. Generell besteht ein Konstruktionsinformationssystem aus den drei Komponenten Benutzeroberfläche, Wissensbasis und Schnittstellen zu anderen Systemen, z.B. den Datenbanken der Stahllieferanten.

3 Arbeitsprogramm

Für die zu entwickelnde rechnergestützte Stahlauswahlmethodik ergeben sich die folgenden Aufgaben:

- Entwicklung einer Methode zur Stahlauswahl
- Entwicklung eines Modells zur vollständigen Erfassung von Anforderungen an Stahlwerkstoffe
- Entwicklung eines Modells zur Klassifizierung von Stählen nach ihren funktionalen Eigenschaften
- Entwicklung des EDV-Systems zur rechnergestützten Stahlauswahl
- Entwicklung einer neutralen Schnittstelle zum Informationsaustausch zwischen EDV-System und externen Datenbanken
- Erstellung von Prototypsoftware zur Validierung und Demonstration

3.1 Methode zur Stahlauswahl

In einem ersten Schritt wird die methodische Vorgehensweise bei der Stahlauswahl entwickelt. Dazu ist zunächst eine Analyse des Konstruktionsprozesses und des Informationsbedarfs des Konstrukteurs bei der Stahlauswahl vorgesehen, woraus eine Auswahlmethodik, d.h. zeitliche Abfolge der Tätigkeiten bzw. Vorgehensweise, systematische Anforderungsermittlung und Algorithmus zum Abgleich von Anforderungs- und Eigenschaftsprofilen, abgeleitet wird. Ein wesentlicher Bestandteil der zu entwickelnden Methodik wird die Ermittlung von Anforderungen und deren Abgleich mit den funktionalen Stahleigenschaften sein. Für die verschiedenen Anforderungsarten an Stähle ist ein Modell zur Klassifizierung zu erarbeiten. Die Aktivitäten der Stahlauswahl müssen in den Konstruktionsablauf eingeordnet werden, damit eine simultane bzw. interaktive Gestaltung des Produkts und das Auswählen eines geeigneten Stahlwerkstoffs unterstützt wird.

3.2 Modell zur Anforderungserfassung

Ausgangspunkt der Stahlauswahl sind die Anforderungen, die seitens des Konstrukteurs an einen Stahl gestellt werden können. Zur Anforderungserfassung werden in der industriellen Praxis stehende Konstrukteure der verschiedenen Branchen hinsichtlich der unterschiedlichen Arten von Anforderungen an Stahlwerkstoffe befragt.

Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgt in einem Informationsmodell, das in ein funktionsfähiges System umgesetzt werden kann. Hierzu soll die Modellierungssprache EXPRESS (ISO 10303-11) verwendet werden

3.3 Klassifizierungsmodell

In einem weiteren Schritt werden die für den Konstrukteur relevanten Stahleigenschaften und die entsprechenden Kennwerte – soweit vorhanden – zusammengetragen. Defizite bei den vorhandenen Datenbanken und den bereitgestellten Kennwerten werden aufgezeigt. Insbesondere soll die Methode der dynamischen Kennwertbildung angewandt werden. Aus wenigen physikalischen Kennziffern lassen sich für Stahlwerkstoffe zahlreiche für die jeweilige Konstruktionsaufgabe relevante Kennziffern ableiten, die im einzelnen nicht vorherbestimmt werden müssen, sondern die der Konstrukteur erst während des Konstruktionsprozesses vom System ermitteln läßt und miteinander vergleicht.

In einem weiteren Informationsmodell werden die Eigenschaften strukturiert abgebildet. Die Darstellung gegenseitiger Abhängigkeiten der Eigenschaften, z.B. konkurrierend, ausschließend, komplementär usw. ist mit dem Informationsmodell möglich. Anhand dieser Übersicht können die Stähle eingeordnet und klassifiziert werden.

3.4 Implementierung des EDV-Systems

Abschließend soll eine prototypische Umsetzung des EDV-Systems zur Validierung und Demonstration der Funktionalität der entwickelten Methodik durchgeführt werden. Dazu müssen zunächst die Funktionen des EDV-Systems spezifiziert werden. Dies sind einerseits die für den Bediener direkt nutzbaren Funktionen, z.B. die Suche nach einem Stahl,

der bestimmte Anforderungen erfüllt oder z.B. die Auswahl eines bestimmten Stahls nach Kostenkriterien aus den angeschlossenen Datenbanken, und andererseits die systeminternen Funktionen, die für die Ausführung der Bedienerfunktionen erforderlich sind.

Um einen Datenaustausch zwischen Stahlauswahl-system und externen Datenbanken zu ermöglichen, wird eine neutrale Schnittstelle entwickelt. Dazu muß ermittelt werden, welche Informationen grundsätzlich von den Datenbanken zur Verfügung gestellt werden können und wie die Schnittstelle zur einfachen Verarbeitung der Informationen aufgebaut sein muß.

Abschließend ist ein Prototyp zu implementieren, um die Funktionsfähigkeit der entwickelten Informationsmodelle und der Systemspezifikation validieren zu können. Für die Akzeptanz eines solchen Systems bei den industriellen Anwendern ist die Entwicklung von übersichtlichen und ergonomisch gestalteten Eingabemasken unerlässlich.

4 Bisherige Arbeiten

Das Projekt befindet sich derzeit in der Anlaufphase. Es sind bereits aus der Literatur bekannte Methoden zur Werkstoffauswahl analysiert worden. Zur Zeit wird der Konstruktionsprozeß bezüglich Tätigkeiten, Vorgehensweise und Informationsbedarf bei der Stahlauswahl eingehend untersucht.

Literatur

- /1/ Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.: Die Werkstoffauswahl als Problem der Produktentwicklung im Maschinenbau. VDI-Berichte Nr. 797, 1990
- /2/ Dietz, P.; Rübhelke, L.: Neue Werkstoffe und Verbundbauweise für Hochleistungsmaschinen der Verfahrenstechnik. Werkstofftechnik Nr. 23, 1992
- /3/ Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung. 3. Auflage, Springer-Verlag, 1993
- /4/ Kloos, K.H.: Werkstoffentwicklung als Innovationsfaktor für Produktentwicklungen. Konstruktion Heft 41, 1989

Ansätze zur parallelen Gestaltung von Produkten und Fertigungsprozessen

Penschke, St.; Große, A.; Heinen, F.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 362 "Fertigen in Feinblech" hat das Institut für Maschinenwesen innerhalb des Teilprojektes B4 "Feinblechkonstruktion" eine rechnerunterstützte Systematik zur Entwicklung von Blechbauteilen erarbeitet. Im Sinne einer integrierten Vorgehensweise wurden Konzepte zur Parallelisierung der Gestaltung des Produktes und der Fertigungsprozesse entwickelt. Ausgehend von einer Informationsanalyse im Bereich der Blechteilekonstruktion wurde das relevante Wissen extrahiert, modellhaft beschrieben sowie Regeln zur Verknüpfung der Informationsobjekte abgeleitet. Die Ergebnisse wurden im Prototypen eines wissensbasierten Systems umgesetzt.

A computer-aided methodology for the development of sheet metal parts has been worked out by the IMW within the subproject B4 "Sheet Metal Design" of the special research project 362 "Processing of Sheet Metal". To meet the aim of an integrated approach a concept for a simultaneous product design and planning of manufacturing processes has been developed. Based on the analysis of the design process the relevant information objects have been extracted and modelled. Furthermore, rules to describe the relationships of these objects have been drawn up. To demonstrate the functionality, a research prototype of a knowledge-based designer information system has been implemented.

1 Umfeld und Motivation

Feinblech ist heute dank moderner Erzeugungsverfahren ein außerordentlich hochwertiges Halbzeug mit der Möglichkeit zur Einstellung definierter Eigenschaften. Auch die Möglichkeiten bei der Weiterbearbeitung von Blech entwickeln sich ausgesprochen dynamisch /1–3/. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, daß die eigenschaftsbestimmende Werkstoffherstellung und die Formgebung in getrennten Fertigungsschritten erfolgen. Angesichts der umfangreichen Verfügbarkeit von Blech läßt sich so eine hohe Qualitätssicherheit und Formflexibilität erzielen.

Ein weiterer wichtiger Umstand ist die sich allgemein verschärfende Wettbewerbssituation mit stetig wachsenden Anforderungen an Preise, Lieferzeiten und die Qualität der Produkte. Dies erfordert eine Reorganisation der Entwicklungsprozesse mit dem Ziel einer zeitlichen Verkürzung bei gleichzeitiger Produktoptimierung. Von wesentlicher Bedeutung sind hier die Ansätze des Simultaneous bzw. Concurrent Engineering (**Bild 1**). Die Philosophie des Concurrent Engineering als simultane Einbeziehung aller Engineering-Bereiche eines Unternehmens zur Verkürzung von Entwicklungszeiten und Senkung der Herstellkosten wird auf verschiedenen Wegen umgesetzt. Es können sowohl teamorientierte, als auch rechnergestützte Methoden zur Anwendung kom-

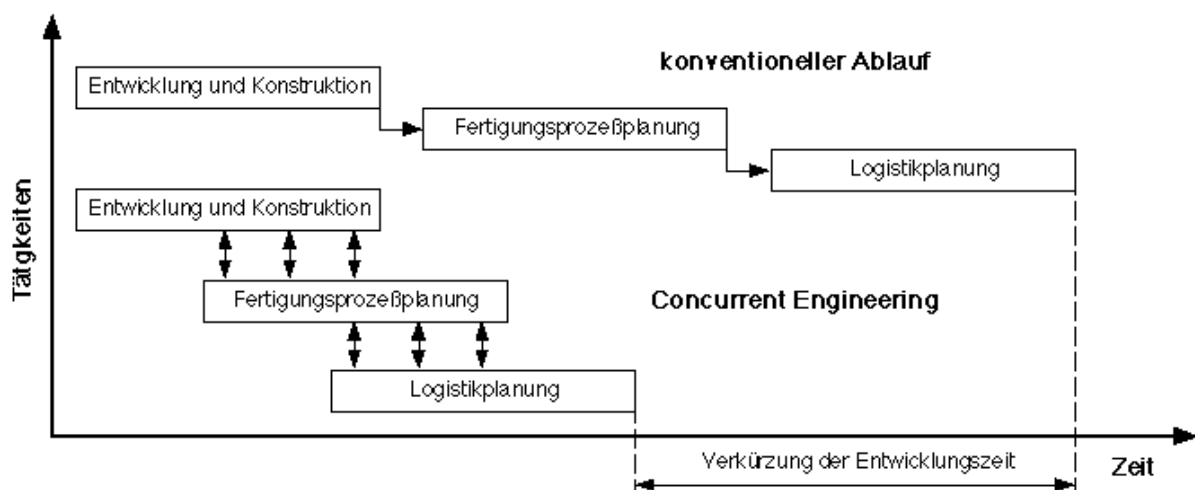


Bild 1: Philosophie des Concurrent Engineering

men. Daraus ergibt sich die wesentliche Zielsetzung, Voraussetzungen für eine Rückgewinnung von Informationen aus den der Konstruktion nachgelagerten Phasen der Produktentstehung für eine Nutzung im Entwicklungsprozeß zu schaffen.

2 Aufbereitung des relevanten Wissens

Während des Produktentwicklungsprozesses zeigen sich oft Lücken bezüglich Informationen aus den verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus. Dies hat zur Folge, daß in der Konstruktion nicht genügend qualifizierte Entscheidungen zur Festlegung späterer Produkteigenschaften getroffen werden können. Es stellt sich also die Aufgabe, mit Hilfe moderner Informationstechnologien diese Lücken möglichst effizient zu schließen.

Für eine rechnerunterstützte Verwaltung konstruktionsrelevanten Wissens müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein. Zunächst muß geprüft werden, welches Wissen überhaupt umgesetzt wird und welches die prägenden Informationen sind, die in den einzelnen Entwicklungsphasen die Entscheidungsgrundlagen bilden. Unter konstruktionsrelevantem Wissen sollen dabei sowohl Handlungssysteme, im Sinne methodischer Vorgehensweisen, als auch Sachsysteme mit den für einzelne Bearbeitungsschritte notwendigen Informationen z.B.:

- Funktionen
- Lösungsprinzipien
- Werkstoffen
- Fertigungsverfahren
- Gestaltungsrichtlinien oder
- Berechnungsverfahren

verstanden werden. Wegen der wesentlich größeren Abhängigkeiten zwischen Bauteilgestalt und Herstellungsprozessen bei der Blechverarbeitung ergibt sich hier ein erheblicher Informationsbedarf.

Dieser Erkenntnis folgend wurden verschiedene Analysen im Umfeld der Blechteileentwicklung und -fertigung durchgeführt. Dazu zählten eine allgemeine Untersuchung im Bereich der Blechteilefertigung mit Hilfe der Fragebogen-Methode, Analysen bestehender nationaler und internationaler Ansätze der Konstruktionsmethodik sowie eine Aufnahme praktischer Vorgehensweisen bei verschiedenen Blechteileherstellern /4/. Schwerpunkte waren zum einen der allgemeine Informationsumsatz und zum anderen die tatsäch-

liche Vorgehensweise in der Konstruktion im Sinne eines typischen Ablaufs.

2.1 Handlungssysteme

Die Ergebnisse der Analyse möglicher Handlungssysteme, d.h. bekannter Methodiken und der Zustandsaufnahme wurden in einer Referenzvorgehensweise für die Blechteilekonstruktion zusammengefaßt. Hier ist bereits nach dem Charakter der Aufgabenstellung zu differenzieren. Denkbar sind:

- *gestalt- bzw. designorientierte Aufgaben*
In diesem Fall ist die Gestalt weitestgehend z.B. durch eine Designstudie (Modell o.ä.) vorgegeben. Alle Optimierungsprozesse müssen sich der geforderten Gestalt unterordnen.
- *funktionsorientierte Konstruktionsaufträge*
Die zu erfüllenden Funktionen stehen im Vordergrund. Gestalt und Herstellung können unter funktionellen Randbedingungen optimiert werden.

Dazu kommen sowohl produkt-, als auch unternehmensabhängige Besonderheiten bei den in der konstruktiven Praxis angewendeten Vorgehensweisen, deren Ursachen oftmals in "historisch gewachsenen" Aufbau- und Ablaufstrukturen zu suchen sind. Da die Art und Anzahl der Aktivitäten bzw. zu treffenden Entscheidungen weitestgehend indifferent sind, wurde in Anlehnung an die Methodik nach Pahl/Beitz /5/, die für die vorliegende Problematik am geeignetsten erschien, eine Referenzvorgehensweise als "neutraler" Ablauf entwickelt.

2.2 Sachsysteme

Die Ergebnisse der o.g. Analysen bildeten den Ausgangspunkt für eine Extraktion, Systematisierung und Modellierung des für eine Unterstützung des Konstruktionsprozesses relevanten Fakten- und Methodenwissens. Wesentliche Sachbereiche sind z.B. Anforderungen, Funktionen, Gestalt/Geometrie, Technologie (mit Betriebsmitteln, Werkzeugen und Fertigungsprozessen) sowie Werkstoffe. Folgende Kriterien sind dabei zu berücksichtigen:

1. Bei der Aufbereitung bzw. Modellierung von Anforderungen und Funktionen besteht das vordergründige Ziel darin, gestaltbestimmende Informationen bereits in der Planungs- und Konzeptphase zu erkennen. Dabei muß eine Berücksichtigung von technologischen und werkstofflichen Aspekten er-

möglichst werden. Der Übergang von Anforderungen und Funktionen zur Gestalt des Bauteils muß unterstützt werden.

2. Die Strukturierung und Beschreibung technologischer Informationen muß speziell für die Entwurfsphase (Gestalten) erfolgen. Ziel ist es, eine interaktive Gestaltoptimierung unter technologischen und werkstofflichen Gesichtspunkten bzw. Parametern zu ermöglichen.
3. Die Bereitstellung der jeweiligen Informationen im Konstruktionsprozeß muß anwendungsbezogen erfolgen, d.h. die notwendigen Informationen müssen der Problemstellung angepaßt präsentiert werden. Die Struktur der Informationssammlung muß ein methodisches Vorgehen beim Konstruieren unterstützen.

Die Untersuchungen konzentrierten sich dabei zunächst auf bestimmte Schwerpunkte. In diesem Zusammenhang wurde die Modellierung der Abbildungsbereiche unter der Maßgabe einer möglichen Erweiterung in folgenden Entwicklungsphasen durchgeführt. So wurden die abbildenden Tätigkeiten auf einzelne Blechteile fokussiert. Die Untersuchungen zur Geometrie beschränkten sich vorerst auf die Spezifizierung von blechtypischen Gestaltungsgrundelementen. Eine Modellierung wurde hier nur in sehr beschränktem Umfang durchgeführt. Sie soll verstärkt Gegenstand künftiger Untersuchungen sein.

Bei der Modellierung von Anforderungen und Funktionen wurde vor allem eine möglichst einfache und effiziente Nutzung während der nachfolgenden Konstruktionsphasen angestrebt. Eine konventionelle Erfassung von Anforderungen in abstrakt textueller Form hat den Nachteil, daß eine Berücksichtigung während der konstruierenden Tätigkeiten sehr aufwendig ist. Interpretiert man Anforderungen als eine Festlegung von Invarianzen für die Ausprägung von Produkteigenschaften, so ergibt sich die Möglichkeit, textuelle Anforderungen in Referenzen auf die jeweiligen Informationsobjekte aufzulösen. **Tabelle 1** zeigt Beispiele für eine derartige Referenzierung.

Diese Methode der Anforderungsbehandlung bietet die Möglichkeit, im weiteren Konstruktionsprozeß das werkstoff- bzw. technologiespezifische Wissen, das zur fertigungsgerechten Gestaltung des Bauteils erforderlich ist, unmittelbar zur Verfügung zu stellen. So kann parallel zur Produktdefinition eine Vorauslegung des Fertigungsprozesses erfolgen.

Forderung (textuell)	Referenzierung
- Blechteil muß korrosionsbeständig sein	- Blechwerkstoffe mit guter Korrosionsbeständigkeit
- die Montage der Baugruppe soll durch Schweißen erfolgen	- Blechwerkstoffe mit guter Schweißseignung
- geringe Herstellkosten	- Betriebsmittel mit niedrigem Werkzeug- und Lohnkostenniveau
- die Herstellung soll im Werk A des Unternehmens erfolgen	- Betriebsmittel (z.B. Ziehpressen) des Werkes A

Tab. 1: Referenzierung von Anforderungen

Im Bereich der Technologie wurde besonders das Tiefziehen untersucht. Bei der Modellbildung zum Tiefziehen wurden einige Vereinfachungen getroffen, da das Tiefziehergebnis von sehr vielen Einflußfaktoren abhängt, die sich zudem schwer quantifizieren lassen. Wesentliche Einflußbereiche sind die Geometrie, der Werkstoff und technologische Größen wie Parameter bei der Prozeßführung (z.B. Ziehkraft und -geschwindigkeit, Niederhalterkraft, Stadienfolge). Als maßgebende Einflußgrößen wurden Informationen zu folgenden Bereich abgebildet:

- Betriebsmittel, z.B.
 - Eignung bezüglich Fertigungsverfahren
 - Arbeitsraumabmessungen
 - technische Parameter (Stößelkräfte etc.)
 - Lohn- und Werkzeugkostenniveau
 - wirtschaftliche Losgrößen
- Werkzeuge, z.B.
 - Eignung bezüglich Fertigungsverfahren
 - Geometrie
- Fertigungsprozesse, z.B.
 - Prozeßparameter (Ziehkraft, -geschwindigkeit, Stadienfolge etc.)
 - Methoden zur Prozeßauslegung (Stadienplanung, Ziehkraft-, Zuschnittberechnung etc.)

Auch für die Abbildung des prozeduralen Wissens (Berechnungsmethoden u.ä.) wurden entsprechende Beschreibungsmodelle entwickelt. Sie ermöglichen eine Verwaltung von Kenngrößen und deren Verknüpfung zu Methoden. Ebenfalls berücksichtigt wurde die Tatsache, daß u.U. mehrere Methoden zur Berechnung einer Kenngröße bekannt sind (z.B. eine Überschlagsformel und eine exakte Berechnung). Diese können nebeneinander verwaltet und ihrer Bedeutung entsprechend mit Prioritäten belegt werden, die im Anwendungsfall berücksichtigt werden.

Damit soll sich die Erläuterung zur Abbildung der einzelnen Sachsysteme erschließen. Auf die weiteren wichtigen Teilbereiche und deren Modellierung soll nicht näher eingegangen werden.

Für die Modellierung der Informationsobjekte wurde die formale Beschreibungssprache EXPRESS /6/ angewendet. Diese Modellierungssprache wurde im Rahmen des Schnittstellenstandards STEP - Standard for the Exchange of Product Model Data - für die rechnergerechte und konsistente Abbildung von Produktinformationen entwickelt. **Bild 2** zeigt ein entwickeltes Partialmodell für Werkstoffe in EXPRESS-G Notation, einer grafischen Darstellungsform von EXPRESS-Modellen.

3 Entwicklung eines Prototypen

Zum Nachweis der Funktionalität der entwickelten Ansätze, Methoden und Modelle wurde zur Forschungszwecken ein entsprechender Prototyp am IMW installiert. Ziel ist die Integration der Ergebnisse in einem wissensbasierten System zur Unterstützung der Blechteileentwicklung.

3.1 Konzept

Der eigentlichen Installation ging eine Konzeptionsphase für den Prototypen voraus. Hier wurden zunächst aus Anwendersicht Anforderungen an die Implementation spezifiziert. Dies waren z.B.:

- *allgemeine Forderungen*
Struktur des Prototypen, Benennungssystem, Dateimanagement
- *Benutzerführung*
Bildschirmmasken, Anbieten paralleler Funktionen
- *Benutzerkonzept*
Nutzergruppen, Nutzungs- und Zugriffsrechte
- *Funktionalitäten*
Informations-, Protokoll-, Warnfunktionen, Entscheidungsstrukturen, Alternativen
- *Datenbasis*
Bauteile, Anforderungen, Funktionen, Geometrie, Werkstoffe, Fertigungsprozesse, Betriebsmittel, Werkzeuge, prozedurales Wissen

Aus dieser Anforderungsspezifikation wurde das in **Bild 3** dargestellte Konzept für den Prototypen entwickelt. Die Implementation besteht aus drei wesentlichen Schichten:

1. Integriertes Produkt- und Prozeßmodell

Diese Schicht enthält die notwendige Datenbasis für den Prototypen. Das in EXPRESS spezifizierte Fakten- und Methodenwissen wird mit Hilfe am IMW entwickelter Werkzeuge /7/ in die Entwicklungsumgebung Kappa umgesetzt. In der Entwicklungsumgebung erfolgt die persistente Haltung der Daten.

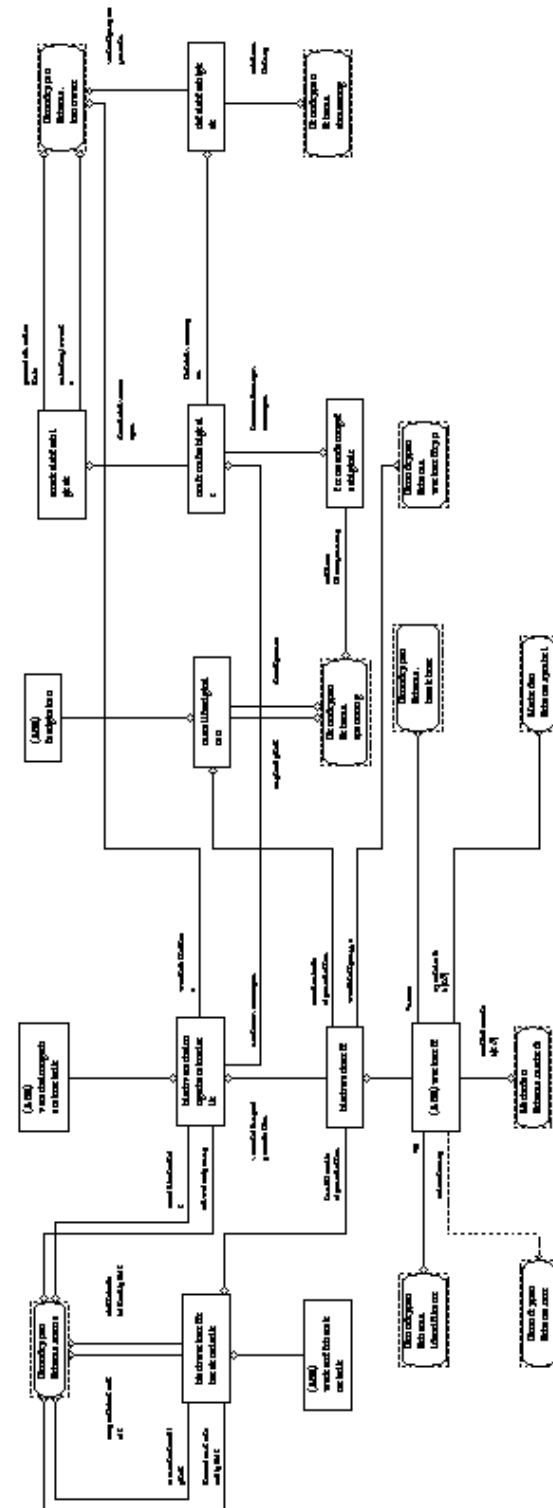


Bild 2: Informationsmodell für die Blechteileentwicklung, Partialmodell für Werkstoffe (EXPRESS-G Notation)

2. *Werkzeuge zur Wissensverarbeitung und -bereitstellung*

Diese Schicht enthält die zur Verarbeitung und Bereitstellung des Wissens aus der Datenbasis notwendigen Werkzeuge. Sie sorgt für die anwendungsbezogene Bereitstellung des jeweils relevanten Wissens.

3. *Benutzerschnittstelle*

Sie stellt die Kommunikationsschnittstelle zwischen dem Benutzer und dem System mit seiner Wissensbasis dar.

Weitere wichtige Elemente sind die Systemverwaltung mit verschiedenen wiederverwendbaren Prozeduren zum Aufbau und Anpassen von Bildschirmmasken oder universellen Suchmechanismen sowie Schnittstellen zu externen Systemen wie CAD-, CAQ- oder PPS-Systemen, um einen Austausch von Daten zu ermöglichen.

3.2 **Umsetzung**

Die Umsetzung des erläuterten Konzeptes erfolgte in der Rechnerumgebung des IMW. Neben der modellhaften Beschreibung des Sachwissens mußten auch die gewünschten Systemfunktionalitäten in neutraler Form beschrieben werden. Dies betraf vor allem die Schicht der Wissensverarbeitung und -bereitstellung. Dazu wurden Methoden der OMT - Object Modelling Technique - /8/ genutzt. Hier wird zwischen drei we-

sentlichen Modellen zur Beschreibung komplexer Systeme unterschieden:

- *Objektmodell*
repräsentiert die statischen, strukturellen und datenbezogenen Aspekte des Systems; entspricht dem Sachwissen (EXPRESS-Spezifikation)
- *dynamisches Modell*
repräsentiert die zeitlichen, verhaltensmäßigen bzw. steuerungsbezogenen Aspekte des Systems
- *funktionales Modell*
repräsentiert die Übergangs- und Funktionsaspekte des Systems, dies können Funktionen, Einschränkungen oder funktionale Abhängigkeiten sein

Speziell für die Beschreibung des dynamischen und funktionalen Verhaltens wurden entsprechende Modelle entwickelt und bei der Implementation umgesetzt.

So wurde ein Werkzeug zur Steuerung von Berechnungsmethoden entwickelt, das es ermöglicht, während des Konstruktionsvorgangs mathematisch beschreibbare Randbedingungen in Abhängigkeit vom Konkretisierungsgrad auszuwerten und entsprechend zu berücksichtigen. Dazu werden Symbole und Methoden (mathematischer Zusammenhang von Symbolen) kontextabhängig verwaltet und für die Nutzung im Konstruktionsprozeß nach allen Zielgrößen aufgelöst bzw. umgestellt.

Benutzerschnittstelle (Kappa, C, C++, ...)

Werkzeuge zur Wissensverarbeitung und -bereitstellung (C, C++, ...)

Beschreibung von Konstruktionsprozessen	dynamische Anforderungsbehandlung	Featureverarbeitung	Steuerung von Berechnungsmethoden
Informations-Module (HTML, Java)	Gewinnung von Fertigungserfahrungen	autonome Wissensakquisition	Beurteilung von Fertigungserfahrungen
...

Systemverwaltung und Oberfläche (C, Kappa, Tcl/TK, ...)

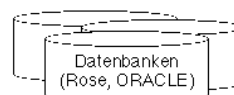
- Wiederverwendbare Prozeduren
- Fensteraufbau nach Datenbankobjekten
 - dynamische Fensteranpassung
 - universelle Suchmechanismen
 - Pipes
 - ...

integriertes Produkt- und Prozeßmodell

- Fakten- und Methodenwissen
- Konstruktionsaktivitäten
 - Produktbeschreibung
 - Berechnung und Dimensionierung
 - Werkstoffe
 - Arbeitsvorbereitung
 - Fertigung
 - ...
- (EXPRESS)

Umsetzung (LaCuca)

Entwicklungsumgebung für Applikationen (Kappa)



Schnittstellen zu externen Systemen

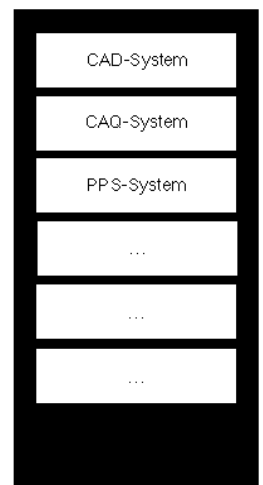


Bild 3: Konzept eines wissensbasierten Systems für die integrierte Blechteileentwicklung

Werkstoff: ZStE 340		Betriebsmittel: Ziehpresse BZE 240	
Rm	540.0	Tiefe	1000.0
kfm	702.0	Breite	1000.0
beta100	2.1	Hoehe	700.0
eta_F	0.5	Hmax	700.0
Werkstueck:		Fstmax	1.6e+06
s0	1.0	Fmax	300000.0
Apl	3317.52	Vmax	
d0	64.9923	Werkzeug:	
R		Ast	1809.56
Verfahren: Tiefziehen mit Niederhalter im Erstzug Zylindrische Teile		uz	1.4
Fz	12616.5	d1	48.0
hmax	12.1604	dM	50.8
AN	24127.4	rM	
FN	13533.8	rst	3.0
pN	0.560931	Ergebnis: flacher Napf	
C2		h	10.0
beta0	1.35401	dm	49.0
beta0max	1.41893	rb	3.0
d0max	68.1088	s0	1.0
<input type="button" value="ASCII"/> <input type="button" value="Undo"/> <input type="button" value="Display"/>		<input type="button" value="Help"/> <input type="button" value="Close"/>	

Grenzziehverhaeltnis fuer d1/s0 = 100

Bild 4: Bildschirmmaske zur Vorauslegung von Fertigungsprozessen

3.3 Nutzungsszenario

Das System bietet zunächst die Möglichkeit, Anforderungen für das neu zu entwickelnde Blechbauteil festzulegen. Dies kann, wie bereits beschrieben, durch eine Referenzierung oder in textueller Form erfolgen. Der Benutzer wird dabei durch entsprechende Hilfsmittel (z.B. Suchmechanismen, Editor) unterstützt.

Ist diese Phase abgeschlossen, kann eine Vorauslegung geometrischer, werkstofflicher und technologischer Kenngrößen erfolgen. Die Vorgabe von Parametern kann dabei direkt ("von Hand") oder durch Auswahl referenzierter Anforderungen vorgenom-

men werden. Mit Hilfe des hinterlegten prozeduralen Wissens werden die Vorgaben ausgewertet und alle bis dahin nicht definierten Zielgrößen, soweit möglich, berechnet. **Bild 4** zeigt die Bildschirmmaske für einen solchen Auslegungsprozeß. Durch unterschiedliche Darstellungsformen (Schriftstil und -farbe) ist gekennzeichnet, ob es sich um berechnete, ausgewählte oder "von Hand" eingegebene Kenngrößen handelt.

Parallel dazu erfolgt eine Gegenprüfung der referenzierten Anforderungen auf ihre "Gültigkeit". Sind z.B. eine Reihe von Ziehpressen als bevorzugt referenziert, so wird für jede Presse überprüft, ob das Bauteil mittels dieser Presse herstellbar ist. Gleiches gilt sinn-

gemäß für alle referenzierten Anforderungen. Die Ergebnisse dieser Prüfung werden ebenfalls entsprechend präsentiert.

Das System bietet so die Möglichkeit zur interaktiven Optimierung von Geometrie, Werkstoff und Fertigung und unterstützt im weitesten Sinne eine fertigungsge- rechte Konstruktion.

4 Ausblick

Hauptzielstellung der geplanten Arbeiten ist die Erweiterung der bereits entwickelten Methoden und Werkzeuge. Zunächst soll ein methodisches Rahmenkonzept für die rechnerunterstützte Blechteileentwicklung erstellt werden. Ziel ist die Systematisierung und Einordnung der verschiedenen, zur Konstruktionsunterstützung zu entwickelnden Methoden und Werkzeuge wie:

- dynamische Anforderungsbehandlung
- Featurebasierung
- Akquisition und Aufbereitung von Fertigungserfahrungen

in einem Systemmodell. Als ein wesentlicher Bestandteil des Rahmenkonzeptes soll ausgehend von den bisher erfaßten Vorgehensweisen bei der Blechteileentwicklung eine Methode zur Beschreibung von Konstruktionsabläufen basierend auf der Theorie der Konstruktionsräume entwickelt werden. Grundge-

danke der im Abschnitt 2.1 beschriebenen Ablaufpläne der Konstruktionsmethodik ist es, eine bewußte, nicht objektgebundene Vorgehensweise zur Bearbeitung konstruktiver Probleme zu unterstützen. Sie stellen konfektionierbare Leitlinien zur Bewältigung des Konstruktionsprozesses (insbesondere für Neukonstruktionen) dar. Schwächen dieser Methoden zeigen sich in der Lösung von Problemen im speziellen Anwendungsfall und bei der Darstellung von iterativen Prozessen.

Aus diesem Grund sind speziell unter dem Blickwinkel der Rechnerunterstützung von Planungs- und Entwicklungstätigkeiten beschreibende Methoden entwickelt worden. Sie gehen von einer zunehmenden Konkretisierung der Produktbeschreibung aus, welche auf eine begrenzte Anzahl von Konstruktionsaktivitäten reduziert werden kann. Die Aktivitäten spannen einen mehrdimensionalen Raum auf, der zur Beschreibung von Konstruktionsprozessen genutzt werden kann /9, 10/. Die Nutzung derartiger Methoden soll es ermöglichen, Wissen zu produktspezifischen Konstruktionsabläufen zu akquirieren und gegebenenfalls Konstruktionsprozesse zu steuern.

Ausgehend von den bestehenden Ansätzen zur Anforderungsbehandlung soll eine Systematik für die Erfassung, Konkretisierung, Änderung, Anpassung und Aufgliederung von Anforderungen entwickelt werden. Dabei muß gewährleistet werden, daß der

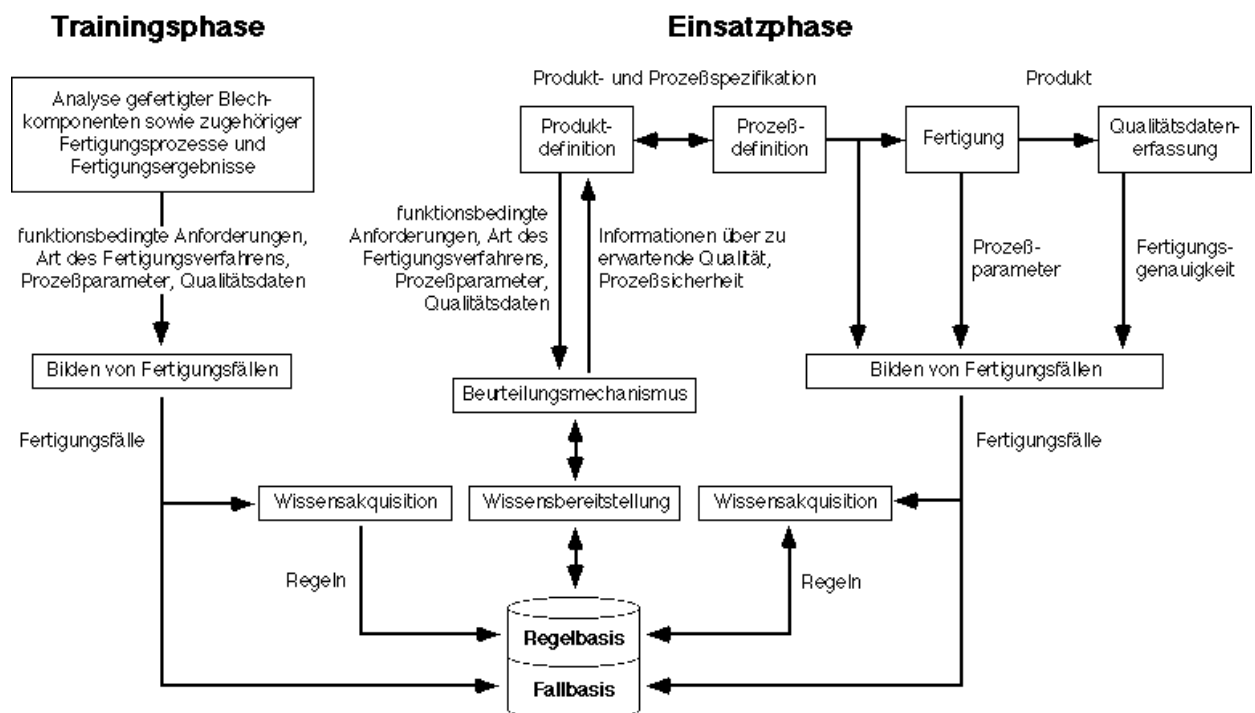


Bild 5: Konzept zur Nutzung von Fertigungserfahrungen in frühen Konstruktionsphasen

Konstrukteur bereits in frühen Entwicklungsphasen (Planung) bei der Erfassung von Anforderungen unterstützt wird, die den Besonderheiten von Produkten aus Feinblech genügen. Neben der Erfassung blechspezifischer Anforderungen soll im Entwicklungsprozeß eine Steuerung der Konstruktion im Sinne einer anforderungsgetriebenen Blechteileentwicklung angestrebt werden.

Im weiteren ist geplant, die Ansätze der Feature-Technologie für die Blechteileentwicklung zu nutzen. Primäres Ziel der Featurebasierung ist es, Lösungselemente im Entwicklungsprozeß zur Verfügung zu stellen. Diese Lösungselemente müssen möglichst verfahrensunabhängig definiert werden und z.B. mit Informationen über erfüllbare Anforderungen und Funktionen verknüpft sein, um den Übergang von der Planungs- und Konzeptphase zur Entwurfsphase (von Anforderungen/Funktionen zur Gestalt) zu unterstützen. Im Hinblick auf eine Integration in das Rahmenkonzept ergibt sich die Aufgabe, weitere Informationen aus den Bereichen Arbeitsvorbereitung, Fertigung sowie Fakten- und Methodenwissen zum fertigungsgerechten Gestalten in die Feature-Beschreibung zu integrieren. Umgesetzt werden soll dieses Konzept mit der Definition von Basis-Features aus denen über ein Sichtenkonzept z.B. Konstruktions- oder Fertigungs-Features zusammengesetzt werden.

Für die Unterstützung des Konstrukteurs bei der Festlegung von Genauigkeitsanforderungen (z.B. Toleranzen, Oberflächenbeschaffenheiten) soll auf Erfahrungen mit bereits gefertigten, ähnlichen Blechbauteilen zurückgegriffen werden. Dazu sind Informationen auf Fertigungsebene zu sammeln und entsprechend aufzubereiten. Für eine fertigungsgerechte Festlegung von Genauigkeitsanforderungen sind Kenntnisse über Fertigungsprozesse, erreichbare Prozeßgenauigkeiten und -fähigkeiten erforderlich. Entsprechend dem im **Bild 5** dargestellten Konzept sind dafür Werkzeuge zu entwickeln, die mit Hilfe von Algorithmen auf der Basis von Statistik, Fuzzy-Logik und/oder neuronalen Netzen das erforderliche Wissen autonom akquirieren und aktualisieren.

Mit diesen Mechanismen werden aus gesammelten Fertigungsfällen ähnlicher Struktur automatisch Regeln induziert und in einer Regelbasis abgelegt. Die Algorithmen werden dazu genutzt, die Zusammenhänge zwischen Bauteilcharakteristika, Genauigkeitsanforderungen sowie Spezifikationen des Ferti-

gungsprozesses einerseits und dem Fertigungsergebnis andererseits zu erfassen. Ein Beurteilungsmechanismus führt die bedarfsorientierte Wiedergewinnung und Bereitstellung des vorhandenen Regelwissens durch. Während der Entwicklung neuer Blechbauteile kann so eine Aussage über das zu erwartende Fertigungsergebnis getroffen werden.

Literatur

- /1/ Radtke, Hermann: Fachgebiete in Jahresübersichten – Blechbearbeitung 1996. VDI-Z Special Blechbearbeitung Oktober '96, S. 14-20
- /2/ Autorenkollektiv: International Conference on Sheet Metal – SheMet '96. Proceedings Volume I und II, University of Twente/WB, April 1996
- /3/ Hielscher, Christian; Sitzmann, Bernd: Erfahrungen mit dem Innenhochdruck-Umformen. Werkstatt und Betrieb 129 (1996), S. 840-850
- /4/ Penschke, Steffen; Große, Andreas: Grundlagen für die Unterstützung des Konstruktionsprozesses beim Entwickeln von Blechbauteilen. Mitteilungen aus dem IMW Nr. 20 (1995), S. 53-58
- /5/ Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang: Konstruktionslehre. Springer Verlag Berlin/Heidelberg/New York, 1986
- /6/ ISO 10303: Industrial automation systems – Product data representation and exchange. Part 11: Language reference manual. ISO/TC 184/SC 4, 1993
- /7/ Ort, Andreas: Überführung einer Spezifikation in EXPRESS in die Entwicklungsumgebung Kappa. Mitteilungen aus dem IMW Nr. 20 (1995), S. 67-72
- /8/ Rumbaugh, James; Blaha, Michael; Premerlani, William u.a.: Objektorientiertes Modellieren und Entwerfen. Coedition Carl Hanser Verlag München und Prentice-Hall International London, 1994
- /9/ de Vries, T.: Conceptual design of controlled electro-mechanical systems. Dissertation, University of Twente, 1993
- /10/ Hartmann, Detlef: Ein Modell zur qualitätsgerechten Konstruktion. VDI Fortschritt-Berichte Reihe 1 Nr. 260, VDI Verlag Düsseldorf, 1996

Workflow-Management für die integrierte Produktentwicklung

Schmitt, R.

Ausgehend von einer Betrachtung der integrierten Produktentwicklung als Organisationsstrategie für die technische Auftragsabwicklung befaßt sich der folgende Artikel mit dem Einsatz von Workflow-Management-Systemen in der Produktentwicklung. Neben einer Beschreibung der notwendigen organisatorischen Voraussetzungen wird auf die besonderen Anforderungen der Produktentwicklung an solche Systeme eingegangen und erläutert, warum ein Workflow-Management der Entwicklungsprozesse nur in Verbindung mit Systemen zur Verwaltung von Produktstrukturen und -konfigurationen sinnvoll ist.

Based on a short reflection on integrated product development as an organisational strategy for the technical job processing, the following article deals with the use of workflow management systems in the product development phase. In addition to the description of the necessary organisational prerequisites, the particular requirements of product development regarding such systems are discussed. It is described why workflow management of development processes makes sense only in connection with systems for the administration of product structures and configurations.

1 Bedeutung einer integrierten Produktentwicklung

Der Konstrukteur legt mit seinen Entscheidungen die Eigenschaften eines Produktes weitestgehend fest. Dies führt zu

- einer maßgeblichen Bestimmung der Art und Weise, wie sich ein Produkt in der Fertigung, bei der Montage, während des Betriebes usw. verhält und
- einer unmittelbaren Beeinflussung von Kosten, Zeit und Qualität.

Deshalb ist im Hinblick auf die Optimierung der Produkteigenschaften bereits während der frühen Produktentwicklungsphasen eine effiziente Kommunikation und Abstimmung zum einen zwischen den Konstruktionsbereichen selbst und zum anderen zwischen der Konstruktion und weiteren Abschnitten der technischen Auftragsabwicklung im Sinne einer integrierten Produktentwicklung von entscheidender Bedeutung. Bei geringer Fertigungstiefe ist die Einbeziehung von Zulieferern unerlässlich. Dabei ist unbedingt auf ein effizientes Management des Entwicklungsprozesses zu achten, um den Produktentwickler von lediglich mittelbar produktiven oder gar unproduktiven Tätigkeiten zu entlasten und ihm mehr Freiräume für seine kreativen Aufgaben zu geben (s. **Bild 1**).

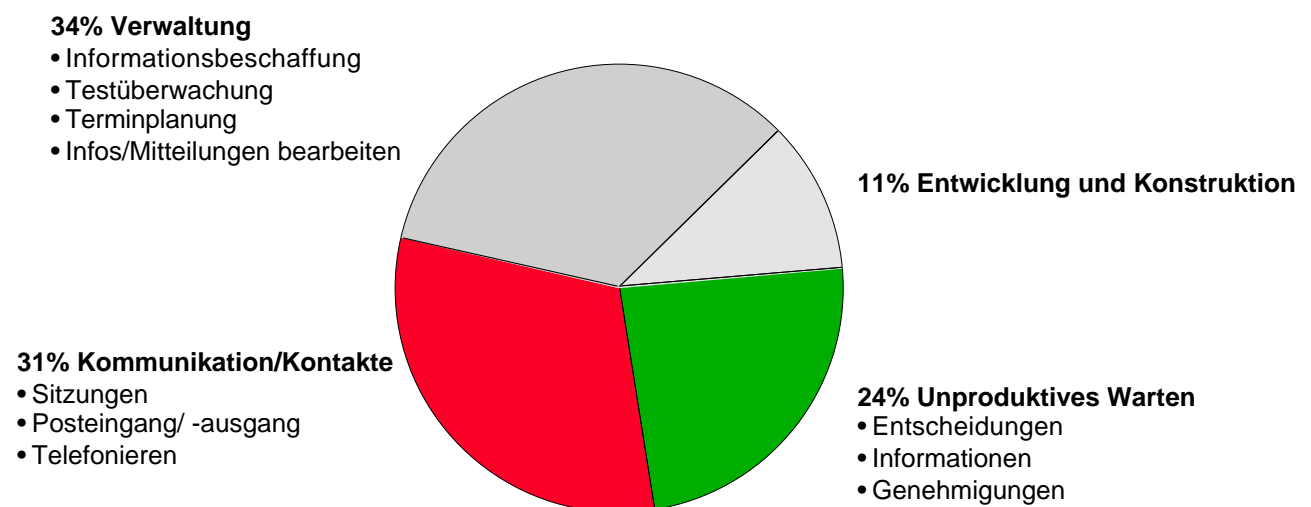


Bild 1: Der Konstrukteur ist nur einen Bruchteil seiner Arbeitszeit kreativ (Quelle: R. L. Harmon: Das Management der Neuen Fabrik) /1/

2 Simultaneous Engineering als organisatorische Basis für eine integrierte Produktentwicklung

Bereits zu Beginn der 80er Jahre zwang der stärker werdende weltweite Wettbewerb die Unternehmen dazu, funktionsübergreifende Teams bestehend aus Konstrukteuren, Arbeitsplanern, Vertriebsleuten, Einkäufern, Materialdisponierern u. a., teilweise unter Beteiligung von Zulieferern, zu bilden, um kooperativ eine optimierte Produkt- und Prozeßdefinition zu erarbeiten. Die Strategie lautete "Simultaneous Engineering", später "Concurrent Engineering".

Die organisatorische Umsetzung dieser Strategie ist unabhängig vom Einsatz unterstützender Kommunikations- und Informationssysteme - ohne Zweifel die wichtigste Voraussetzung für eine integrierte Produktentwicklung. Neben vielen, auf der Hand liegenden Vorteilen verfügt das "klassische" Simultaneous Engineering noch über ein großes Optimierungspotential:

- Teamtreffen finden auf einer festgelegten terminlichen Basis unabhängig vom konkreten Abstimmungsbedarf statt;
- Teamzusammenkünfte sind bei verteilten Entwicklungsstandorten und bei Einbeziehung von Zulieferern mit einem erheblichen Aufwand verbunden;
- Experten fehlen während der Teamzusammenkünfte in ihren eigenen Bereichen;
- Das Durchspielen von "Was wäre wenn"-Szenarien gestaltet sich angesichts der bereits genannten Gründe sehr zeit- und kostenaufwendig;
- Teams sind häufig nicht vollständig, wodurch es zur Vertagung von Entscheidungen kommen kann;
- Entscheidungen werden während der Teamtreffen oftmals erzwungen, obwohl sie einer weitergehenden Vorbereitung bedürft hätten.

Systeme und Werkzeuge für Gruppenarbeit (Groupware) sowie Ablaufplanung und -steuerung (Workflow-Management) bieten informations- und kommunikationstechnische Lösungen zur Unterstützung kooperativer Organisationsformen. Auf diese Weise können der Zeitaufwand für notwendige Verwaltungstätigkeiten sowie Kommunikation und Informationsbeschaffung reduziert sowie unproduktive Zeiten vermieden werden (vgl. **Bild 1**). Im folgenden soll auf die Bedeutung von Workflow-Management-Systemen für die integrierte Produktentwicklung näher eingegangen werden.

3 Modellierung des Produktentwicklungsprozesses erforderlich

Die "Workflow Management Coalition", ein internationaler Zusammenschluß von Systemanbietern mit dem Ziel der Entwicklung von Standards für Workflow-Management-Systeme, hat sich auf folgende Definitionen geeinigt /7/:

- **Process:** A coordinated (parallel and/or serial) set of process activities that are connected in order to achieve a common goal. A process activity may be a manual process activity and/or a workflow process activity.
- **Workflow:** The computerized facilitation or automated component of a process, i. e. that part of a process that is automatable using workflow software products.
- **Workflow Management System:** A system that completely defines, manages and executes workflows through the execution of software whose order of execution is driven by a computer representation of the workflow process logic.

Bevor ein Prozeß über ein Workflow-Management-System verwaltet werden kann, muß dieser definiert und modelliert werden. Ein Prozeßmodell läßt sich aus vier Sichten beschreiben /3/:

- **Organisationssicht** (wer ist in welcher Rolle am Prozeß beteiligt?),
- **Datensicht** (welche Daten werden für die Ausführung des Prozesses benötigt, welche Daten werden während der Ausführung erzeugt und in welcher Beziehung stehen diese Daten zueinander?),
- **Funktionssicht** (welche Ablauffolge und welche Bearbeitungsformen sind erforderlich?),
- **Steuerungssicht** (welche Verbindungen bestehen zwischen Funktionen, Organisation und Daten).

Diese Einteilung findet sich in Modellierungswerkzeugen wie ARIS Toolset[®] von IDS Prof. Scheer wieder. Die Modellierung von Geschäftsprozessen ist für die Transparenz der unternehmensinternen und unternehmensübergreifenden Abläufe unerlässlich. Mit Hilfe von Prozeßmodellen lassen sich Ist-Zustände abbilden und über Schwachstellenanalysen in Soll-Konzepte überführen, die es anschließend organisatorisch umzusetzen gilt (Re-Engineering). Prozeßmodelle sind nicht nur für die administrativen Bereiche eines Produktionsunternehmens von Bedeutung, sondern im besonderen Maße auch für die Produktent-

wicklung mit dem Ziel eines Simultaneous Engineering. Angesichts der Komplexität und Dynamik des Produktionsprozesses ist allerdings ein vernünftiges Verhältnis zwischen Vollständigkeit und Detaillierungsgrad der Modelle wichtig.

Prozeßmodelle dienen somit zum einen als Grundlage für organisatorische Veränderungen, eignen sich zum anderen aber auch (in Abhängigkeit von der Spezifikation) zur Übernahme in Workflow-Management-Systeme, wo sie als formal dargestellte Prozeßlogik für die Planung und Steuerung der betrachteten Abläufe eingesetzt werden können.

4 Besondere Anforderungen der Produktentwicklung an Systeme zur Ablaufplanung und -steuerung

Bestehende Systeme zur Planung und Steuerung betrieblicher Abläufe entstanden aus Werkzeugen zur Büroautomation und orientieren sich deshalb sehr stark an administrativen Geschäftsprozessen. Diese zeichnen sich in der Regel durch eine einfache Struktur und zeitliche Invarianz aus, weshalb sich die Definition von Referenzprozessen und deren Umsetzung in ein Workflow-Management-System aufgrund der geringen Komplexität und der längerfristigen Gültigkeit unproblematisch gestaltet.

Im Gegensatz zu den meisten betriebswirtschaftlichen Geschäftsprozessen zeichnet sich die Phase der Produktentwicklung unter Einbeziehung weiterer technischer Planungsbereiche durch hohe Komplexi-

tät und Dynamik aus. Produktentwicklungsprozesse können sich selbst noch während ihrer Ausführung verändern, da auf veränderte Randbedingungen (z. B. Marktanforderungen, neue Technologien, veränderte Zulieferkonditionen) schnell reagiert werden muß. Bei einem alleinigen Einsatz von starren Prozessen müßten hier sämtliche in der Zukunft möglicherweise auftretenden Teilprozesse vorab modelliert und integriert werden, was zu extrem unübersichtlichen und damit teuer zu implementierenden Gesamtprozessen führt. Aus diesen Gründen sind Workflow-Management-Systeme für administrative Geschäftsabläufe zur Planung und Steuerung technischer Aktivitäten ungeeignet.

Trotzdem werden Anstrengungen unternommen, die Workflow-Management-Strategie in die Produktentwicklung und andere technische Planungsbereiche einzuführen, um ein effizientes Simultaneous Engineering zu gewährleisten. Systeme des Produktdaten-Managements (PDM) werden mit Workflow-Modulen ausgestattet, die bislang allerdings eher prozeßdokumentierenden als prozeßplanenden oder -steuernden Charakter haben und allenfalls ein Engineering Change Management ermöglichen. Ferner gestaltet sich die (evtl. vorhandene) Verknüpfung mit den im PDM-System abgelegten Produktstrukturen und -konfigurationen als sehr starr. Schnittstellen zu Modellierungswerkzeugen fehlen.

Das Produkt SiFrame[®] der Firma SiFrame Software Technologies stellt das zur Zeit einzige Prozeßplanungs- und -steuerungssystem dar, das speziell für

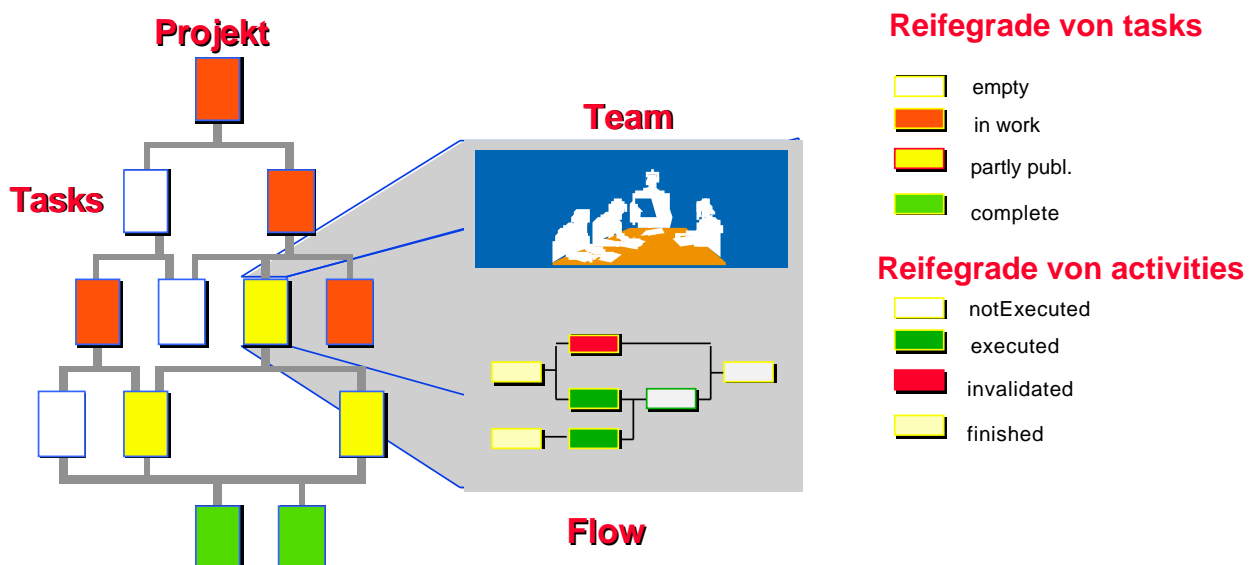


Bild 2: Mit der Darstellung der Reifegrade von Tasks und Activities wird der Projektstatus in der Produktentwicklung transparent gemacht /1/

den Bereich der Produktentwicklung konzipiert wurde. Im Gegensatz zu den für klar strukturierte und lineare Prozesse ausgelegten Workflow-Management-Systemen des administrativen Bereichs bietet die Funktionalität von SiFrame[®] die Möglichkeit, komplexe, dynamische, u. U. unstrukturierte Prozesse zu planen und zu steuern (s. **Bild 2**). Besonderer Wert wurde dabei auf das Durchspielen von "Was-wäre-wenn"-Szenarien gelegt. Auf diese Weise können die Auswirkungen von Prozeßveränderungen auf nachgelagerte Aktivitäten simuliert werden. Für die integrierte Produktentwicklung ist dies von entscheidender Bedeutung. Ferner bietet SiFrame[®] die Möglichkeit zur Integration heterogener Systemwelten, wie sie heute in den technischen Bereichen der Produktionsunternehmen in der Regel anzutreffen sind. Bei Betrachtung der technischen Auftragsabwicklung als Gesamtprozeß stellt dieser Aspekt der Systemintegration einen entscheidenden Erfolgsfaktor für das Prozeß-Management dar (s. **Bild 3**).

5 Merkmale der Produktstruktur bestimmen Abläufe in der technischen Auftragsabwicklung

In den meisten Fällen werden neue oder veränderte Abläufe nicht durch eine bewußte Neustrukturierung der Prozesse selbst, sondern durch Neueinführung bzw. Modifikation der zu bearbeitenden Inhalte (Work Items) bedingt. Dies gilt für die Produktentwicklung in besonderem Maße: Neue oder modifizierte Produktstrukturen bedingen automatisch neue oder geänderte Abläufe in der technischen Auftragsabwicklung. Grundsätzlich lassen sich vier Fälle unterscheiden:

- 1) Für eine neue Produktstruktur werden Abläufe erstmalig geplant und durchlaufen.
- 2) Innerhalb einer bestehenden Produktstruktur werden Merkmale in solcher Weise verändert, daß ein erneutes Durchlaufen der betroffenen Entwicklungsprozesse ohne Einfluß auf die Teilabläufe erforderlich ist (z. B. Austausch des Armaturenbretts in einem Pkw).
- 3) Die Merkmaländerungen innerhalb der Produktstruktur bedingen eine Iteration im Produktentwicklungsprozeß mit veränderten, vorher jedoch modellierten Teilabläufen (z. B. Ersatz eines Blechteils durch ein Kunststoffteil).
- 4) Die Produktstruktur wird um ein Objekt erweitert, für das u. U. noch keine Ablaufmodellierung durchgeführt wurde, der Iterationsprozeß muß vor der Ausführung noch geplant werden (z. B. nachträgliche Konzeption einer Zusatzheizung wegen eines unerwartet hohen Wirkungsgrades bei einem neu entwickelten Pkw-Motor).

Für neue Produkte müssen die Abläufe in der technischen Auftragsabwicklung in Abhängigkeit von den Merkmalen der Produktstruktur geplant werden. Änderungen innerhalb bestehender Produktstrukturen führen zu einer Revision des Entwicklungsprozesses und einer Invalidation von Entwicklungsergebnissen. In beiden Fällen ist es im Sinne einer integrierten Produktentwicklung wünschenswert, rechtzeitig eine Abstimmung mit den betroffenen Unternehmensbereichen und mit den Zulieferern vornehmen zu können (s. **Bild 4**). Zur effizienten Koordinierung dieses Abstimmungsvorgangs ist deshalb eine Verknüpfung

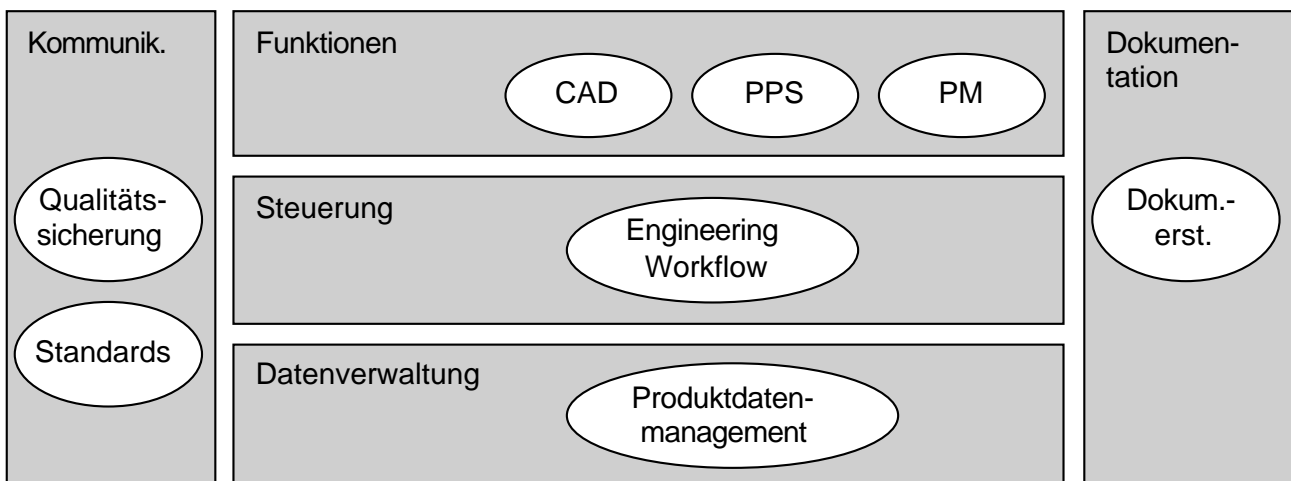


Bild 3: Die Integration heterogener Systemwelten gehört zu den Hauptanforderungen an ein Workflow-Management-System für die Produktentwicklung /1/

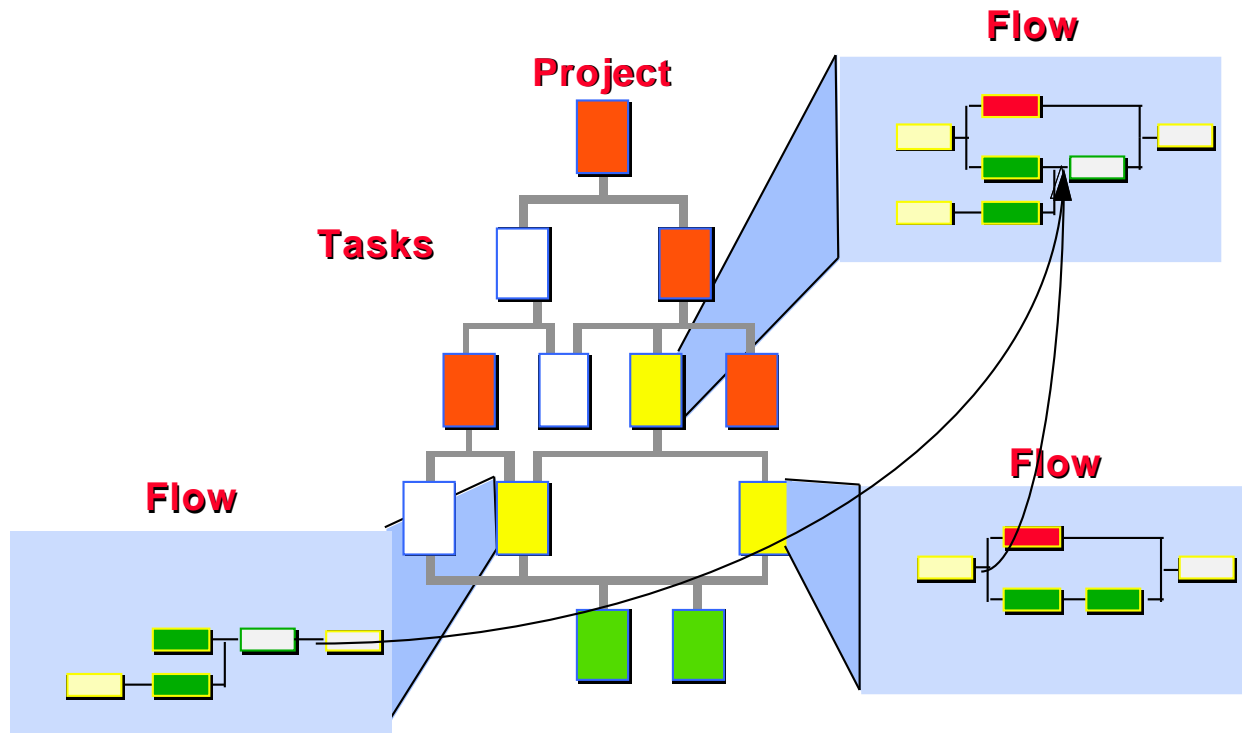


Bild 4: Die Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen Teilprozessen ist für die Planung und Steuerung einer integrierten Produktentwicklung von entscheidender Bedeutung /1/

der Produktstruktur mit den Teilprozessen der technischen Auftragsabwicklung erforderlich. Auf Systemebene bedeutet dies die intelligente, dynamische Verknüpfung eines Produktdaten-Management-Systems mit einem für die Produktentwicklung geeigneten Workflow-Management-System.

6 Euro-Projekt CONFLOW

Die Schaffung einer geeigneten Verknüpfung zwischen den beiden genannten Systemen bildet das Ziel des Euro-Projektes "Concurrent Engineering Workflow (CONFLOW)", das von der Europäischen Union im Rahmen des Forschungsprogrammes "International Cooperation" (INCO-COPERNICUS) über einen Zeitraum von drei Jahren gefördert wird. Das Projekt soll am 1. Januar 1997 beginnen und wird vom IMW koordiniert. Zusammen mit Partnern aus Hochschulen (University of Wales Cardiff, GB; TU Budapest, HU; University of Rouse, BG) und der Industrie (Mummert + Partner Unternehmensberatung AG, D; SAGE Ltd., HU; ZITA Ltd., BG) soll ausgehend von Fallstudien und einer eingehenden Analyse integrierter Produktentwicklungsprozesse ein Konzept für die Verknüpfung der beiden genannten Systeme

erarbeitet und abschließend prototypisch umgesetzt werden. Um die erforderliche Flexibilität und Dynamik zu gewährleisten, werden im Projekt zum einen weniger starre Beschreibungsmittel für die Steuerungssicht und zum anderen die Möglichkeit, Teilabläufe dynamisch ändern zu können, vorgesehen. Grundlegender Lösungsansatz ist dabei, Teilabläufe objektorientiert mit der Produktstruktur zu verknüpfen, da - wie bereits erläutert - Veränderungen in der Produktstruktur in der Regel eine Modifikation der Prozesse bewirken. Die ablaufrelevanten Aspekte der Produktstruktur (Datensicht), welche typischerweise in Systemen des Produktdatenmanagements (PDM) verwaltet wird, lassen sich in Form einer attributierten Stücklisten oder auch Merkmalleisten mit den Ebenen Produkt, System, Aggregat, Baugruppe und Einzelteil beschreiben. Jedes Element dieser Struktur läßt sich dabei als Objekt auffassen, dem ein Teilprozeß beschrieben durch Kontrollfluß, Datenfluß sowie organisatorische und technologische Randbedingungen zugeordnet ist. Durch Hinzunahme deskriptiver Randbedingungen zu den klassischen Beschreibungsmitteln Kontroll- und Datenfluß läßt sich dabei die erforderliche Flexibilität gewährleisten, da die Flüsse den Ablauf nicht mehr bis ins Detail determinieren müssen.

Die Planung des Entwicklungsprozesses wird unterstützt, indem Objekte der Produktstruktur mit den zugehörigen Teilprozeßbeschreibungen in einer Bibliothek hinterlegt und werkzeuggestützt entsprechend den Beziehungen innerhalb der Produktstruktur miteinander verknüpft werden.

Bei dieser Verknüpfung kann auch eine Verfeinerung der Kontroll- und Datenflüsse sowie der zusätzlichen Randbedingungen erforderlich sein. Die Vererbungsmechanismen der Objektorientierung lassen sich dabei sowohl zur Organisation der Bibliothek als auch zur Verfeinerung im Rahmen der Verknüpfung einsetzen.

Aufgabe im Rahmen des Projektes ist, die Mittel zur Modellierung von Kontroll- und Datenflüssen sowie organisatorischen und technologischen Randbedingungen auszuwählen und in einem Planungswerkzeug zu realisieren (wobei ggf. auf ein existierendes Werkzeug wie ARIS Toolset[®] aufgesetzt wird). Für eine Pilotanwendung ist auf der Basis eines konkreten Produktentwicklungsprojektes eine Teilprozeßbibliothek zu erstellen und mit der Produktstruktur dynamisch zu verknüpfen. In Verbindung mit SiFrame[®] (s. Abschnitt 4) und einem kommerziellen PDM-System soll die entwickelte Funktionalität prototypisch implementiert, verifiziert und validiert werden.

6 Optimiertes Simultaneous Engineering

Das beschriebene Konzept eines über die Produktstruktur gesteuerten Workflow-Managements bildet die Grundlage für eine koordinierte integrierte Produktentwicklung. In Verbindung mit geeigneter Groupware und Kommunikationshilfsmitteln wie E-Mail, FTP, Teleconferencing führt dies aufgrund der folgenden Aspekte zu einer erheblichen Verbesserung des "klassischen" Simultaneous Engineering:

- Prozeßtransparenz, d. h. die Prozeßmodelle verdeutlichen die Auswirkungen von Veränderungen der Produktstruktur auf den Gesamtprozeß; die in den Entscheidungsprozeß einzubeziehenden Unternehmensbereiche werden automatisch identifiziert;
- das Durchspielen von "Was wäre wenn"-Szenarien läßt sich ohne großen Aufwand praktizieren,
- Kommunikation und Informationsaustausch zwischen den Teammitgliedern können im Falle eines konkreten Abstimmungsbedarfs jederzeit erfolgen,
- Abstimmung und Entscheidungsfindung können auch bei verteilten Entwicklungsstandorten und unter Einbindung externer Zulieferer stattfinden;
- die Experten können während der Kommunikation mit den übrigen Teammitgliedern in ihren eigenen Bereichen verbleiben,
- die Abstimmung im Team muß nicht notwendigerweise unter zeitgleicher Beteiligung aller Teammitglieder stattfinden; in einem solchen Fall sind allerdings Terminvorgaben für die Bearbeitung einer bestimmten Aufgabe vorzusehen;
- Entscheidungen, die einer gründlicheren Vorbereitung bedürfen, können problemlos wiederholt diskutiert werden,
- die physischen Teamzusammenkünfte lassen sich auf die Diskussion komplexer Aufgaben und Probleme beschränken.

Literatur

- /1/ Prengemann, U.: Workflow in der industriellen Produktentwicklung am Beispiel von SIFRAME, Vortrag auf dem 4. Forum Vorgangsbearbeitung, Frankfurt/Main, 18./19. September 1996
- /2/ Reinwald, B.: Workflow-Management in verteilten Systemen, Stuttgart/Leipzig, 1995 (Teubner)
- /3/ Scheer, A.-W.: Wirtschaftsinformatik - Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse, Berlin etc., 1994 (Springer)
- /4/ Siframe Software Technologies GmbH: Um Längen voraus: SiFrame[®] revolutioniert Ihre Engineering-Prozesse, München, 1996
- /5/ Steinmetz, O.: Die Strategie der Integrierten Produktentwicklung - Softwaretechnik und Organisationsmethoden zur Optimierung der Produktentwicklung im Unternehmen, Braunschweig /Wiesbaden, 1993 (Vieweg)
- /6/ Vossen, G.; Becker, J.: Geschäftsprozeßmodellierung und Workflow-Management - Modelle, Methoden und Werkzeuge, Bonn/Albany, 1996 (Internat. Thomson Publ.)
- /7/ Workflow Management Coalition, Glossary - A Workflow Management Coalition Specification, Brüssel, 1994

Verwendung der ISO 13584 „Parts Library“ unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen in der Konstruktion

Dietz, P.; Ort, A.

Aufgrund der Integration von rechnergestützten Anwendungen in der Konstruktion ist es mittlerweile Stand der Technik, Katalogteile (Wiederholteile oder Normteile) in einem elektronischen Katalog zu suchen und direkt in ein CAD-System einzubinden. Die Katalogstruktur ist dabei häufig dem Zulieferer überlassen. Das Funktionsangebot der elektronischen Kataloge liegt in der Hand der Systemhäuser, die solche mit ihrer Software vertreiben. Während es in Kürze eine internationale Norm zur Strukturierung von Teilebibliotheken geben wird (ISO 13584), bleibt die Funktionalität von Katalogsystemen weiter offen. Dieser Artikel beschäftigt sich mit den Mindestanforderungen an solche Systeme aus der Sicht des Konstrukteurs und nimmt dabei auf die Besonderheiten der ISO 13584 Rücksicht.

The integrated use of part catalogues in a CAD system is state of the art. The structure of such part catalogues is mainly in the responsibility of the suppliers; the design of them is mainly done by the vendors. The forthcoming ISO 13584 will describe the structure of such catalogues. However, the design and their functionality in application is still open to discussion. This paper will present minimal requirements for part catalogues, taking especially care of the needs of the mechanical engineer and the designer.

1 Einleitung

Die Produktbeschreibungen in Katalogen bestehen aus einer Beschreibung von Familien, Berechnungsformeln sowie den zur Verfügung stehenden Einzelteilen. Im folgenden soll immer von Katalogteilen die Rede sein; damit sind Norm-, Wiederhol- oder Zukaufteile gemeint, die in Katalogen beschrieben sind.

Um die Zielgruppen für den entstehenden Standard ISO 13584 besser beschreiben zu können, soll zwischen den folgenden Gruppen unterschieden

werden: Der Zulieferer (*supplier*) ist der Anbieter von Teilen bzw. Teilefamilien. Er produziert und vertreibt eine Produktpalette von Konstruktionselementen für verschiedene Anwendungsgebiete. (Der Standard ISO 13584 ist ausdrücklich nicht nur für Konstruktionselemente entwickelt worden. Er ist für jede beliebige Klassifizierung und Strukturierung von Diskurswelten verwendbar.)

Im Bereich der Katalogteile haben sich die Kataloganbieter (*vendor*) als eine weitere Gruppe herausgebildet. Sie nehmen die Produktinformationen der Zulieferer auf und bieten sie in einem eigenen System an. Diese Gruppe bereitet also Daten nochmals auf und versucht sie der dritten Gruppe, den Endanwendern (*end-user*), auf komfortable Art und Weise zur Verfügung zu stellen.

Unter Endanwendern sollen schließlich die Konstruktionsabteilungen oder -büros verstanden werden, die vornehmlich Teile in Katalogen suchen und sie in ihre Konstruktion einbringen.

Es ist selbstverständlich, daß die skizzierten Gruppen nicht in allen Fällen exakt zu trennen sind. Zum Beispiel bieten namhafte Anbieter von Lagerkomponenten nicht nur ihre Produkte an, sondern liefern hierzu auch eine entsprechende Auswahlsoftware mit einer Schnittstelle zu einem CAD-System. Die erste und die zweite Gruppe treten hier als eine Institution auf. Ebenso gibt es in größeren Firmen Abteilungen, die für die eigenen Konstruktionsabteilungen die Aufbereitung übernehmen und bereits eine Vorauswahl des Sortimentes treffen. Hier sind die beiden letztgenannten Gruppen in einer Firma vereint.

Dennoch muß deutlich zwischen den Aufgaben und den damit verbundenen Interessen dieser Gruppen unterschieden werden. Sie alle können von der ISO 13584 profitieren, die Anforderungen unterscheiden sich jedoch sowohl im Hinblick auf die Norm an sich als auch auf den darauf aufsetzenden Systemen.

Die Gesamtproblematik von Teilekatalogen nach ISO 13584 wurde in dem von der EU geförderten ESPRIT III-Projekt Nr. 8984 „PLUS“ behandelt. Dieses Projekt wurde im Oktober 1996 von der EU als positiv begutachtet und abgeschlossen. Die hier dargestellten Sachverhalte beziehen sich auf dieses Projekt und gehen ausschließlich auf die Anforderung der Endanwender (Konstrukteure) an eine Teilebibliothek ein.

Die Akzeptanz des neuen Standards für die Endanwender wird nur dann erreicht, wenn sich die Neuerungen als Verbesserung und Beschleunigung des Konstruktionsprozesses auswirken. Der Konstrukteur darf daher eine Funktionalität erwarten, die über eine einfache Digitalisierung der herkömmlichen Papierkataloge hinausgeht. Im nächsten Kapitel werden Anforderungen an rechnergestützte Kataloge aus den Minimalanforderungen an Papierkataloge abgeleitet. Anschließend soll auf die Besonderheiten der ISO 13584 eingegangen werden, die zu einer Erweiterung der Systemfunktionalität führen könnten. Abschließend erfolgt ein Abgleich mit den gestellten Anforderungen und ein Ausblick auf mögliche Änderungen im Konstruktionsverhalten.

2 Anforderungen

Ein Blick in die Literatur (z.B. /1, 2, 3, 8, 9/) vermittelt vier Sparten von Anforderungen an Teilekataloge, die für den Endanwender mehr oder minder gleichwertig sind.

- Ein Katalog bildet eine Informationsgrundlage für Entscheidungen, die im Laufe des Konstruktionsprozesses getroffen werden müssen. Die hierzu gehörenden Anforderungen betreffen den Inhalt der Kataloge.
- Bezüglich des Aufbaus von Katalogen und der Präsentation des Inhalts kann der Endanwender weitere Forderungen stellen, die unter der Sparte Handhabung zusammengestellt werden sollen.
- Ein Arbeiten mit Katalogen impliziert die Einbindung in den Konstruktionsprozeß des Endanwenders. Die hiermit assoziierten Wünsche werden unter die Sparte mit dem allgemeinen Begriff Entwicklungsprozeß gestellt.
- Letztlich muß darauf eingegangen werden, daß

die Konstruktion heute rechnergestützt abläuft, d.h. an elektronische Kataloge werden bestimmte Schnittstellenforderungen und Erwartungen für Arbeitserleichterungen gestellt. Sie sollen in der Sparte Systemunterstützung aufgeführt werden.

Diese Anforderungsgruppen gehen ausschließlich auf die Bedürfnisse des Endanwenders ein. Im folgenden wird für jede der Sparten eine Trennung in klassische Anforderungen (für Papierkataloge) und sich neu entwickelnde Anforderungen (für rechnergestützte, elektronische) Kataloge vorgenommen.

Informationsgrundlage

Zuliefererkataloge bilden eine Entscheidungsgrundlage. Die in ihnen enthaltenen Informationen müssen deswegen vollständig, widerspruchsfrei und korrekt sein. Sie müssen sowohl schnelle Vorabinformationen über Familien, aber auch eine detaillierte Auswahl von Teilen bieten. Mögliche Beispiele und Anwendungen erleichtern die Entscheidungen. Aktualität versteht sich von selbst. Gerade bei elektronischen Katalogen, die online angeboten werden, wird eine permanente Aktualisierung erwartet. Darüber hinaus läßt bei elektronischen Katalogen der Einsatz von Netzwerktechnologien einen übergreifenden und weltweiten Überblick und Zugriff erwarten.

Handhabung

Kataloge sollen den Informationsfluß vom Anbieter (Zulieferer oder Kataloganbieter) zum Endanwender verbessern. Die in Zuliefererkatalogen zusammengestellten Informationen müssen deswegen leicht und gemäß der Kriterien des Endanwenders zugänglich sein. Dies bedeutet auch, daß ein Katalog Konstrukteuren mit unterschiedlichen Erfahrungen, Kenntnisständen und Zielsetzungen gleichermaßen genügen sollte. Ferner ist hierunter zu verstehen, daß ein Katalog den unterschiedlichen Phasen des Konstruktionsprozesses angepaßt sein muß und den jeweils unterschiedlichen Informationsbedarf in diesen Phasen befriedigen muß. Darunter kann z.B. eine vergleichende Leistungsbetrachtung unterschiedlicher Lösungsmöglichkeiten in der Konzeptphase, die Einbindung in ein CAD-System in der Ausarbeitungsphase oder eine einfache Bestellmöglichkeit verstanden werden. Wichtige Informationen müssen schnell auffindbar, Ergebnisse leicht

umsetzbar sein. Grundlegend ist jedoch, daß die Struktur der Kataloge für einen allgemeinen Kreis offen sein muß.

Das Arbeiten mit Papierkatalogen (wie generell das Arbeiten mit Papier) schließt eine Assoziation von Information, Ort der Information und prägnanter Darstellung (etwa Symbole, Grafiken, Farben etc.) mit ein. Papierkataloge sind deswegen auch Assoziationshilfen, mit denen einmal gefundene Lösungen leichter rekapituliert werden können.

Für elektronische Zulieferkataloge ergibt sich die Forderung nach einer eingängigen und nach ergonomischen Gesichtspunkten gestalteten Benutzeroberfläche und einer flexiblen Konfigurierung der Suchmechanismen. Schwieriger wird die Einhaltung der Assoziationshilfen. Grafiken (etwa als Prinzipbilder, siehe /7/) sind hier sicherlich ein wichtiges Element. Sie können auch als zusätzlicher Informationsträger auftreten. Ein Beispiel hierfür ist die Zuordnung von Maßbuchstaben zu bemaßten Elementen. Sicherlich sind Grafiken aber nicht die einzigen Möglichkeiten. Als Assoziationshilfen können beispielsweise auch Referenzen (*bookmarks*) dienen.

Entwicklungsprozeß

Kataloge sollten in einem möglichst breiten Zeitraum des Konstruktionsprozesses eingesetzt werden können. An dieser Stelle fügt sich die oben genannte Forderung nach genereller Familieninformation und detaillierter Teileinformation ein: Am Anfang der Gestaltungsphase sollte es möglich sein, sich durch allgemeine Informationen über eine Familie einen Überblick zu verschaffen, während zu einem späteren Zeitpunkt die expliziten Randbedingungen zu spezifischen Suchabfragen im Katalog führen. Die Beschreibung der Funktion als Informationsgrundlage zum Katalogteil läßt die Frage nach dem Zeitpunkt der Anwendung offen.

Hieraus leitet sich die Anforderung nach unterschiedlichen Sichten des gleichen Sachverhaltes ab. Zum einen stellen unterschiedliche Detaillierungsebenen nur verschiedene Sichtweisen auf ein und dieselbe Familie dar. Zum anderen lassen sich mit Sichten auch besondere Merkmale hervorheben und damit Such- und Entscheidungskriterien konfigurieren. Suche und Auswahl von Katalogteilen sollte

demnach durch verschiedene Merkmale möglich sein.

Das Sichtenkonzept läßt sich bei elektronischen Katalogen relativ einfach realisieren und sollte deswegen als Anforderung für dieses Medium nicht fehlen.

Systemunterstützung

Grundanforderung für elektronische Kataloge ist die Schnittstelle zu CAD-Systemen. Die ausgewählten Teile sollen über eine Geometrieschnittstelle die Konstruktionsumgebung des CAD Arbeitsplatzes eingefügt werden können. Darüber hinaus gibt es noch eine Vielzahl von weiteren Möglichkeiten, die bei rechnergestützten Katalogen denkbar sind. Dies sind zum Beispiel eine automatische Bestandsüberwachung bei jedem Zugriff, die Einbindung von Berechnungs- und Auslegungsprogrammen, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Auswahl- und Bewertungsverfahren.

Neben diesen Möglichkeiten, die für eine selektierte Auswahl von Teilen nach einer Suche im Katalog zutreffen, sind die Suchmöglichkeiten selbst flexibel zu gestalten (siehe auch Handhabung und Entwicklungsprozeß).

3 Besonderheiten der ISO 13584

Das Kernschema des umfangreichen Standards ISO 13584 "Parts Library" ist der Teil 42 /5/, der das Metaschema für eine Teilebibliothek beschreibt. (Der Begriff Teilebibliothek soll in diesem Artikel im Sinne von Teilekatalog gemäß ISO 13584 verwendet werden.) Einen Ausschnitt des Modells zeigt **Bild 1** in EXPRESS-G Notation /6/. Der Teil 42 enthält die Grundstruktur und die wesentlichen Relationen einer Teilebibliothek. Dies sind:

- Ein Referenzmechanismus, der eine strikte Trennung zwischen Inhaltsbeschreibung und tatsächlichem Inhalt einer Teilebibliothek ermöglicht (BSU als *basic semantic unit*).
- Die Einführung von Klassen (im Sinne von EXPRESS /6/) für Familienbeschreibung (*component_class* als Unterklasse von *class*) und von Merkmalen (*properties*).
- Die Zuordnung und Definition von Familien und

Merkmale. Dahinter steht das Prinzip der gegenseitigen Definition: Eine Familie wird mit Merkmalen beschrieben; die Merkmale sind aber nur im Zusammenhang mit einer Familie sinnvoll zu verwenden.

- Die Einführung von Klassenmerkmalen für Familien, die für alle Objekte (d.h. Teile) der Klasse (d.h. Familie) den gleichen Wert haben.
- Die weltweit eindeutige Referenzierung einer Klasse (d.h. jeder Familie und jeden Merkmals in Abhängigkeit der Familie)
- Ein Mechanismus zur Übersetzung der beschreibenden Information in beliebige Sprachen.

Das Sichtenkonzept (*is_view_of* Relation), die *is_case_of* Relation und die Strukturen für die Inhalte einer Teilebibliothek wird in Teil 24 des Standards /4/ beschrieben.

Im Rahmen dieser Untersuchung sollen die Modellstrukturen der ISO 13584 herausgegriffen werden, die bislang eine konkrete und feste Form angenommen haben und für den Endanwender wichtige Handhabungsfunktionen ermöglichen.

Suche über mehrere Zulieferer (*multi supplier search*)

Teileinformationen unterschiedlicher Zulieferer finden sich in getrennten Katalogen, weil diese

gleichzeitig auch Aushängeschild und Werbebroschüre des Zulieferers sind. Kataloganbieter sind zwar in der Lage, mehrere Kataloge (auch unterschiedlicher Zulieferer) in einer einheitlichen Form weiterzugeben, doch ist das Angebot von den einzelnen Verträgen mit den entsprechenden Zulieferern abhängig. Ein Katalog eines Anbieters garantiert zudem nicht automatisch die direkte Vergleichbarkeit von Katalogteilen unterschiedlicher Zulieferer. Dies liegt auch an der bereits unterschiedlichen Strukturierung der Informationen seitens der Zulieferer.

Eine über mehrere Zulieferer übergreifende Suche erfordert ein Modell, welches eine Verknüpfung zwischen Katalogteilen erlaubt. Es muß angegeben werden können, daß zwei Katalogteile gleich sind (im Sinne ihrer Merkmale und ihrer Verwendung), auch wenn sie unterschiedlich benannt, verbal beschrieben oder unterschiedlich in eine Teilefamilienhierarchie eingeordnet sind. Voraussetzung hierfür ist, daß die Katalogteile bereits mit der gleichen Methode (etwa nach ISO 13584 Teil 42) beschrieben sind.

In /4/ ist dies die sogenannte *is_case_of* Relation („in der Art von“). Eine Familie A ist *case_of* einer Familie B, wenn die Beschreibung mit Merkmalen der Familie A Merkmale der Beschreibung der Familie B verwenden kann. Hierbei werden die Merkmale von A den entsprechenden Merkmalen von B eineindeutig

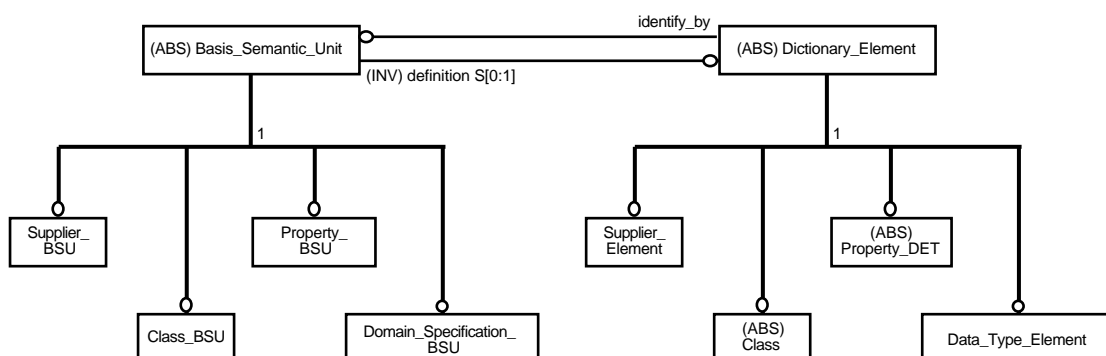


Bild 1: Grundgerüst der ISO 13584 (aus /5/)

zugeordnet.

Für die Suche nach Katalogteilen ergibt sich somit: Wenn Teile nach den Merkmalen von B ausgesucht werden sollen, dann werden aufgrund der zuvor definierten *case_of* Relation ebenso die Merkmale von A mit abgesucht. Werden die Familien A und B von unterschiedlichen Zulieferern angeboten, dann erlaubt dieser Mechanismus eine übergreifende Suche; vorausgesetzt, beide Zulieferer haben ihre Kataloge gemäß der ISO 13584 strukturiert.

Einsatz von generischen Familien (*generic families*)

Die ISO 13584 unterscheidet zwischen generischen (*generic families*) und Basisfamilien (*simple families*). Generische Familien sind als übergeordnete Familie zu verstehen, die wiederum weitere (Basis-) Familien subsummieren. So kann z.B. eine Familie Riemen als generische Familie der Basisfamilien Zahnriemen, Keilriemen und Flachriemen gesehen werden.

Die ISO 13584 Teil 42 gibt Zulieferern und Kataloganbietern Regeln an die Hand, wie Teilekataloge gemäß des Standards strukturiert werden sollten. Eine Regel besagt, daß generische Familien nur dann eingeführt werden sollen, wenn die Familie eine sinnvolle Auswahl für den Endanwender in einer seiner Konstruktionsphasen bieten (siehe auch /5/, Regel 3: „*Instanciation Rule*“). Das oben angeführte Beispiel böte Konstrukteuren die Möglichkeit, in einer frühen Phase nur mit dem Konstruktionselement Riemen zu arbeiten und erst später genauer zu spezifizieren (oder zu entscheiden), ob es sich hierbei um einen Zahn-, Keil- oder Flachriemen handeln soll.

Generische Familien bieten zudem die Möglichkeit Merkmale zu definieren, deren Werte für eine Unterfamilie gleich sind (familienkonstante Merkmale, *class valued properties*). Ein Merkmal schlupffrei etwa könnte für die Familie Riemen definiert werden. Es hätte den Wert JA für alle Teile der Zahnriemenfamilie und den Wert NEIN für alle Teile der Keil- und Flachriemenfamilien. Mit diesen familienkonstanten Merkmalen wird eine andere Sichtweise und somit eine andere Suchmöglichkeit auf die Familien eröffnet. Der Konstrukteur ist nicht gezwungen der starren Strukturierung in drei Unterfamilien zu folgen, sondern er kann ebenso nach dem Kriterium

schlupffrei seine Teile suchen und auswählen. Damit werden familienkonstante Merkmale zu einem wichtigen Instrumentarium für eine flexible Handhabung von Teilebibliotheken.

Das Sichtenkonzept (*is_view_of* Relation)

Zur Beschreibung der Familien und Teile an sich wird in der ISO 13584 das sogenannte allgemeine Modell (*general model*) herangezogen. Daneben ist ein funktionales Modell (*functional model*) vorgesehen, mit dem weitere Merkmale definiert werden können, die nicht zu der ursprünglichen Definition von Familien gehören. Es ist das funktionale Modell, welches die Spezifikation von Sichten aufnimmt und es ist die Sichtenrelation (*is_view_of* Relation), die die Verbindung von Familien zu Sichten herstellt.

Sichten dienen dazu, einen besonderen Ausschnitt oder sogar zusätzliche Informationen über eine Familie oder Teile anzubieten. Die zusätzlichen Merkmale können ebenso als Auswahlkriterium herangezogen werden wie die allgemeinen Merkmale auch. Das am häufigsten verwendete Beispiel ist eine Sicht auf die Kosten eines Teiles. Die Merkmale Kosten und Lieferzeit sind nur im Zusammenhang mit einem Teil sinnvoll. Deswegen kann diese Sicht von vornherein im Hinblick auf ein Teil gestaltet werden und wird deswegen a priori Sicht genannt. Sie unterscheidet sich von der a posteriori Sichtweise, bei der die Verknüpfung zwischen Sichtenmerkmalen und den Merkmalen Teil erst zu einem späteren Zeitpunkt von Kataloganbietern oder Endanwendern vorgenommen wird. Ein Beispiel hierfür wäre eine Sicht auf Features eines Teiles, die nachträglich an ein Teil angebracht werden (nachträglich angebrachte Bohrung an Riemenscheiben).

Die Sichtenrelation verknüpft eine definierte Sicht mit einer (generischen) Familie. Die Sicht steht dann sowohl für diese Familie wie auch für alle weiteren Unterfamilien zur Verfügung und kann nach Belieben zugeschaltet werden. Suchabfragen können Merkmale der Sicht hinzuziehen, die Wahl einer Sicht kann für die momentane Situation wichtige Merkmale hervorheben und unwesentliche ausblenden.

Sichten dienen nicht der Strukturierung von Familienhierarchien, aber sie erweitern die Informationsgrundlage für den Endanwender.

4 Vergleich mit den Anforderungen

Eine Gegenüberstellung der Anforderungen mit den zur Verfügung gestellten Funktionalitäten der ISO 13584 ergibt ein gemischtes Bild. Es zeigt sich, daß der Standard wichtige Modelle für eine gute Strukturierung anbietet, die auch wirkungsvoll für den Konstrukteur in unterstützende Funktionen umgesetzt werden können. Die die Informationsgrundlage betreffenden Anforderungen liegen hauptsächlich in der Verantwortung des Zulieferers. Dieser wird schon allein aus wettbewerblichen Gründen dafür sorgen, daß die Qualität der Daten hinreichend ist.

Die unten angeführte **Tab. 1** zeigt aber auch, daß die Hauptlast bei den Entwicklern eines Teilebibliotheks-

systems (*Library Management System*, LMS) liegt. Sie können zwar die vorgegebenen Strukturen nutzen, doch die primären Bedürfnisse des Konstrukteurs werden im wesentlichen durch Funktionen des LMS abgedeckt.

Die erste Spalte führt nochmals die Anforderungen aus Kapitel 2 auf. Markierungen in der zweiten Spalte („Bereitgestellt durch ISO 13584“) bedeuten, daß die Modelle der ISO 13584 eine Erfüllung der Anforderung ermöglichen. Dabei wird davon ausgegangen, daß LMS Entwickler diese Möglichkeiten auch nutzen werden (Spalte 3, „Angeboten durch LMS Funktionalität“). Weitere Markierungen in der dritten Spalte bedeuten, daß die Anforderung im wesentlichen

	Bereitgestellt durch ISO 13584	Angeboten durch LMS Funktionalität	In Verantwortung der Anbieter
Handhabung			
Verbesserung des Informationsflusses zwischen Anbieter und Endanwender			
Zugänglichkeit			
Schnelles Auffinden wichtiger Informationen			
Weitere Verwertbarkeit der Suchergebnisse			
Flexibilität den Bedürfnissen des Endanwenders entsprechend			
Prägnante Darstellung, Assoziationen			
Konfigurierbarkeit der Suchalgorithmen			
Ergonomische GUI			
Informationsgrundlage			
Vollständigkeit			
Widerspruchsfreiheit			
Korrektheit			
Aktualität			
Vorabinformation (Übersicht)			
beliebige Detailinformationen			
Entwicklungsprozeß			
breiterer Einsatzrahmen für Kataloge im Konstruktionsprozeß			
Suche nach unterschiedlichen Kriterien (Merkmalen)			
Sichtenkonzept			
Systemunterstützung			
CAD Schnittstelle (3D Geometrie Generierung)			
Bestandsüberwachung			
Berechnungsprogramme			
Bewertungsverfahren			

Tab. 1: Gegenüberstellung der Anforderungen und Funktionalitäten

durch eigenen Implementierungsaufwand erreicht werden kann, ohne dabei auf besondere Modellausschnitte der ISO 13584 zurückzugreifen. Die letzte Spalte schließlich („In Verantwortung der Anbieter“) hält die Anforderungen fest, die die Quelle von Kataloginformationen beachten muß.

An dieser Stelle muß auch erwähnt werden, daß es bereits Systeme gibt, die Kataloge in elektronischer Form mit einem Teil dieser Funktionalität anbieten, etwa Assoziationshilfen (Prinzipbilder), Suche nach unterschiedlichen Merkmalen, Berechnungsprogramme oder Übersetzungen. Als wirkliche Neuerungen für den Endanwender können deswegen nur die die Zulieferer übergreifende Suche und der Einsatz von generischen Familien genannt werden.

5 Zusammenfassung

Die modelltechnischen Vorteile der ISO 13584 müssen durch die Anbieter von Teilebibliothekssystemen weitergereicht werden. Dabei bieten sowohl die Zulieferer übergreifende Suche als auch der Einsatz von generischen Familien erhebliche Anwendungsvorteile für den Endnutzer, die bis jetzt nicht verwirklicht wurden.

Der Konstrukteur benötigt bei einem solchen System keinen konkreten Anbieter als Einstiegspunkt. Frei von Vorfixierungen kann er sich um die Auswahl eines Teiles nach funktionalen oder technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten kümmern. Erst wenn er fündig geworden ist, kann er die Information über den Zulieferer abfragen (z.B. um eine Bestellung aufzugeben oder die Lieferfähigkeit zu prüfen). Konstrukteure, die an Einkaufsrichtlinien gebunden sind, können nach wie vor ihre Suche auf einen Zulieferer einschränken, indem weitere Zulieferer mit Hilfe der Suchkriterien ausgeschlossen werden.

Die Neuerung bietet dem Konstrukteur eine große Auswahl an Katalogteilen, ohne daß er explizit in unterschiedlichen Katalogen nachschauen muß.

Bisher sind Teilekataloge auf die gestaltgebende Phase des Konstruktionsprozesses hin entworfen. Es wird davon ausgegangen, daß der Konstrukteur bei Verwendung eines Kataloges nicht nur im Prinzip weiß, welches Teil er sucht, sondern auch bereits die Dimensionierung vorgenommen hat. Die Suchkriterien sind daher sehr eng an die Fragen gebunden,

die typisch für die Detaillierungsphase sind und keine Freiheiten in der Wahl des Konstruktionskonzeptes mehr lassen. Mit der Einführung von generischen Familien kann eine Teilebibliothek auch in früheren Konstruktionsphasen eingesetzt werden und so auch z.B. den Vergleich unterschiedlicher Wirkprinzipien und die Wahl des Konzeptes unterstützen. In Anlehnung an das Beispiel aus Kapitel 3 könnte in die Konstruktion ein Riemen eingesetzt werden, ohne in dem Augenblick angeben zu müssen, ob ein reib- oder formschlüssiges Prinzip verwendet werden soll; vorausgesetzt, daß es entsprechende generische Familien bei den Riemenscheiben gibt. Zu einem späteren Zeitpunkt könnte hierüber entschieden werden, etwa wenn weitere Randbedingungen geklärt sind (z.B. das Wirkprinzip).

Insgesamt zeigt die ISO 13584 neue und interessante Aspekte für den Entwurf von Teilekatalogen. Demgegenüber steht jedoch ein extrem komplexes Modell. Damit verbunden ist ein erheblicher Aufwand bei der Umsetzung für neue Kataloge und bei der Entwicklung von Teilebibliothekssystemen. Die Ergebnisse des ESPRIT III Projektes 8984 „PLUS“ tragen sicherlich einen entscheidenden Anteil an der Entwicklung und Einführung dieses Standards.

Literatur

- /1/ H. Birkhofer: „Datenbanksysteme für das Zulieferwesen – Anforderungen und Bedeutung“; Der Zulieferermarkt, 4, 1992, 78-82.
- /2/ K. Büttner, H. Birkhofer: „Mit Online-Produktkatalogen den Nutzen für Zulieferer und Abnehmer steigern“; Konstruktion, 48/6, 1996, 174-182.
- /3/ U. Greift, M. Kaßner, H. Speckhahn: „SIS - ein schweißtechnisches Informationssystem auf der Basis von Konstruktionskatalogen“; Schweißen und Schneiden, 43/5, 1991, 253-257.
- /4/ ISO/TC184/SC4: „Parts Library - Part 24: Logical model of supplier library“; CD, ISO, 1995.
- /5/ ISO/TC184/SC4: „Parts Library - Part 42: Methodology for the Structuring of Parts Library Families“; DIS, N 243, ISO, 1996.

/6/ ISO/TC184/SC4: „Product data representation and exchange - Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual“; IS, N65, ISO, 1994.

/7/ NAM 96.4.5: „EXPRESS Schema für Prinzipbilder“; EXPRESS Schema, AK 'Prinzipbilder' des NAM 96.4.5, 1992.

/8/ J. Reinemuth, H. Birkhofer: „Hypermediale Produktkataloge Flexibles Bereitstellen und Verarbeiten von Zulieferinformationen“; Konstruktion, 46/12, 1994, 395-404.

/9/ J. Reinemuth: „Entwicklung eines Zulieferkatalogs für ein Profil-Montagesystem“; Der Zuliefermarkt, 7, 1992, 126-132.

Verfahrenstechnische Anforderungen und deren maschinenbauliche Umsetzungen in einem Kreisprozeß

Romann, M., Klemp, E.

Ein gängiges Prinzip in der Verfahrenstechnik ist es, nicht umgesetzte Reaktanden aus dem entstandenen Stoffgemisch abzutrennen, zurückzuführen und sie erneut der Reaktion zuzuführen. Diese Schritte sind an einer trockenen Niedertemperaturentschwefelung einzuführen, da das feste Sorbens bei einem einmaligen Durchlauf durch den Entschwefelungsreaktor nicht vollständig umgesetzt wird. Anhand dieser Entschwefelungsreaktion wird gezeigt, welche Anforderungen die mechanische Verfahrenstechnik an den Maschinenbau stellt und welche Lösungsansätze hierzu verfolgt werden.

It is a well known principle in chemical process engineering to gain back unreacted materials from the products in order to give them back again into the reactor. This principle has to be installed in a process of low-temperature desulphurisation because a single flow of the solid absorbent through the reaction chamber is not sufficient for a complete reaction. The example of this reaction shows the special requirements for the handling of solids and possible solutions by mechanical engineering.

1 Entschwefelung - Reaktionsbedingungen und -partner

Der Prozeß der Niedertemperaturentschwefelung wurde am Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik entwickelt. Zur Erprobung optimaler Reaktionsbedingungen zwischen dem gasförmigen Schwefeldioxid und den festen, calciumhaltigen Sorbentien Ca(OH)_2 oder CaO steht eine Technikanlage zur Verfügung, die eine Verbrennungsleistung von 30 kW aufweist und einen Abgasvolumenstrom von ca. $30 \text{ m}^3/\text{h}$ bereitstellt. Die Anlage liefert aus der Erdgasverbrennung ein Abgas, dessen physikalische und chemische Eigenschaften wie Temperatur, relative Feuchte und der Schwefeldioxidgehalt eingestellt werden können. Die Konzentrationen von Sauerstoff, Stickstoff und Kohlendioxid bleiben weitgehend unverändert. Die Anlage arbeitet

automatisch und hält die Reaktionsbedingungen über der Zeit konstant.

Die typischen Reaktionsbedingungen, unter denen eine trockene Niedertemperaturentschwefelung gute Ergebnisse liefert, sind eine Temperatur zwischen 30° und 70° C und eine relative Feuchte oberhalb 70% nahezu bis zum Taupunkt, der jedoch keinesfalls überschritten werden darf. Die Eingangskonzentration des Schwefeldioxids für die Entschwefelungsreaktion beträgt 1000 bis 4000 ppm.

Von besonderer Bedeutung für die Entschwefelungsreaktion ist die relative Feuchte des Abgases, da trockenes Schwefeldioxid praktisch nicht mit Calciumoxid, bzw. -hydroxid reagiert. In Gegenwart von Wasser bildet Schwefeldioxid schweflige Säure und Calciumoxid bzw. -hydroxid gehen an der Partikeloberfläche zu kleinen Teilen in Lösung. An der Oberfläche der Sorbenspartikel findet eine Säure-Base Reaktion statt, bei der über die Zwischenstufe mit Wasser zunächst Calciumsulfit und unter Sauerstoffaufnahme Calciumsulfat (Gips) entsteht. Mit fortschreitender Reaktion blockieren die Reaktionsprodukte mehr und mehr den Stoffumsatz, so daß keine quantitative Umsetzung des Sorbens eintritt. Innerhalb größerer Partikel verbleibt ein nicht umgesetzter Kern aus Calciumoxid oder -hydroxid. Erst bei überstöchiometrischem Einsatz des Sorbens führt die Entschwefelung zu Konzentrationen von Schwefeldioxid im Abgas, die den Verordnungen zur Luftreinhaltung entsprechen.

2 Recycling: Stofffluß im Kreis

Eine einfache Umsetzung des Sorbens mit dem Schwefeldioxid des Abgases bedeutet den verfahrenstechnisch geringsten Aufwand, führt jedoch nur bei stark überstöchiometrischem Einsatz des Sorbens zu einer ausreichenden Entschwefelung des Abgases. Zur Verminderung der aufzuwendenden Kosten für zusätzliche Chemikalien des Verfahrens

ist es daher sinnvoll, das nicht ausreagierte Sorbens zurückzugewinnen, es aufzubereiten und es erneut zur Reaktion zu bringen. Zu diesem Zweck ist der Feststoff aus dem Abgasstrom zu entnehmen, ausreagiertes Sorbens von nicht reagiertem zu trennen und zu verwerfen und das nur teilreagierte Material nach dessen Aufbereitung der Reaktion erneut zuzuführen.

2.1 Einbringen des Feststoffs

Voraussetzung für einen hohen Stoffumsatz ist die optimale Dispergierung der Sorbenspartikel voneinander und die vollständige Vermischung mit dem Gasstrom mittels eines druckgasbetriebenen Injektors. Da jedoch die verwendeten Sorbentien stark zur Agglomeration neigen, ist auch unter hohem Energie-

aufwand eine vollständige Dispergierung der Partikel nicht zu erzielen. **Bild 1 und 2** zeigen die Dichteverteilungskurven von nicht umgesetztem Calciumoxid und -hydroxid mit und ohne Prallkaskade im Injektor. Der Unterschied der Kurven kommt durch die unterschiedliche Dispergierwirkung des Injektors zustande, je nachdem ob mit oder ohne Prallkaskade gearbeitet wird. Der Wiederanstieg der Dichteverteilungskurve über $100 \mu\text{m}$ ist auf nicht dispergierte Agglomerate zurückzuführen, da das Ausgangsmaterial keine Partikel größer $100 \mu\text{m}$ enthält.

Für den Betrieb des Injektors ist es daher wenig sinnvoll, mit maximalen Drücken an der Injektordüse eine vollständige Dispergierung zu erzwingen. Zum einen erfordert dies einen hohen Energieaufwand und zum anderen gelangt mit dem Treibstrahl und der angezogenen Nebenluft im Partikelstrom sehr viel Luft in das

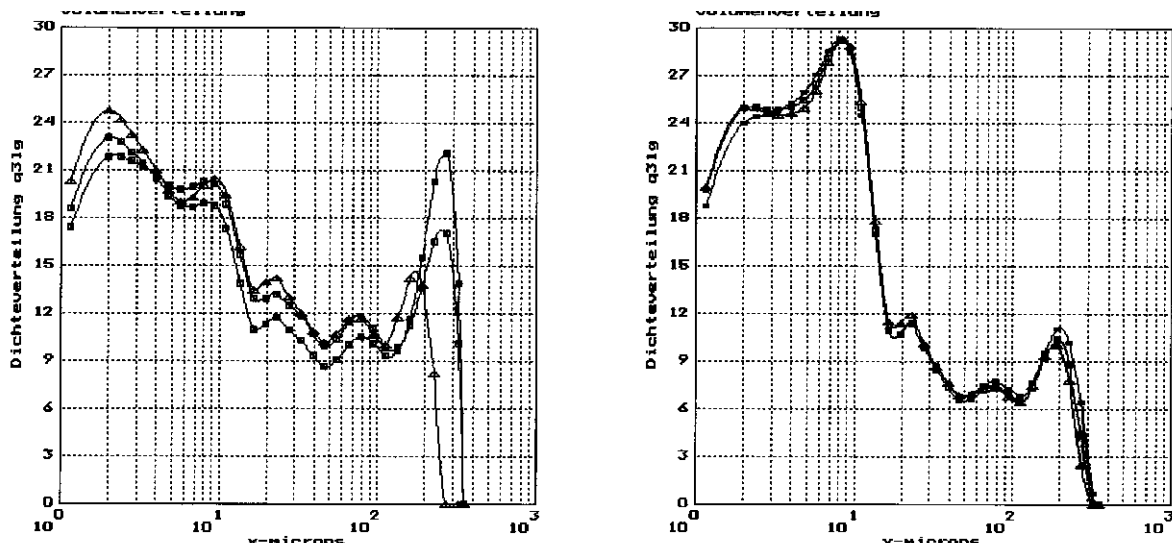


Bild 1: Dichteverteilung von Calciumhydroxid (links) und Calciumoxid (rechts): Dispergierung mit Injektor Rodos bei 3 bar Strahldruck ohne Prallkaskade (Institut für mechanische Verfahrenstechnik, TU-Clausthal)

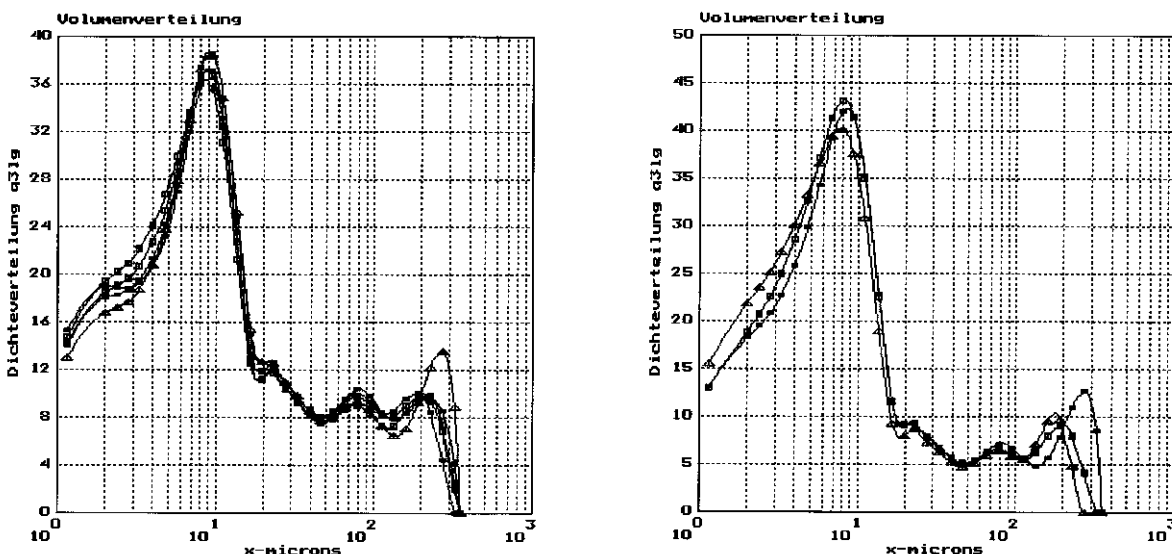


Bild 2: Dichteverteilung wie vor: Dispergierung mit Injektor Rodos bei 5 bar Strahldruck mit eingesetzter Prallkaskade (Institut für mechanische Verfahrenstechnik, TU-Clausthal)

Abgas. Abhilfe schafft hier der Betrieb des Injektors mit komprimiertem Abgas. Die zusätzlich eingebrachte Luft stört die Entschwefelung, da die Temperatur und die relative Feuchte des Abgasstroms verringert wird und die Konzentrationen der unterschiedlichen Gase verändert werden.

Die grundsätzlichen Anforderungen an den Injektor für die Entschwefelungsanlage sind daher

- minimierter Treibgasdurchsatz
- trockener Transport des Feststoffs bis zur Düse
- Dispergierung in den Abgasstrom
- Vermeidung von Rückströmungen und Partikelablagerungen oberhalb des Injektors durch übermäßige Verwirbelung

Die ausgeführte Konstruktion des Injektors beruht auf

Baugröße und die Befestigung des Injektors an dessen Zuleitungen für Druckgas und Feststoff ermöglichen darüberhinaus den einfachen Ein- und Ausbau sogar im laufenden Betrieb der Entschwefelungsanlage.

Bild 3 zeigt den 1,8 m langen Partikelfreistrahl eines Injektors während des Tests auf maximalen Feststoffdurchsatz. Diese Bauform wies drei Treibstrahldüsen von je 0,7 mm Innendurchmesser auf und erreichte einen Feststoffmassenstrom von über 5 kg/h bei einem Gesamtluftdurchsatz von ca. 0,5 bis 1 m³/h. Für die Anwendung innerhalb der Entschwefelungsanlage ist dieser Injektor jedoch nicht geeignet, da dieser zuviel Luft in den Entschwefelungsprozeß einbrächte. Nach dem gleichen Bauprinzip wurde daher die oben ge-

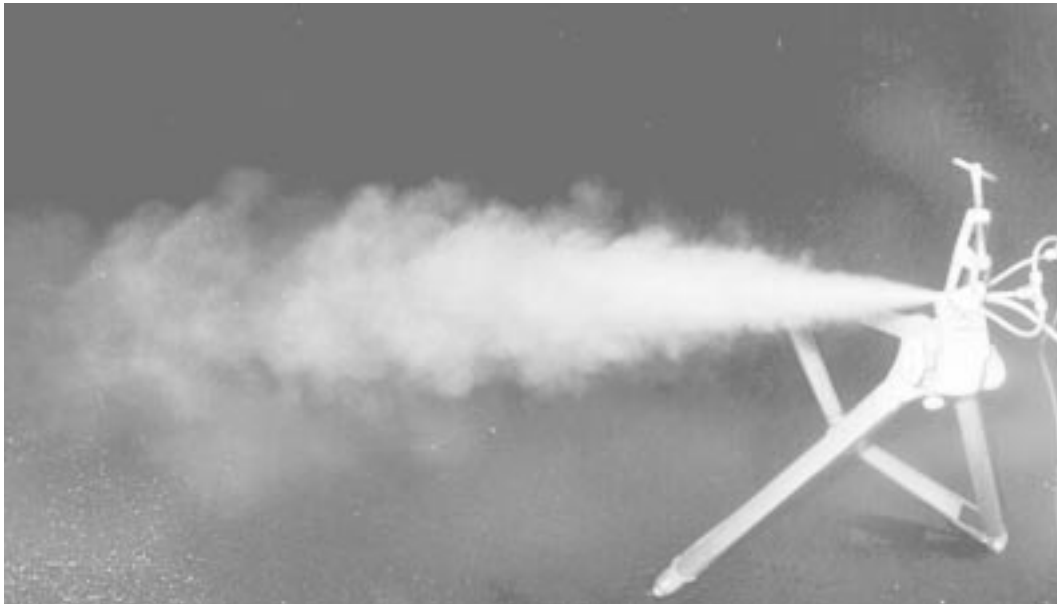


Bild 3: Test einer Injektordüse auf maximalen Feststofftransport

einem Zuführrohr für Feststoff von 4 mm lichter Weite, an dessen Ende 3 Bohrungen von 0,4 mm Durchmesser die Mittelachse unter einem Winkel von 30° schneiden. Der Achsenschnittpunkt der drei Treibstrahldüsen fällt mit dem Ende des Zuführrohrs zusammen, so daß der Feststoff unmittelbar nach der Zone maximaler Beschleunigung ins Freie tritt.

Das Rohr, durch das der Feststoff von außen in die Entschwefelungsanlage geleitet wird, tritt über einen Flansch waagrecht seitlich in die Anlage ein und verläuft ungestört und mit großem Biegeradius bis zur senkrechten Düse des Injektors. Durch diese Bauform und dadurch, daß der Feststoff mit trockener Nebenluft bis zur Injektordüse gefördert wird, ist die Gefahr des Verstopfens stark vermindert. Die geringe

nannte, kleinere Bauform ausgeführt, deren Test auf Durchsatz und Dispergierwirkung noch ausstehen.

2.2 Trennung von Gas und Feststoff

Die Trennung des sehr feuchten Abgases von den Sorbenspartikeln unmittelbar nach der Entschwefelungsreaktion ist notwendig, da das Gas durch eine verbleibende geringe Schwefeldioxidkonzentration korrosiv ist und nicht durch die folgenden Prozeßstufen laufen sollte. Eine Taupunktunterschreitung muß sicher vermieden werden, solange das Abgas mit Feststoff beladen ist, da die Partikel während des Durchlaufs durch die Reaktionszone Wasser sowohl absorbiert, als auch adsorbiert haben. Dadurch neigt

der Feststoff stark zu Anbackungen, auch wenn noch keine Taupunktunterschreitung eingetreten ist. Die bisherigen Betriebserfahrungen beim Abscheiden der verwendeten Additive, die mit einem Zyklon und einer Filterpatrone gewonnen wurden, haben gezeigt, daß der Feststoff zwangsgeführt werden muß, da dieser nach der Berührung einer Oberfläche fest anhaftet. Diese Restriktion ist für die Konstruktion des kontinuierlich arbeitenden Abscheiders für diesen Prozeß von wesentlicher Bedeutung.

Daraus folgt weiterhin, daß der Abscheider den Feststoff weitgehend rieselfähig austragen sollte. Das adsorbierte Wasser der Partikel erhöht deren Haftkraft und erschwert oder verhindert damit die weitere mechanische Behandlung des Feststoffs, wie z. B. das Sichten, Mahlen und Transportieren.

Allgemein formuliert sind die Anforderungen an die Funktionen, die der Abscheider mindestens erfüllen muß, die Herbeiführung eines Transports der Partikel quer zur Strömung, das Aufbringen und Sammeln der Partikel an einer Oberfläche und das Abtransportieren der Partikel von der Oberfläche. Der Mechanismus des Abtransports muß dabei prinzipiell verschieden vom Mechanismus des Antransports sein, um eine gegenseitige Störung der beiden Vorgänge zu verhindern.

Das Auffinden einer geeigneten Lösung der Abscheideaufgabe gelingt durch eine systematische Bearbeitung der oben genannten Anforderungen unter Berücksichtigung der Erfordernisse des Prozesses:

- Der Transport der Partikel quer zur Strömung kann durch Kräfte wie Schwerkraft, Fliehkraft, elektrostatische Kraft oder durch Diffusion herbeigeführt werden.
- Die Partikel treffen auf eine glatte oder poröse Oberfläche, die vom Gas um- oder durchströmt wird und haften dort. Umgekehrt trifft die abscheidende Oberfläche auf die Partikel, wie z. B. bei Tropfenabscheidern.
- Zum Abtransport muß die Haftkraft aufgehoben und die Partikel anderweitig transportiert werden, ohne daß diese in den Gasstrom zurückgelangen, aus dem sie abgeschieden wurden. Der Abtransport kann vom Abscheidvorgang zeitlich, räumlich oder funktionell unterschiedlich sein.

Der Entschwefelungsprozeß bedingt einige Restriktionen, so daß nicht alle oben genannten Möglichkeiten zur Abscheidung offenstehen. Die wichtigsten sind:

tionen, so daß nicht alle oben genannten Möglichkeiten zur Abscheidung offenstehen. Die wichtigsten sind:

- Die abzuscheidenden Partikel sind im Mittel sehr klein (siehe Bild 1 und 2), bilden jedoch, je nach Prozeßbedingungen mehr oder weniger große Agglomerate. Das bedeutet, daß die Schwerkraft keine ausreichende Wirkung erbringt. Andererseits muß die Trennleistung des Abscheiders an die unterschiedlichen Prozeßbedingungen anpaßbar sein.
- Diffusionskräfte überbrücken nur geringe Distanzen oder erfordern große Zeiträume, so daß sie für diesen Prozeß wenig geeignet ist.
- Eine Innenfiltration steht der Gewinnung der Partikel entgegen, da diese nicht einfach aus dem Filtermedium zurückgewonnen werden können. Ebenso ungeeignet sind Gaswaschverfahren, da die Partikel trocken weiterverarbeitet werden.
- Die Partikel dürfen nicht chemisch verändert werden, da sie sonst nicht mehr für den Kreisprozeß geeignet sind.

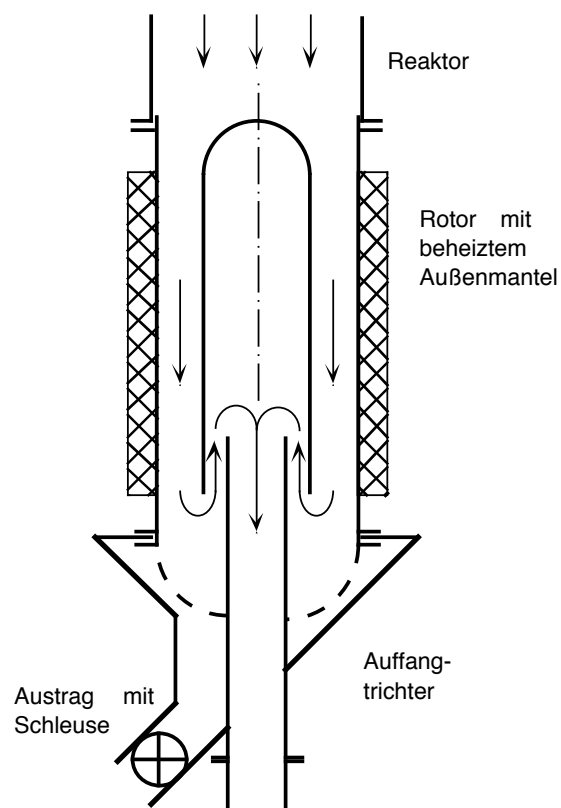


Bild 3: Prinzipskizze des Abscheiders

Eine mögliche Lösung für diese Abscheideaufgabe besteht in der Konstruktion eines aktiven Abscheiders, einer verfahrenstechnischen Maschine, die die

Zentrifugalkraft zur Abscheidung nutzt und die abgetrennten Partikel durch aktive Elemente austrägt. **Bild 4** zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Zentrifugalabscheiders, dargestellt ohne die maschinenbaulichen Elemente der Lagerung und des Antriebs. Der Abscheider verfügt über einen beheizten Außenmantel, um eine Trocknung der Partikel zu erzielen.

Der Abscheider folgt unmittelbar auf den Entschwefelungsreaktor. Dort herrscht eine senkrechte Abwärtsströmung, um die Bildung von Anbackungen zu minimieren. Im Abscheidergerät die Strömung in Rotation und zentrifugiert die Partikel innerhalb des Ringspalts auf den beheizten Mantel. Dort tritt eine Trocknung der Partikel ein, das verdampfte Wasser wird dem Abgas über die Strömungsumlenkung ausgetragen.

Der Feststoffaustrag erfolgt über einen Schaber, der die Partikel von der Mantelfläche löst und nach unten befördert. Dessen Arbeitsweise kann kontinuierlich erfolgen, wenn er fest eingebaut wird, oder nur zeitweise in Betrieb genommen werden, wenn die Arbeit des Abscheiders in die Phasen Abscheiden und Abreinigen getrennt wird.

Der Feststoff rieselt aus dem unten offenen Rotor in den Auffangtrichter, aus dem er über eine Zellrad-schleuse aus dem Prozeß ausgetragen wird.

Die Abdichtung des rotierenden Abscheiders erfolgt über berührungsfreie Labyrinthdichtungen, durch die jedoch ein geringer Leckstrom dringen kann. Die Saugzugregelung stellt einen geringen Unterdruck im Reaktor ein, so daß kein Entweichen von Abgas im Betrieb eintritt. Aus Sicherheitsgründen ist der Abscheider jedoch in ein gasdichtes Gehäuse einzubauen, da im Experimentierbetrieb Abgas mit hohen Schwefeldioxidkonzentrationen auftreten kann, dessen Entweichen in die Technikumsräume sicher vermieden werden muß.

2.3 Konzept für Sichtung und Mahlung

Der Kreislaufprozeß mit der Rückgewinnung und Wiederverwertung nur teilweise umgesetzten Sorbens erfordert zur Einhaltung der Feststoffmassenbilanz die Durchführung zweier grundsätzlich unterschiedlicher Aufgaben: zum einen muß das teilweise reagierte Sorbens vom ausreagierten getrennt werden und zum anderen ist ein gewünschter Feststoffholdup im Kreislauf einzuhalten. Je nach Betriebszu-

stand der Anlage (Anfahren, Lastwechsel,...) wechseln diese Aufgaben, die jedoch beide durch entsprechende Anlagenteile geleistet werden müssen.

Teilreagiertes von ausreagiertem Sorbens zu trennen, kann nur gelingen, wenn es eine Trenngrenze

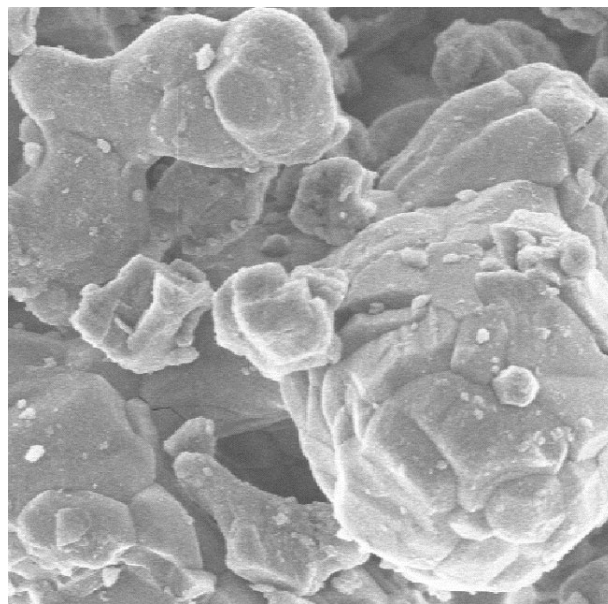


Bild 5: CaO vor der Reaktion: dichte, kompakte Partikel
Abbildungsmaßstab: 2cm = 1 µm

gibt, unterhalb derer die Sorbenspartikel innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit im Reaktor durchreagieren. Oberhalb dieser Grenze reagieren die Partikel mehr oder weniger vollständig, je nach Partikelgröße und -form, Porosität, Agglomerationszustand und Reaktionsbedingungen, da die chemische Reaktion nur an der Oberfläche der Partikel stattfindet und

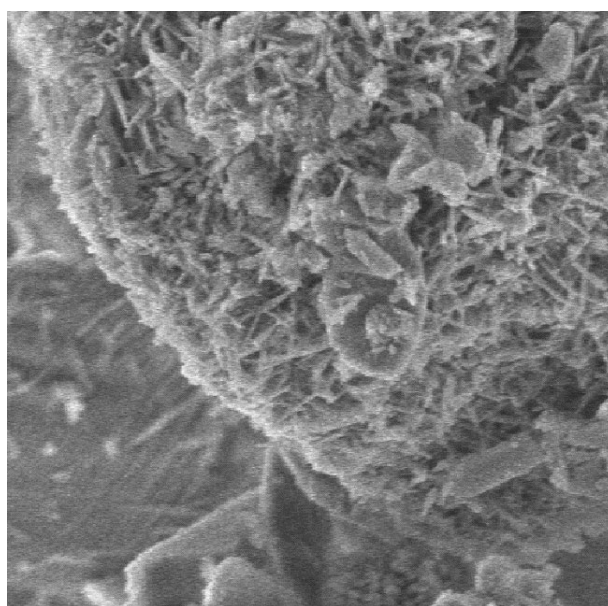


Bild 6: CaO nach der Reaktion: an der Oberfläche gebildete Reaktionsprodukte bedecken die Partikel mit einem feinkristallinen Überzug
Abbildungsmaßstab: 2cm = 1 µm

die gebildeten Reaktionsprodukte die weitere Reaktion hemmen. Die **Bilder 5 und 6** zeigen, in welcher Weise sich auf der Oberfläche der unreaktierten Sorbenspartikel sich die Reaktionsprodukte aus der Entschwefelungsreaktion anlagern.

Der Kreislaufprozeß arbeitet ideal, wenn die zur Entschwefelung stöchiometrisch notwendige Mindestmenge Sorbens zudosiert wird und nach maximal soviel Durchläufen durch die Reaktionszone ausreagiert, wie an Feststoffholdup im Kreis gefahren werden kann. In diesem Fall wird nur ausreagiertes Material ausgetragen, dessen Korngröße bis zur Trenngrenze des Sichters heranreicht. Der Sichter arbeitet dann im „Nennbetrieb“.

Abweichungen hiervon, z. B. durch geringere Schwefeleinbindungen in das Sorbens, erfordern größere Mengen Sorbens und es muß zur Vermeidung eines Feststoffstaus teilreagiertes Material ausgeschleust werden. In diesem Betriebszustand muß überschüssiger Feststoff durch einen Teilabzug nach dem Abscheider aus dem Kreislauf entnommen werden. Der Sichter kann zu dieser Aufgabe nicht herangezogen werden, da dieser auf die Einhaltung einer bestimmten Trenngrenze hin konstruiert ist. Ein Ausschleusen von Feststoff mit bestimmtem Massenstrom läuft der grundsätzlichen Wirkungsweise eines Sichters entgegen.

Die Sichtung und Aufbereitung nach klassischem verfahrenstechnischem Konzept des Mühle-Sichter-Kreislaufs dient der Gewinnung des Feinguts, wobei das aus der nachfolgenden Sichtung erhaltene Grobgut zur erneuten Mahlung zurückgeführt wird.

Die Sichtung in dem hier untersuchten Entschwefelungskreisprozeß dient der Gewinnung des Grobguts und sollte unmittelbar nach der chemischen Reaktion stattfinden, denn

- Ankommendes Feingut ist weitgehend durchreagiert und kann aus dem Kreisprozeß entfernt werden. Dadurch gelangt kein Feingut in die Aufbereitung, das nicht aufbereitet werden kann.
- Im Anfang vorhandene und im Reaktor gebildete Agglomerate, die nur teilweise chemisch umgesetzt sind, werden in das Grobgut verwiesen und zur Aufbereitung weitergeleitet

Eine Sichtung nach der Aufbereitung würde ein Feingut liefern, das sowohl vollständig reagiertes als auch

teilweise umgesetztes Material enthielte und daher nicht ausgetragen werden sollte.

Innerhalb des Kreislaufs findet die Aufbereitung des teilreagierten Sorbens statt. Die Aufgabe des Aufbereitungsverfahrens besteht darin, die Schicht aus Reaktionsprodukten aufzubrechen und darunter befindliches nicht umgesetztes Sorbens freizulegen. **Bild 6** zeigt beispielhaft, wie eine Schicht feinkristallin abgechiedener Reaktionsprodukte die Oberfläche des Sorbenspartikels belegen. Eine Einzelkornzerkleinerung (Mahlung) wird den besonderen Partikeleigenschaften nicht gerecht, denn

- die Partikel sind mit einem Medianwert von unter 10 µm sehr klein, eine weitere Zerkleinerung ist nur unter hohem Energieaufwand möglich,
- die hier verwendeten Sorbentien neigen sehr stark zur Agglomeration, so daß nur geringe Stoffmengen überhaupt als Einzelkorn vorliegen,
- die Agglomerate zeigen das Verhalten großer Partikel, die mit einer Schicht von Reaktionsprodukten bedeckt werden, d. h. daß innenliegende Partikel kaum oder nicht an der Reaktion teilhaben.

Das bedeutet für das Aufbereitungsverfahren, daß das Zerkleinern einzelner Partikel nur bis zu einer unteren Grenze anzustreben ist, oberhalb deren die Partikel einen nennenswerten Teil unreaktierten Materials beinhalten. Die wichtigste Wirkung der Aufbereitung ist dabei das Auflösen der Agglomerate, wobei jedoch die Neubildung der Agglomerate innerhalb der Transportwege und im Reaktor nicht verhindert werden kann.

Für die Auswahl und die detaillierte Auslegung des Aufbereitungsverfahrens sind weitergehende Analysen zu den Eigenschaften teilreagierter Sorbenspartikel vorzunehmen. Dabei ist insbesondere zu zeigen, welchen Anteil gebundenen Schwefel die Partikel in Abhängigkeit von ihrem Durchmesser zeigen. Mit diesen Ergebnissen ist auch der Sichter auszulegen, der das „Abscheideorgan“ für den chemisch gebundenen Schwefel bildet.

Wissensbasierte Fehler- und Störfallanalyse bei der Entwicklung von verfahrenstechnischen Maschinen

Große, A.; Heimannsfeld, K.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 180 "Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen bei besonderen mechanischen, thermischen oder chemischen Belastungen" ist das Teilprojekt A2 "Rechnerunterstützte Anforderungsermittlung und Funktionsanalyse verfahrenstechnischer Maschinen" im Bereich der übergreifenden Forschung angesiedelt. Das Projekt befaßt sich seit Beginn der Arbeiten mit der Unterstützung des interfakultativen Entwicklungsprozesses (Verfahrenstechnik, Maschinenbau, Chemie, Werkstoffwissenschaften). Der Artikel soll Probleme bei der Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse und ihrer Maschinen, mögliche Lösungswege und geplante Arbeiten aufzeigen.

Within the special research project 180 "Design of process engineering machinery with special reference to exceptional mechanical, thermal or chemical application of stress" the subproject A2 "Computer-Aided Requirement and Functional Analysis for Processing Machines" is engaged in general research. Since the beginning of the investigations this project works on supporting the development process involving several specialities: process engineering, mechanical engineering, chemistry and material science. This article describes problems in the development of processes and their machines and possible solutions as well as work in the planning.

1 Einführung

Eines der wesentlichen Ergebnisse aus den vergangenen Arbeiten dieses Projekts ist die Erkenntnis, daß in fortgeschrittenen Konstruktionsphasen (Dimensionierung und Gestaltung) bei vorliegenden, aus rein verfahrenstechnischen Überlegungen herrührenden konstruktiven Randbedingungen, der Gestaltungsprozeß durch rechnergestützte Methoden nach dem Prinzip der Konstruktionskataloge oder der Variation bekannter Lösungen unterstützt werden kann. Der entscheidende Nachteil dabei ist aber, daß eine solche Vorgehensweise die integrierte Entwicklung

von Prozeß und Maschine verhindert und damit die Innovationsmöglichkeiten einschränkt. Insbesondere in den frühen Phasen der Entwicklungstätigkeit – d.h. von der Erstellung der Anforderungsstruktur bis hin zu dem, was in VDI 2221 im Bereich der verfahrenstechnischen Entwicklung "verfahrenstechnisches Fließbild", in der maschinenbaulichen Entwicklung "Konzept" genannt wird – kann dagegen eine Informationsbasis Potentiale zur Entwicklung neuer Prozesse und Maschinenanlagen freisetzen. Bei den Lösungsansätzen ist nicht daran gedacht, dem Verfahrenstechniker die Entwicklungsmethodik des Maschinenbauers "überzustülpen" (oder umgekehrt). Die unterschiedlichen Vorgehensweisen von Verfahrenstechnikern und Maschinenbauern können aber durch gemeinsame Methoden zur Beschreibung von Anforderungen, Funktionen, Ergebnisdarstellungen der jeweiligen Entwicklungsschritte, Produkt- und Prozeßdaten entscheidend angereichert werden.

2 Informationssystem zur rechnergestützten Anforderungsermittlung und Funktionsanalyse

Auf der Basis eines integrierten Produktmodells wurde ein Konstruktionsinformationssystem zur rechnergestützten Entwicklung verfahrenstechnischer Maschinen erstellt. Mit der prototypischen Implementierung eines rechnergestützten Werkzeugs zur Anforderungsermittlung und Funktionsanalyse wurde die Realisierbarkeit und Verwendbarkeit des spezifizierten Produktmodells gezeigt. Es wurden Wege dargelegt, die Anforderungs- und Funktionsanalyse durch Verfahrenstechniker und Maschinenbauer auf eine einheitliche Sicht abzubilden und zu formalisieren.

Begleitend wurde ein Modell des Entwicklungsvorgangs erstellt, das – unter Verwendung der in VDI 2221 getroffenen Definitionen für die Einzelschritte – eine Beschreibung des aktuellen Zustands der Entwicklung liefert und so die Anwendung fachspezifischer Vorgehensweisen einer schrittweisen Weiterentwicklung ermöglicht.

2.1 Modell zur Beschreibung des Konstruktionsprozesses

Für eine umfassende Unterstützung des Konstrukteurs müssen ihm die Produktdaten in geeigneter Form zugänglich gemacht werden. Dazu werden Modelle zur Beschreibung des Konstruktionsprozesses und der Konstruktionsergebnisse genutzt. Die Integration dieser Modelle ermöglicht es, die Eingangs- und Ausgangsgrößen der Konstruktionsschritte zu beschreiben und zu klassifizieren. Weiterhin definiert ein Konstruktionsraum mit seinen Dimensionen die Grundfunktionen der Konstruktionsaktivitäten. Dadurch werden ebenfalls die einzelnen Aktivitäten beschrieben. Das Modell des Konstruktionsraumes stellt somit eine Verbindung zwischen der Gedanken- und Handlungswelt des Konstrukteurs und den Daten- und Informationsmodellen dar, **Bild 1**.

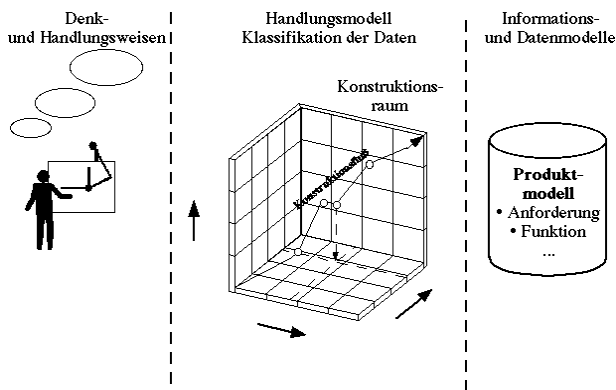


Bild 1: Der Konstruktionsraum als Schnittstelle

Die Integration des Konstruktionsraumes in einen rechnerunterstützten Konstruktionsarbeitsplatz dient folgenden Zielen:

- Orientierung im Konstruktionsprozeß ("Wo befinde ich mich? Welche Möglichkeiten habe ich?"),
- detaillierte Dokumentation und Bereitstellung von Konstruktionsabläufen,
- Integration von Auslegungs- und Auswahlmethoden in Abhängigkeit vom Zustand des Konstruktionsobjektes.

2.2 Systemkonzept

Für die Realisierung eines rechnergestützten Konstruktionsinformationssystems, das das Modell des Konstruktionsraumes nutzt, wird ein modulares System vorgeschlagen, **Bild 2**. Bei den einzelnen Modu-

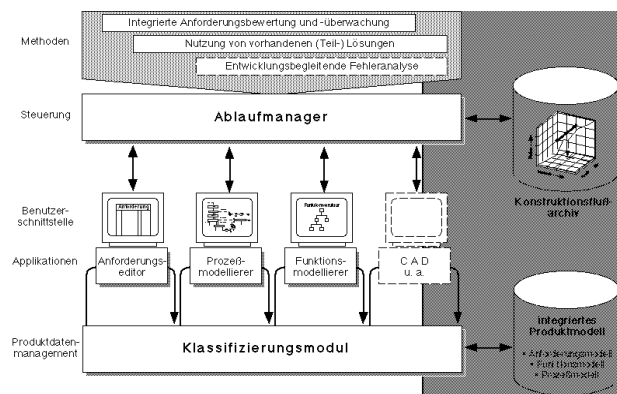


Bild 2: Systemkonzept

len handelt es sich um:

- Klassifizierungsmodul,
- Konstruktionsflußarchiv,
- Ablaufmanager,
- integriertes Produktmodell mit relevanten Partialmodellen.

Das Klassifizierungsmodul erfaßt die ein- und ausgehenden Informationen und ordnet sie einer Koordinate des Konstruktionsraumes zu. Die Klassifizierung erfolgt entsprechend der Definition der Dimensionen des Konstruktionsraumes. Dies kann sowohl interaktiv durch Befragen des Benutzers als auch automatisch erfolgen. Für eine automatische Klassifizierung der Daten ist ihre Semantik eindeutig festzulegen.

Das Konstruktionsflußarchiv dokumentiert und verwaltet die Klassifizierung der einzelnen Ein- und Ausgangsgrößen der Konstruktionsschritte. Zusätzlich stellt es die Verbindung zu den Instanzen, die im Produktmodell abgelegt sind, her. Auf diese Weise kann der gesamte Konstruktionsprozeß einschließlich des jeweiligen Standes der Produktdefinition weiteren Betrachtungen zugänglich gemacht werden.

Der Ablaufmanager steuert die Funktionen und Applikationen, die dem Konstrukteur angeboten werden. Dies geschieht in Abhängigkeit vom Zustand des Konstruktionsobjektes, d.h. seiner Lage im Konstruktionsraum. Entsprechend den Dimensionen des Konstruktionsraumes und den zwei unterschiedlichen Bewegungsrichtungen ergeben sich verschiedene Klassen von Konstruktionsschritten. Aufgabe des Ablaufmanagers ist die Auswahl und Zusammenstellung der jeweils detaillierten Systemfunktionen der beteiligten Subsysteme und Applikationen. Bei

diesen Klassen von Konstruktionsschritten handelt es sich um:

- Konkretisieren / Abstrahieren,
- Spezialisieren / Generalisieren
- Dekomponieren / Zusammensetzen
- Variieren

Diese Oberklassen werden durch die Unterteilung der Dimensionen noch weiter detailliert. Zusätzlich kann der Ablaufmanager anwendungs- oder unternehmensspezifische Abläufe vorgeben und diese auch um organisatorische Gesichtspunkte ergänzen. So kann er bestimmte Zustände des Konstruktionsobjektes als Fixpunkte festlegen. Die Vorgabe dieser Fixpunkte entspricht einer Konstruktionsablaufplanung, sie umfaßt FreigabeprozEDUREN und kann um Termin- und Kapazitätsaspekte ergänzt werden.

Weiterhin dient der Ablaufmanager zur Integration von rechnergestützten Methoden für einzelne Konstruktionsschritte. So werden beim Übergang von den funktionalen Anforderungen zur Festlegung der Gestalt eines Bauteiles Methoden der Bauteildimensionierung bereitgestellt. Zu derartigen Methoden gehört ebenfalls die später in diesem Artikel vorgestellte Systematik zur konstruktionsbegleitenden Fehleranalyse. Im folgenden soll der bereits realisierte Anforderungseditor bzw. -modellierer (vgl. **Bild 2**) vorgestellt werden.

2.3 Der Anforderungsmodellierer

Für die Realisierung eines Werkzeuges zur Erfassung und Analyse von Anforderungen wurde das in **Bild 3** dargestellte Systemkonzept gewählt. Basis der Entwicklung des Anforderungswerkzeugs **demanda** ist ECCO Toolkit zum Rapid Prototyping von Informationsmodellen nach ISO 10303-11 (EXPRESS). Ausgehend von dem in der Datenmodellierungssprache EXPRESS formulierten Produktmodell wird mit Hilfe eines EXPRESS-Compilers ein RUNTIME-System generiert. Das RUNTIME-System enthält die Grundfunktionalitäten zum Zugriff auf die einzelnen Teile des Produktmodells und Funktionen zum Datenaustausch nach ISO 10303-21 (STEP Physical Files). Die Kommunikationsschicht und die EXPRESS-Abstraktionsschicht bilden den modellunabhängigen Teil der Zugriffsfunktionen auf das Pro-

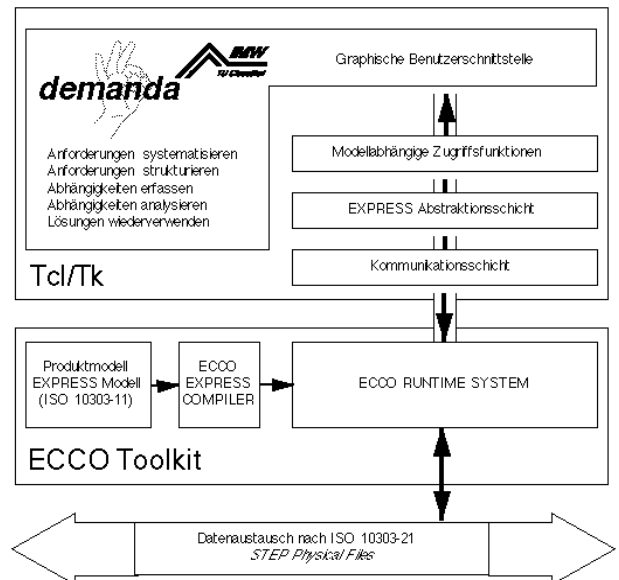


Bild 3: Systemarchitektur des Anforderungswerkzeugs **demanda**

duktmodell. Alle Softwaremodule zur Realisierung von **demanda** wurden in der Programmiersprache Tcl/Tk und der objektorientierten Erweiterung [incr Tcl] implementiert. Tcl/Tk ist eine Programmiersprache die insbesondere zum schnellen Entwickeln von graphischen Benutzerschnittstellen entworfen wurde und schnell und leicht erlernbar ist.

Bild 4 zeigt die graphische Benutzeroberfläche des Anforderungsmodellierers. **demanda** gliedert sich in die drei Teilbereiche Anforderungen, Produktkategorien und Eigenschaften. Anforderungen werden immer einer Produktkategorie oder einem Produkt zugeordnet. Eigenschaften und deren Darstellungselemente sind die formalisierte Beschreibung von Anforderungen, die zur Analyse und späteren Bewertung von Lösungen eingesetzt werden.

Neben den eigentlichen Anforderungen wird durch Strukturierung auch weitergehendes Konstruktionswissen erfaßt und der rechnergestützten Auswertung und Wiederverwendung zugänglich gemacht. Ausgehend von den definierten Anforderungen kann der Produkt- oder Verfahrensentwickler auf bestehende Lösungen aus anderen Konstruktionsphasen zurückgreifen.

Aus Benutzersicht bieten sich dem Produktentwickler mehrere Vorgehensmöglichkeiten, die dem kreativen Vorgang des Konstruierens Rechnung tragen. Zur Systematisierung der Anforderungserfassung bietet **demanda** vordefinierte Anforderungskataloge, die der Produktentwickler als Schablonen benutzen

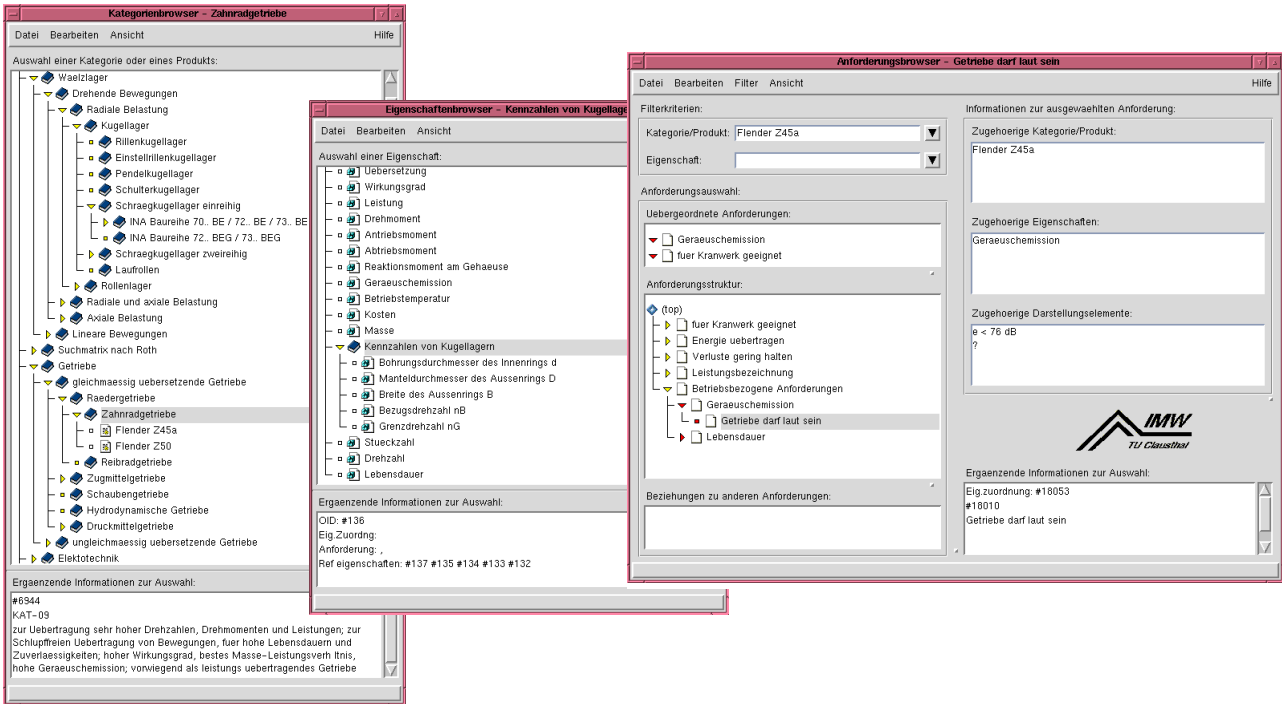


Bild 4: Graphische Benutzerschnittstelle des Anforderungswerkzeuges **demanda**

kann. Neben der eigentlichen Strukturierung der Anforderungen, können auch Beziehungen zwischen Anforderungen modelliert werden. Hierdurch kann der Produktentwickler rechtzeitig auf konkurrierende oder sich im schlimmsten Fall sogar ausschließende Anforderungen aufmerksam werden.

Zusammenfassend bietet **demanda** dem Produktentwickler die folgenden Möglichkeiten:

- Wiederverwendung von Konstruktionswissen aus ähnlichen Produkten
- Systematisierung der Anforderungserfassung durch Anforderungskataloge
- Teilautomatisierte Erfassung und Analyse von Beziehungen zwischen Anforderungen
- Konsistenzprüfung der Anforderungen ähnlicher Produkte

3 Geplante Arbeiten

Im Verlauf der bisherigen Arbeiten wurde auch erkannt, daß bei der Entwicklung verfahrenstechnischer Maschinen insbesondere die in den Phasen der Fertigung, der Inbetriebnahme und des Betriebes gewonnenen Erfahrungen selten in die bereits erfaßten Anforderungen und Teillösungen der neuen Produkte zurückfließen. Die Erfahrungen aus dem Le-

benszyklus der verfahrenstechnischen Maschine oder des erzeugten Produkts stehen somit bei der nächsten Neukonstruktion oder Variantenkonstruktion nicht mehr zur Verfügung. Auch die während der Neukonstruktion von verfahrenstechnischen Maschinen gemachten negativen Erfahrungen stehen am Projektende selten vollständig zur Verfügung, obwohl sie wichtiger sein können als die konkrete Lösung.

Im Mittelpunkt der weiterführenden Arbeiten soll daher die Entwicklung von Methoden zur Unterstützung des Konstrukteurs bei der Fehler- und Störfallanalyse in den frühen Phasen der Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen stehen. Dazu ist die Erfassung, Analyse und Rückführung von Fehlerinformationen aus allen späteren Phasen in einem Produktlebenszyklus in die Entwicklung erforderlich.

3.1 Rechnergestützte Fehler- und Störfallanalyse

Es ist vorgesehen auf Basis von Fehlerinformationen ein System zur Fehleranalyse in den bestehenden Konstruktionsarbeitsplatz zu integrieren. Die Fehlerinformation kann dabei realen oder virtuellen Charakter haben. Als reale Fehlerinformation werden Informationen über Fehler bezeichnet, die in späteren Produktlebensphasen "real" aufgetreten sind. Virtuelle Fehlerinformationen sind hingegen Fehler, die sich der Verfahrensentwickler, der Konstrukteur oder ein

Projektteam vorstellt, um so präventiv Fehlerquellen zu erkennen, ihre Auswirkungen zu beurteilen und die Ursachen zu vermeiden.

Bild 5 zeigt das grundsätzliche Vorgehen bei der wissensbasierten Fehler- und Störfallanalyse. Zum Auffüllen der Wissensbasis stehen am Anfang zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Einerseits fließt durch die Fehler- und Störfallanalyse disziplinternes Fehlerwissen in die gemeinsame Wissensbasis. Das gespeicherte Fehlerwissen steht von diesem Zeitpunkt an auch den anderen Teildisziplinen oder Abteilungen zur Verfügung. Andererseits wird die Fehlerinformation aus den späten Phasen des Produktlebenszyklusses erfaßt, den Ursachen zugeordnet und in die Wissensbasis eingebracht. Ziel des Systems ist es, mit steigendem Wissen die Regelkreise zwischen der Verfahrensentwicklung, Konstruktion und den späten Phasen des Produktlebenszyklusses zu verkürzen und somit zu kürzeren Entwicklungszeiten und einer qualitativ besseren, kostengünstigeren verfahrenstechnischen Maschine oder Anlage für einen stabilen und sicheren Prozeß zu kommen.

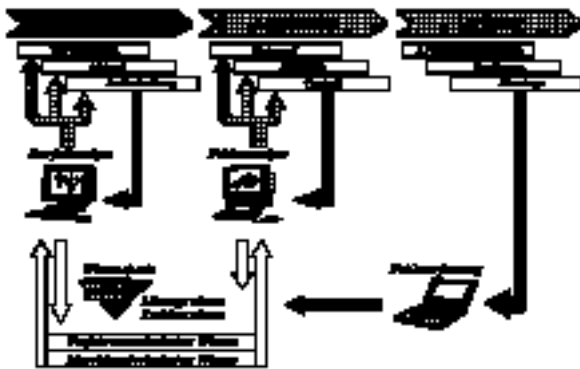


Bild 5: Wissensbasierte Fehler- und Störfallanalyse

Innerhalb des Projekts sollen daher vorrangig drei Ziele verfolgt werden:

a) Konzept zur Integration der maschinentechnischen Fehleranalyse in die verfahrenstechnische Störfallanalyse

Zur Umsetzung einer disziplinübergreifenden Fehleranalyse auf Basis von Erfahrungswissen ist es zunächst nötig, die Auswirkung von maschinentechnisch bedingten Fehlern auf den Prozeß einer verfahrenstechnischen Maschine oder Anlage zu untersuchen, zu systematisieren und zu beschreiben. Dazu ist das entwickelte integrierte

Produktmodell so zu erweitern, daß die in verfahrenstechnischen Maschinen ablaufenden Prozesse in einem funktionalen Zusammenhang mit den Parametern der maschinentechnischen Realisierung beschrieben werden können.

Dieses Modell stellt später die Grundlage für die Rückkopplung von Erfahrungen zwischen dem Maschinenbau und der Verfahrenstechnik dar. Dabei muß das Modell flexibel und erweiterbar angelegt werden, um den Entwicklungen in der Forschung und in der Neuentwicklung verfahrenstechnischer Maschinen Rechnung zu tragen. Gleichzeitig muß das Modell eine verständliche Repräsentation der enthaltenen Informationen erlauben, um so dem Verfahrensentwickler und dem Konstrukteur Expertenwissen der jeweils anderen Disziplin verständlich in einer aufgaben- und situationsgerechten Darstellung zugänglich zu machen.

b) Erfassung und Wiederverwendung von Erfahrungswissen aus späten Phasen des Produktlebenszyklusses

Durch präventive Fehleranalyse sollen Fehler erkannt und beseitigt werden, bevor sie zu höheren Kosten und negativen Auswirkungen auf die Produktqualität führen. In der Praxis und insbesondere im Umfeld der Forschung und Neuentwicklung lassen sich allerdings oftmals die Parameter einer Entwicklung nur schwer vorhersehen. Im Gegensatz zu den häufig in der Industrie angewandten Variantenkonstruktion, deren Entwicklung "überschaubarer" ist, werden hier viele Erfahrungen erstmals gesammelt. Daher muß die Integration von Fehlerwissen in einer möglichst aufgegliederten Darstellung erfolgen und die damit zu erreichende Übertragbarkeit und Wiederverwendbarkeit einen Schwerpunkt in der Untersuchung und Entwicklung eines disziplinübergreifenden Fehleranalysewerkzeuges für Verfahrensentwickler und Konstrukteur darstellen. Dies erfordert zunächst eine Klassifizierung und Rückführung von Fehlern, Ausfällen und Ursachen und ihre Darstellung in dem Produktmodell.

Ein besonderer Schwerpunkt muß auch hier auf die sichtengerechte Darstellung des Wissens gelegt werden, denn nur so kann garantiert werden, daß der Verfahrensentwickler oder Konstrukteur

die Chance hat die Zusammenhänge zwischen seinen Aktivitäten und den Auswirkungen in späteren Produktlebensphasen zu erfassen, um seine Handlungen und Ideen anzupassen und zu korrigieren.

c) **Integration von verfahrens- und maschinen-technischem Erfahrungswissen in die präventive Fehleranalyse**

Nach der Erfassung des disziplinübergreifenden Erfahrungswissens kann dieses Wissen benutzt werden um den Konstrukteur bei der Generierung und Verfolgung einer Fehleridee zu unterstützen. Dies erfordert aber eine durchgängige und konsistente Formalisierbarkeit, die oftmals nicht oder nur sehr schwer realisierbar ist. Ein Schwerpunkt bei der Integration des disziplinübergreifenden Wissens muß folglich in der Untersuchung der Modellierbarkeit von unscharfem und unsicherem Wissen liegen. Neben der Untersuchung zur rechnergerechten Abbildung des unsicheren Wissens müssen auch die Mechanismen zur Bereitstellung in der Benutzerschnittstelle untersucht werden, denn nur wenn die Kommunikation des Benutzers mit dem Konstruktionsinformationssystem und der implementierten Datenaufbereitung harmonisiert, kann die angebotene optimale Information genutzt werden.

3.2 Methoden der Fehler- und Störfallanalyse

Zuverlässigkeit und *Sicherheit* sind zwei wesentliche Qualitätsmerkmale einer verfahrenstechnischen Maschine oder Anlage. Dabei hängen beide eng zusammen und bedingen sich gegenseitig. Die Abgrenzung von Zuverlässigkeit und Sicherheit kann durch die beiden Begriffe *Versagen* und *Unfall* erfolgen /1/. Ein Versagen eines unzuverlässigen Maschinenteils kann, soweit die ausgefallene Funktion sicherheitsrelevant ist, zu einem Unfall führen, muß allerdings nicht Voraussetzung für einen Unfall sein. Eine andere qualitative Definition von Sicherheit findet man in /2/: "*Safety is the freedom from those conditions that can cause death, injury, or occupational illness; damage to the environment; or damage to or loss of equipment or property*".

Nach /3/ können Methoden zur Fehler-, Unfall- und Störfallanalyse in drei Klassen unterteilt werden. Die

se Klassifizierung wird auf Grund der Art von Beziehung zwischen den Ursachen und Konsequenzen vollzogen, die von den Methoden während der Analysephase untersucht werden. Man unterscheidet:

- Eine-zu-Viele Methoden
- Viele-zu-Einer Methoden
- Viele-zu-Viele Methoden

Beispiele für die Klasse der Eine-zu-Viele Methoden sind die FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), die FMCEA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis), die AEA (Action Error Analysis) und die ETA (Event Tree Analysis). Alle diese Ansätze gehen von einem einzelnen Ereignis aus und versuchen systematisch die möglichen Folgen durchzuspielen und zu untersuchen. Andere Autoren beschreiben diese Vorgehensweise als vorwärtsgerichtete Analyse oder induktive Methoden /4/.

Bei diesen Methoden wird das zu untersuchende System in eine Anzahl von Elementen (z.B. Bauteile, Unterfunktionen) zerlegt. Danach werden für diese Elemente mögliche Abweichungen von Sollwerten vorgegeben und durch das Gesamtsystem propagiert und in Bezug auf die sicherheitsrelevanten Aspekte bewertet. Eine ausführlichere Beschreibung der einzelnen Methoden findet sich in /5-7/.

Die Viele-zu-Eine Methoden versuchen für eine Folge die möglichen Gründe zu ermitteln. Deswegen spricht man auch oftmals von rückwärtsgerichteten oder deduktiven Analysemethoden. Die FTA (Fault Tree Analysis) ist ein typischer Vertreter der deduktiven Fehleranalyseverfahren. Die FTA beginnt bei einem vorgegebenen Starterereignis und verfolgt in zeitlich inverser Folge die Ereignisse, die als Ursachen für das Starterereignis in Frage kommen. Die Auswahl eines geeigneten Starterereignisses ist ein oftmals kritischer Faktor bei der FTA und wird häufig durch eine weniger detaillierte Methode der Fehleranalyse oder durch Erfahrungswissen bestimmt. Die Durchführung der FTA kann auf Grund einer formalisierten Beschreibung von Fehlerbäumen automatisiert werden. Weitere Informationen zu der FTA und Fehlerbäumen finden sich z.B. in /8, 9/.

Viele-zu-Viele Methoden sind oftmals Mischformen aus den beiden vorhergehend beschriebenen Klassen. Wählt man ein Zwischenereignis einer Unfallsequenz als Starterereignis einer FTA und als Auslöseereignis einer ETA, so erhält man eine bidirektionale

Methode, die als CCA (Cause-Consequence Analysis) bezeichnet wird. Oftmals werden auch die induktiven Methoden der FMEA und FMECA durch eine deduktive Suche nach Versagensursachen bidirektional angewendet. Eine ausführliche Beschreibung der CCA findet sich in /10/.

Ein weitere Unterklasse der Viele-zu-Viele Methoden wird in /4/ als *morphologische Analyse* bezeichnet und konzentriert sich von Anfang an auf potentielle Gefahrenstellen eines Systems. Die Analyse beginnt meistens mit der Suche nach Startereignissen die oftmals mit Energieschwerpunkten, gefährlichen Stoffen oder potentiellen Zielen wie Menschen und gefährdeten Gegenständen zusammenhängen. Diese wird in der Regel durch die Anwendung einer Menge von Leitworten bewerkstelligt. Für jedes dieser Leitworte wird nun in einer bidirektionalen Vorgehensweise auf die Konsequenzen und die Ursachen hin untersucht. Beispiele dieser morphologischen Analysen sind z.B. die in der chemischen Industrie weitverbreitete PAAG (engl. HAZOP - Hazard and Operability Study), MORT (Management Oversight and Risk Tree), OHA (Operating Hazard Analysis, PHA (Preliminary Hazard Analysis). Eine ausführliche Beschreibung dieser Methoden findet man in /4, 7, 9-11/.

4 Ausblick

Aus der Rückführung von Erfahrungswissen mit Methoden der Fehler- und Störfallanalyse leiten sich folgende Arbeitsschritte ab:

Konstruktive Begleitung anderer Teilprojekte

Zur Überprüfung und Weiterentwicklung der vorgeschlagenen Methodik zur wissensbasierten Fehleranalyse wird aktiv in anderen Teilprojekten des Sonderforschungsbereichs mitgearbeitet. Die durch die Mitarbeit gewonnenen Erfahrungen der Teilprojekte können direkt genutzt werden um die Methoden und Modelle zu validieren. Auf Basis der realen Erfahrungswerte soll eine Optimierung der Fehleranalysemethoden und Modelle vollzogen werden. Andererseits sollen die Daten genutzt werden, um präventive Fehleranalysen in den Teilprojekten durchzuführen und somit neben einer aktiven Erprobung auch einen eigenen Beitrag in den Teilprojekten zu leisten. Durch den Aufbau eines derartigen Regelkreises "Erfahrungen sammeln - Anwendung - Überprüfung - Optimie-

rung" ist ein effizienter Abgleich zwischen Theorie und Praxis zu erwarten. Außerdem sind Rückschlüsse auf organisatorische Aspekte in der Anwendung der Methodik möglich. Ergebnis ist die kritische Überprüfung der Methodik und des Modells anhand realer Daten. Dazu soll der bestehende Prototyp um ein Fehlererfassungsmodul erweitert werden.

Aufbereitung und Evaluierung von Ansätzen zur präventiven Fehleranalyse

Zu Beginn der Arbeiten ist eine intensive Untersuchung der verschiedenen Methoden der präventiven Fehleranalyse notwendig. Dazu ist es erforderlich, die Ansätze in Bezug auf die Anwendbarkeit in dem interdisziplinären Umfeld der Entwicklung verfahrenstechnischer Maschinen hin zu untersuchen. Ein weiterer Aspekt wird die Formalisierbarkeit und damit verbunden die Automatisierbarkeit der Ansätze sein. Neben dem Vergleich und der Bewertung der bereits existierenden Ansätze zur Fehleranalyse soll ein Vorgehensmodell ausgearbeitet werden, daß hinreichend formalisierbar ist, gleichzeitig aber flexibel genug, um vom Anwender akzeptiert zu werden.

Modellbildung zur Beschreibung der Ursache/Folge-Beziehung

Basierend auf dem zu entwickelnden Vorgehensmodell muß eine Datenmodellierung der Fehlerinformation erfolgen. Dazu soll ein Modell zur Repräsentation der Ursache/Folge-Beziehung entwickelt werden. Dieses Modell ist der Eingangsparameter zur manuellen Erfassung von Fehlern in den späteren Phasen des Produktlebenszyklusses und wird zur Modellierung des Fehlerzustandes (Fehleridee) in der präventiven Fehleranalyse benötigt. Ein Schwerpunkt in der Modellierung liegt dabei auf der Berücksichtigung der speziellen Anforderungen an die Schnittstelle zwischen verfahrenstechnischer Störfallanalyse und der maschinentechnischen Fehleranalyse.

Integration der Ursache/Folge-Beziehung in das Referenzmodell

Das zu entwickelnde Modell soll nicht als Partialmodell abgebildet werden, sondern in das bestehende Referenzmodell integriert werden. Dazu muß das bestehende Referenzmodell um die Konstrukte zur Abbildung der Ursache/Folge-Beziehung und der dazu inversen Beziehung in allen möglichen Produktzuständen erweitert werden.

Aufbereitung von Methoden der künstlichen Intelligenz

Die Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz für die Fehler- und Störfallanalyse soll zwei Ziele erfüllen: Einerseits soll der Konstrukteur im Auffinden von für ihn relevantem Wissen unterstützt werden und andererseits soll versucht werden, aus den vorliegenden Erfahrungen Schlüsse zu ziehen, die den Konstrukteur bei seinen Entwurfsentscheidungen unterstützen. Dazu sollen besonders hybride Methoden (z.B. Explanation Based Learning der künstlichen Intelligenz, die die Vorteile verschiedener Formen des Lernens verbinden) hinsichtlich der Anwendbarkeit untersucht werden.

5 Zusammenfassung

Im Mittelpunkt des Projektes steht die Unterstützung des interdisziplinären Entwicklungsprozesses von verfahrenstechnischen Maschinen und Anlagen im Sinne des Concurrent Engineering. Basierend auf dem beschriebenen Modell des Konstruktionsraumes wurde ein rechnergestütztes Konstruktionsinformationssystem entwickelt und umgesetzt. Des weiteren wurde die Realisierung des Anforderungsmodellierers vorgestellt.

Mit dem Ziel einer präventiven Fehlervermeidung werden in den geplanten Arbeiten Methoden zur Fehler- und Störfallanalyse in das bestehende Gesamtkonzept (Produktmodell, Systemkonzept) eingebunden. Durch das in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses bereitgestellte Erfahrungswissen kann der Konstrukteur die Produktqualität aufgrund kürzerer Regelkreise verbessern und die Sicherheit der verfahrenstechnischen Maschinen und Anlagen erhöhen.

Literatur

- /1/ Shen, K.-C.: On the exploratory study of reliability and safety engineering techniques and their implementation in the machine design process. Lund, LUTMDN/(TMKT-1001) (1986)
- /2/ Toola, A.: Safety Analysis in the conceptual design of process control. Espoo, Technical Research Center of Finland, VTT Publications 117 (1992)
- /3/ Hollnagel, E.; Cacciabue, C.: Reliability assessment of interactive systems with system response generator. In Safety and Reliability '92, London P 140-150 (1992)
- /4/ Suokas, J.: On the reliability and validity of safety analysis. Espoo, Technical Research Center of Finland, VTT Publications 25 (1985)
- /5/ ESA: Requirements for failure modes, effects and criticality analysis, and associated activities, on ESA space systems. PSS-01-303, Issue 1 Draft 7, Noordwijk, ESA-ESTEC Safety Section (1988)
- /6/ Guidelines for hazard evaluation procedure . Second Edition with Worked Examples, New York, American Institute of Chemical Engineers (1992)
- /7/ Reunanen, M.; Suokas, J.: Safety analysis of a black liquor recovery boiler plant. Espoo, Technical Research Center, Finland, VTT Research Notes 551(1986)
- /8/ Hammer, W.: Product safety management and engineering. Englewoods Cliff, N.J., Prentice-Hall, Inc. (1980)
- /9/ Roland H.E.; Moriarty B.: System safety engineering and management. New York, John Wiley & Sons (1983)
- /10/ Daling, P.M.; Geffen, C.A.: Evaluation of safety assessment methods for the mining industry. Vol. I, Washington, DC, Bureau of Mines, BuMines OFR195(1)-83 (1983)
- /11/ ESA: Hazard Analysis and Safety Risk Assessment, Methods and Procedures. ESA PSS-01-403 Issue 1 (Jan 1994)

Alternatives Verfahren zur Körperschallanalyse am Beispiel der Zahnradstruktur

Engel, K. ; Schmidt, A.

Mit Zunahme geräuscharmer Konstruktionen gewinnt auch im Bereich der Antriebstechnik die Anforderung "lärmarm" neben der übertragbaren mechanischen Leistung und der Gleichförmigkeit der Drehbewegung zunehmend an Bedeutung. Ziel des Forschungsvorhabens war daher die Ableitung von konstruktiven Maßnahmen, sogenannte Impedanzelemente, zur Verminderung der Körperschalleitung des Zahnradkörpers, um so die Schallentstehungskette an einer bisher wenig beachteten Stelle, unter Wahrung technisch und wirtschaftlich sinnvoller Rahmenbedingungen, zu durchbrechen.

Not only torque and smooth power transmission but noise reduction is of great importance in power train design. Measures to reduce structure-borne sound transmission in gear structures are developed. We observed noise generation at a point not usually observed, considered impedance elements for breaking the noise chain, and arrived at a technically and economically practical solution for noise reduction.

1. Einleitung

Eine exakte analytische Lösung der Körperschalleitung in Bauteilen und Strukturen ist auf absehbare Zeit nicht möglich. Zur Lösung der Aufgabe wird daher die Tatsache genutzt, daß Körperschallwellen den physikalischen Gesetzen und Eigenschaften aller mechanischen Wellen unterliegen. Somit können Betrachtungen auf dem Niveau mechanischer Beanspruchungswellen mit merklichen Spannungs- und Verformungswirkungen analog auf das Verhalten der Strukturen bei Körperschallübertragung angewendet werden. Grundgedanke dieses Ansatzes bildet der kombinierte Einsatz von dynamischer Spannungsoptik und Körperschallmessungen zur Analyse des Körperschalleitungsverhaltens. Im Rahmen der Ähnlichkeitsmechanik werden an optischen Modellen Wege gesucht, wie Körperschallwellen durch gezieltes Einbringen von Diskontinuitäten in den Übertragungs-

weg gestreut, gebeugt und reflektiert werden können, um so die Weiterleitung auf die Getriebewelle und abstrahlfähige Fläche des Getriebegehäuses zu vermindern oder bezüglich der Frequenz zu verändern. Diese neuen Ansatzpunkte für die Lärminderung in Antriebssträngen werden exemplarisch an dem Element des krafterregten Zahnradkörpers im Modellversuch herausgearbeitet und durch Körperschallmessungen an realen Zahnradstrukturen verifiziert.

2. Körperschall

2.1 Analyse der Schallentstehungskette

Zahnradgetriebe überführen einen Teil der übertragenen mechanischen Leistung durch kinematische Störungen im Zahneingriff in Schwingungsenergie. Diese wird durch Körperschalleitung über die Zahnradkörper, die Wellen und die Lager auf das Getriebegehäuse und das Fundament übertragen und als Luftschall abgestrahlt. Darüber hinaus geht mit dem Zahneingriff aber auch eine direkte Abstrahlung von Luftschall in das schallharte Getriebegehäuse einher; welcher über Öffnungen im Gehäuse (Gehäusebelüftungen, Wellenabdichtungen) in die Umgebung gelangen kann. Dieser Anteil beträgt jedoch nach Untersuchungen von /1, 2/ im Mittel nur 4 Prozent der gesamten Schalleistung eines Getriebes.

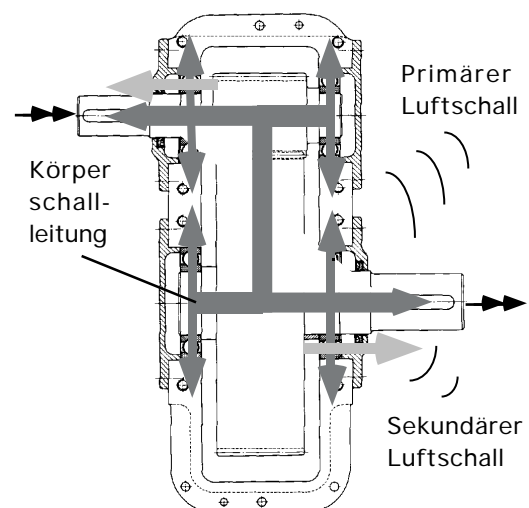


Bild 2.1.1: Schallentstehungskette

In **Bild 2.1.1** sind die Wege der inneren Schallentstehung eines Verzahnungsgetriebes zusammengefaßt. Kraft- und Arbeitsmaschinen im Antriebsstrang bewirken zusätzlich von außen einen Eintrag von Schwingungsenergie in das Getriebe, die das Schwingungs- und Abstrahlverhalten stark beeinflussen /1, 2/. Eine gezielte Geräuschoptimierung erfordert die Kenntnis der Anregungs- und Übertragungsmechanismen und der bestimmenden Einflußgrößen. Die einflußnehmenden Parameter auf die abgestrahlte Schalleistung sind schematisch in **Bild 2.1.2** zusammengefaßt.

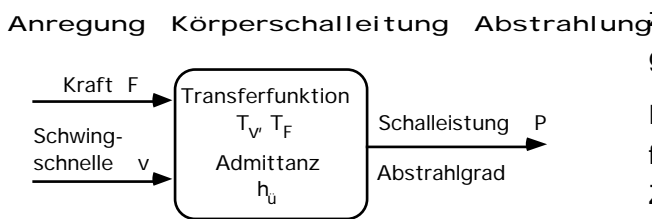


Bild 2.1.2: Einflußgrößen des Geräuschverhaltens

Die innere Geräuschenergie von Verzahnungsgetrieben erfolgt vorwiegend durch Stoßeffekte, lastabhängige und herstellungsbedingte Flankenabweichungen, wechselnde Dämpfung und wechselnde Verzahnungssteifigkeiten über dem Drehwinkel. Diese kinematischen Störungen im Zahnengriff überlagern sich dem als quasistatisch anzusehenden Vorgang der Drehmomentenübertragung in Form wechselnder Anteile der Betriebskraft $F(\omega)$. Die abgestrahlte Luftschalleistung P eines Getriebes ist der abstrahlfähigen Gehäuseoberfläche A und deren Abstrahlgrad σ direkt proportional, vgl. **Gl.(2-1-1)**.

$$P(\omega) = \rho_L c_L F^2(\omega) h_u^2 \sigma(\omega) A \quad (2-1-1)$$

Aus der Kenntnis der bestimmenden Einflußgrößen auf das Getriebegeräusch lassen sich die konstruktiven Ansatzpunkte für Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Geräuschreduzierung ableiten:

- Reduzierung der Anregungskraft
- Reduzierung der Körperschalleitung
- Reduzierung der Gehäuseabstrahlung

2.2 Anregungsmechanismen der Verzahnung

Die Betrachtung der Anregungsmechanismen erfordert eine Unterscheidung zwischen der inneren

Anregung durch das Eingriffsverhalten der Verzahnung und einer äußeren Anregung durch Fremdeinwirkung. Die Anregungsmechanismen treten gemeinsam auf und überlagern sich in ihrer Wirkung. Äußere Anregungen durch ungleichförmig laufende An- und Abtriebsaggregate verursachen periodische Beanspruchungsfrequenzen in der Größenordnung der An- und Abtriebsfrequenz bzw. deren Harmonischen. Für eine repräsentative Betrachtung der Körperschallanregung soll hier insbesondere eine Betrachtung der inneren Anregungsmechanismen erfolgen /1, 2/. Nachfolgend werden die Kriterien Eintrittsstoß, Parameteranregung, Verzahnungsabweichungen sowie lastabhängige Eingriffsstörungen näher erläutert.

Der Eintrittsstoß ist eine lastabhängige Anregungsform. Im unbelasteten Zustand erfolgt der erste Zahnkontakt in der theoretischen Sollposition durch einen tangential gleitenden Zahneintritt. Unter Last entsteht eine Teilungsabweichung der Zähne im Eingriff gegenüber den am Eingriffsbeginn lastfrei einlaufenden Zähnen. Durch die gestörten kinematischen Verhältnisse bildet sich eine von der Eingriffsebene abweichende Normalebene aus, in der die Projektionen der Absolutgeschwindigkeiten der beiden Räder nicht übereinstimmen und das globale Übersetzungsverhältnis verletzt. Die Differenz der projizierten Absolutgeschwindigkeiten erzeugt einen körperschallanregenden Kraftimpuls und wird als Stoßgeschwindigkeit bezeichnet.

Hinsichtlich der parametrischen Einflußgrößen gilt es zu beachten, daß sich der Betrag der Zahneinzelformverformung während des Eingriffs für das treibende Ritzel vom Kopfeingriffspunkt bis zum Fuß (am Rad in umgekehrter Richtung) ändert. Dabei ist der Mittelwert der Einzelfedersteifigkeiten mit den wirksamen Massen maßgebend für die Lage der Hauptresonanz des Getriebes /2/.

Verzahnungsabweichungen haben insbesondere bei niedrigen spezifischen Belastungen einen wesentlichen Einfluß auf die Geräuschenergie. Abweichungsformen wie die Teilungsabweichung, die Flankenformabweichung und die Flankenlinienabweichung, aber auch Verzahnungsabweichungen höherer Ordnung (z.B. Hüllschnittabweichungen) üben eine nennenswerte Körperschallanregung aus. Aufgrund des Fertigungsprozesses durch Ab-

wälzfräsen sind die Abweichungen drehwinkelproportional, stehen aber nicht immer in einem ganz-zahligen Verhältnis zur Eingriffsteilung und können so für das Auftreten von "Geisterfrequenzen" verantwortlich sein /1, 2/.

Der Zahneingriff und die Lastverteilung werden unter hohen Belastungen maßgeblich durch die Federsteifigkeiten der Wellen, Lager und Gehäusebauteile mitbestimmt /2/. Die kinematischen Eingriffsverhältnisse ändern sich über der Eingriffsbreite und entlang der Eingriffslinie und verursachen durch zusätzliche Flankenlinien-, Flankenwinkelabweichungen und Verlagerungen des Eingriffbeginns und Eingriffendes eine verstärkte Körperschallanregung.

2.3 Grundlagen der Körperschalleitung

Zeitveränderliche äußere Kräfte rufen in Festkörpern räumlich und zeitlich veränderliche Verformungen hervor, die sich in Form von Wellen mit charakteristischer Ausbreitungsgeschwindigkeit fortpflanzen. Die äußere Anregung bewirkt einen von der Anregungsstelle ausgehenden Energietransport, der in Form kinetischer und potentieller Energie in Erscheinung tritt. Kompression und Dilatation rufen in allen Medien Dichtewellen mit longitudinaler Bewegung (Longitudinalwellen) hervor. In Festkörpern können im Gegensatz zu Fluiden Schubspannungen übertragen werden. Hierdurch können weitere Wellenarten auftreten, deren wesentliche Formen die Transversal-, die Rayleigh-Wellen und die für Abstrahlung von Körperschall maßgebenden Biege-Wellen sind. Die Longitudinalwelle bewirkt eine Volumenänderung der Massenelemente, Kompression oder Dilatation, je nach Art der äußeren Störung. Dabei erfolgt die Teilchenauslenkung in Ausbreitungsrichtung. Die Transversalwelle dagegen bewirkt eine Schubdeformation der Masseteilchen ohne Volumenänderung. Die Auslenkung erfolgt quer zur Ausbreitungsrichtung der Welle. An Reflexionstellen im Körperschalleitungsweg können Umwandlungen der einen Wellenart in eine andere auftreten.

3. Körperschallminderungsmaßnahmen

Im Zentrum der Betrachtungen steht der Zahnrad-

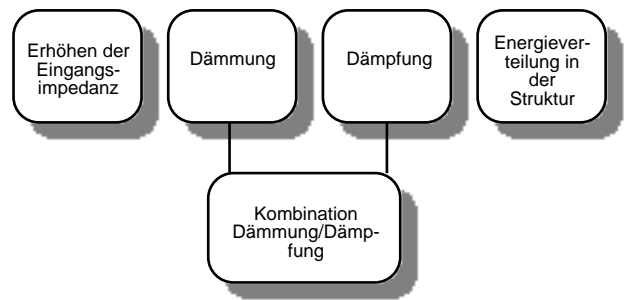


Bild 3.1: Maßnahmen zur Körperschallminderung

körper als Konstruktionselement. Neben die Anforderungen der Drehmoment- und Kraftleitung sowie der Verzahnungszentrierung tritt der Wunsch nach einer Reduzierung der Körperschalleitung. Ziel ist die akustische Entkopplung der angeregten Verzahnung von der Getriebewelle. **Bild 3.1** zeigt die heute zum Stand der Technik gehörenden konstruktiven Maßnahmen zur Verringerung der Körperschallemission.

3.1 Dämmung von Körperschall

Grundprinzip der Körperschalldämmung ist die Reflexion der Körperschallwellen an Störungsstellen im Ausbreitungsweg. An Diskontinuitäten im Körperschallweg wird die Energie der Körperschallwellen teilweise reflektiert und in der Weiterleitung verringert. Die Dämmwirkung ist abhängig von der Änderung der mechanischen Impedanz an der Störstelle und der Wiederholhäufigkeit der Störstellen im Körperschalleitungsweg. Reflexionen von Körperschallwellen treten an Unstetigkeitsstellen in der mechanischen Struktur z. B. an Querschnittsänderungen, Massenanhäufungen, Verzweigungen, elastischen Zwischenschichten und an Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Medien auf. Eine Zielvorstellung der Körperschalldämmung ist die Eingrenzung der Körperschallenergie auf einen beschränkten Bauteilbereich. Der reflektierte Energieanteil durchläuft mehrfach den Bauteilbereich zwischen der Anregungsstelle und der Dämmmaßnahme und wird durch vorhandene Dämpfungsmechanismen dem System entzogen. Andererseits kann durch Streuung der Körperschallwellen an inneren Diskontinuitäten eine weiträumige Verteilung der Körperschallenergie zur Senkung des lokalen Energieniveaus erfolgen. Zur mathematischen Beschreibung des schwingungsmechanischen Isolationsvermögens führt /5/ eine Admittanzkonzeption

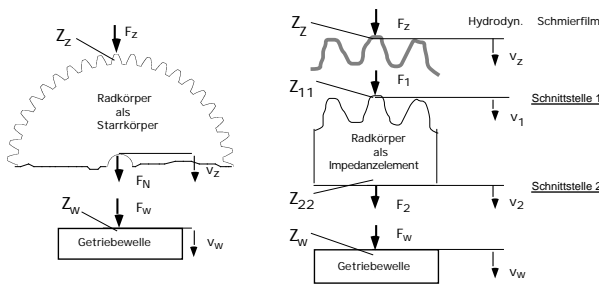


Bild 3.1.1: Impedanzmodell des Radkörpers

in die Berechnung ein, die hier auf den Zahnradkörper angewandt vorgestellt wird. Der Ansatz ermöglicht, durch Messung der Ein- und Übertragungsimpedanzen der miteinander gekoppelten Bauteile, eine experimentelle Optimierung. **Bild 3.1.1 (links)** zeigt schematisch das Zahnradkörper-Getriebewelle-System. Auf die Verzahnung wirkt die Anregungskraft F_z . Durch die Nachgiebigkeit der Verzahnung und des Zahnradkörper-Getriebewelle-Systems weicht der zeitliche Kraftverlauf am Eintritt in den Radkörper von der Anregungskraft ab. Die Indizierung der Übertragungsimpedanzen gibt den Ort der Kraft und der Schnellmessung an. Ohne Isolationselement wird das System mit der Eingangsimpedanz der Welle Z_w abgeschlossen. Berücksichtigt man die Massenbelegung des Radkörpers und die hydrodynamische Schmierung im Kontakt (**Bild 3.1.1 rechts**), so kann nur im statischen Beanspruchungsfall $F_1 = F_2$ angesetzt werden. Im Frequenzbereich kann infolge der Massenbelegung ein Kraftdefizit vorliegen. Die Schwinggeschwindigkeiten v_1 und v_2 an den Schnittstellen werden durch die gemeinsam einwirkenden Kräfte F_1 und F_2 hervorgerufen. Obiger Ansatz ermöglicht die Ableitung von Isolationsmaßnahmen unter gegebenen Randbedingungen, danach gilt für das Verhältnis aus eingeleiteter Kraft an der Getriebewelle mit bzw. ohne Isolationsmaßnahme der in **Gl. (3-1-1)** dargestellte Zusammenhang.

$$\frac{F_{W \text{ mit}}}{F_{W \text{ ohne}}} = \frac{(Z_{11} + Z_w)(Z_{11} + Z_z) - Z_{12}^2}{Z_{21}(Z_w + Z_z)} \quad (3-1-1)$$

3.2 Körperschalldämpfung

Ohne das Vorhandensein von Dämpfung verursacht eine beliebige Dämmungsmaßnahme in Bauteilen endlicher Größe einen Anstieg der Körperschallenergie vor der Maßnahme, der exakt der Dämmwirkung der Maßnahme entspricht. Für eine

zu betrachtende Stelle hinter der Dämmungsmaßnahme tritt daher keine Änderung des Körperschallniveaus ein. Nur in Kombination mit Dämpfung ist für Bauteile endlicher Größe eine Abnahme des Körperschallpegels zu erzielen. Die Körperschalldämpfung beruht auf der irreversiblen Umwandlung von Schwingungsenergie in andere nicht mehr auf das Schwingssystem einwirkende Energieformen. Dieser auch als Energiedissipation bezeichnete Vorgang bewirkt mit der Zeit abnehmende Amplituden bei freien Schwingungen und endliche Amplitudenhöhen erzwungener Schwingungen in Resonanzbereichen. Eine Erhöhung der Dämpfung kann aber auch eine Amplitudenverstärkung bewirken. Die Dämpfungswerte üblicher Getriebeausführungen erreichen ein Lehrsches Dämpfungsmaß von 5 bis 10%. **Bild 3.2.1** gibt einen Überblick über die am Zahnradkörper wirksamen Strukturdämpfungsmechanismen.

Die unterschiedlichen wirksamen Dämpfungsme-

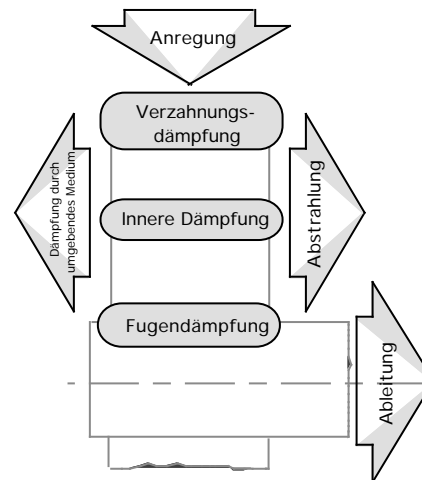


Bild 3.2.1: Dämpfungsmechanismen am Zahnradkörper

chanismen besitzen einen unterschiedlichen Einfluß auf die Ausprägung der Resonanzamplituden. In der Torsionsschwingung überwiegt der Einfluß der Torsionsdämpfung der Wellen; die Biegedämpfung der Wellen und die Lagerdämpfung sind hingegen zu vernachlässigen. Gemessene Dämpfungswerte der Torsionsschwingungen deuten auf den Einfluß der Wellen-Naben-Verbindung hin. In der Hauptresonanz überwiegt der Einfluß der Verzahnungsdämpfung. Die Ableitung von Energie aus dem betrachteten Bauteil bewirken die Verlustfaktoren der Ableitungsdämpfung in Verbindung mit der Körperschalleitung und der Strahlungsdämpfung über die Luftschallabstrahlung. Den geringsten An-

teil an der Dämpfung bildet die innere Dämpfung üblicher Zahnradwerkstoffe. Die Verzahnungsdämpfung setzt sich aus der inneren Werkstoffdämpfung der angeregten Zähne, der Dämpfung im Bereich des Zahnfußes und der Dämpfung im Bereich der elastisch verformten Zahnflanke zusammen. Die maßgebliche Größe bildet das Schmiermittel. Die Verzahnungsdämpfung beeinflusst die Hauptresonanz und vereinzelt zugehörige Vorresonanzen. Die Torsionsresonanz und die Lagerresonanzen bleiben unbeeinflusst. Die werkstoffspezifische innere Dämpfung beruht auf mikrophysikalischen Effekten im atomaren und molekularen Bereich. Die in der Zahnradtechnik üblichen Strukturwerkstoffe besitzen eine geringe innere Dämpfung. Die Fügstellendämpfung wird von Relativbewegungen der Kontaktflächen infolge unterschiedlicher elastischer Verformungen hervorgerufen. Die Relativbewegungen resultieren aus tangentialer Makroschlupf. Eine Vorausberechnung der Dämpfungseigenschaften ist durch ungenügende Modelle noch recht unsicher. Der spezifische Verschleißzustand, plastisches Fließen, Korrosion und die für eine wirtschaftliche Fertigung notwendigen Toleranzen führen zu großen Streuungen der Ergebnisse. Die Wirkung verschiedener Arten der Zusatzdämpfung ist in starkem Maße von der einwirkenden Wellenart abhängig. Die Dämpfung von Longitudinalwellen findet in der Praxis nur in Sonderfällen Anwendung. In weitaus stärkerem Maße wird die Dämpfung der Abstrahlung von Körperschall durch Biegewellen in der Literatur behandelt /3, 4/.

4. Experimentelle Untersuchungsmethodik

4.1 Dynamische Spannungsoptik

Die Spannungsoptik ist ein trägheitsloses experimentelles Verfahren der optischen Ganzfeldspannungsanalyse. Die Untersuchungen erfolgen an Modellen aus einem spannungsoptisch aktiven Material im Reflexionsverfahren. Unter Wahrung der Ähnlichkeitsgesetze können auf Realteile übertragbare Untersuchungen unter statischen und dynamischen Beanspruchungen durchgeführt werden. Bei einer überlagerten statischen und dynamischen Beanspruchung erfolgt eine Superposition beider Komponenten.

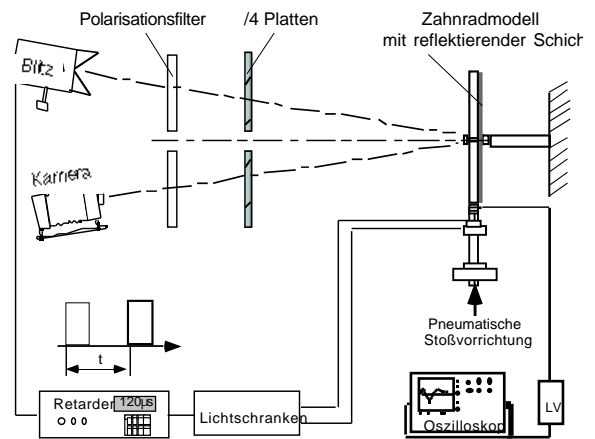


Bild 4.1.1: Stoßuntersuchungen im Reflexionsverfahren

Für die Analyse des Ausbreitungs- und Reflexionsvorganges der Körperschallwellen wurde das von Kuske entwickelte Verfahren der verzögerten Einzelblitze eingesetzt. Der verwendete Versuchsaufbau ist in **Bild 4.1.1** dargestellt. Die breitbandige Stoßanregung wird durch eine pneumatische Stoßvorrichtung aufgebracht. Eine Lichtschranke im oberen Teil des Schießrohres liefert beim Durchlauf der Kugel das Triggersignal für die stufenlose Verzögerungseinrichtung. Nach Ablauf der voreingestellten Verzögerungszeit wird ein Blitz ausgelöst. Zur Wiedergabe der Einbaubedingungen werden die Zahnradmodelle auf einer starr befestigten Achse eigenspannungsfrei aufgespannt. Unter der Voraussetzung exakt reproduzierbarer Stoßanregungen kann damit jeweils ein diskreter Zeitpunkt des dynamischen Beanspruchungsvorganges als Momentaufnahme photographisch festgehalten werden. Der zeitliche Ablauf des Vorganges kann durch Variation der Verzögerungszeit in einer Serie von Einzelbildern dokumentiert werden.

Für die Untersuchung des frequenzselektiven Verhaltens wurde eine harmonische Anregung der Modelle mittels eines elektrodynamischen Schwingungserregers vorgenommen. Das Modell wird in einem geschlossenen Regelkreis mit einer konstanten frei definierbaren Kraftamplitude bis maximal 1 kN in einem Frequenzbereich bis 4 kHz angeregt. Die frequenzselektiven Untersuchungen wurden im Druck-Schwellbereich vorgenommen. Das zu übertragende Drehmoment wurde durch eine statische Vorspannung des Modells mit überlagerter dynamischer Amplitude simuliert. Das Superpositionsprinzip gestattet eine getrennte Betrachtung von quasi-statischen und dynamischen Beanspruchungsvor-

gängen. Der Körperschalleitungsvorgang zwischen Anregungsstelle und Nabe wird durch das Auftreten einer spezifischen Phasendifferenz geprägt. Durch den Einsatz eines Stroboskops und die Wahl von Blitzfrequenzen um die Anregungsfrequenz kann der gesamte Schwingungsvorgang einer foto- bzw. videotecnischen Betrachtung zugänglich gemacht werden. Für ganzzahlige vielfache Blitzfrequenzen der Anregungsfrequenz können harmonische Oberwellen detektiert werden.

4.2 Piezosensorische Messungen

Neben der dynamischen Spannungsoptik werden im Rahmen der Körperschallanalyse auch punktuell messende Verfahren eingesetzt. Dabei werden insbesondere lokal, zeitliche Änderungen einer Zustandsgröße auf einer Struktur erfaßt. Neben dem zeitlichen Verlauf des Krafteinleitungssignals an der Zahnflanke werden die Lagerreaktionen der Zahnradmodelle auf der Welle mittels piezoelektrischen Kraft- und Momentenaufnehmern in einer feststehenden Meßachse erfaßt.

4.3 Modellvarianten

Die Untersuchungen gliedern sich in die Bereiche der Eingangsimpedanz, der Körperschalldämpfung und -dämpfung. In spezifischen Modellvarianten wurde eine gestaltungsgerechte Anpassung der Körperschallminderungsmaßnahmen an den Anwendungsfall Zahnradkörper vorgenommen, um grundsätzliche Aussagen über das Körperschallverhalten abzuleiten. **Bild 4.3.1** zeigt einige charakteristische Geometrien aus den verschiedenen betrachteten Gruppen. Zur Verbesserung der Körperschalldämpfung wurden mehrere unterschiedliche Zielrichtungen verfolgt:

- Durch Streuung und Beugung der Wellenfronten an kreislochförmigen Diskontinuitäten kann die Körperschallenergie auf einen größeren Bereich verteilt werden, wodurch ein Absinken des spezifischen Energieniveaus zu erwarten ist.
- Das Streuungs- und Reflexionsvermögen der Festkörperwellen an konvexen Diskontinuitäten wurde an Kreisnut-, Labyrinth- und Zusatzmassen-Varianten untersucht. Parameter bildeten unterschiedliche Radien und Querschnittsge-

staltungen der Störstellen.

- Das Interferenzverhalten sich verjüngender Bauteilbereiche mit konkaver oder kreissegmentförmiger Formgebung. Durch die Überlagerung gleichartiger Wellenfronten entstehen in sich verjüngenden Strukturen spannungsfreie Zonen.

Die innere Dämpfung der Werkstoffe verringert mit zunehmender Entfernung von der Quelle die Körperschallamplituden. Durch mehrfache Reflexion an Diskontinuitäten im Ausbreitungsweg wird die effektiv von den Körperschallwellen zurückgelegte Entfernung vergrößert, so daß alle Modell-Varianten zur Untersuchung der Körperschalldämpfung gleichzeitig den Effekt der Körperschalldämpfung ausnutzen. In den Untersuchungen zur Körperschalldämpfung wurden gezielte Aussagen zum Einsatz hochdämpfender Zusatzwerkstoffe und zur Hierarchie der zu bedämpfenden Bereiche des Radkörpers erarbeitet. Durch Einsatz versteifender Zusatzringe auf dem Radkörper sollte das Verbesserungspotential von trägen Massen zur Verminderung der Körperschalleinleitung und Beruhigung der Struktur untersucht werden.

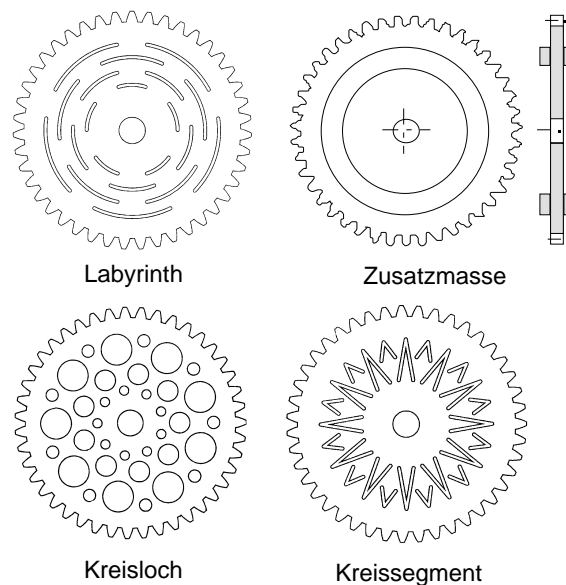


Bild 4.3.1: Beispiele der Modellvarianten

5. Ergebnisse der Modellversuche

Zur Beurteilung des Körperschallübertragungsverhaltens werden im Rahmen der punktuellen piezosensorischen Untersuchungen neben der Impedanz die Kenngrößen Durchgangsdämpfung, Einfügungsdämpfung und die Transferfunktion herange-

zogen. Das Durchgangsdämmmaß L_D ist definiert als die leistungsbezogene Differenz der Schnelle bzw. Wechselkräfte an der Stelle 1 vor und an der Stelle 2 hinter dem Isolierelement in der Struktur. Das Durchgangsdämmmaß bietet einen relativen Vergleich von Varianten unter gleichen Randbedingungen und konstanter Anregung. Aus dem Einfügungsdämmmaß L_E ist direkt das Verbesserungspotential einer Schallminderungsmaßnahme abzulesen. Das Einfügedämmmaß wird durch die leistungsbezogene Differenz der Schnellen bzw. Wechselkräfte ohne und mit eingefügten Isolationselementen an einer zu entkoppelnden Stelle 2 im Körperschallleitungsweg gebildet. Unter Zugrundelegung der Analogiebetrachtung von Körperschall- und Spannungswellen erfolgt bei den spannungsoptischen Untersuchungen eine vollständige Auswertung des Spannungsfeldes zur Bewertung des Körperschallübertragungsverhaltens.

5.1 Spannungsoptische Untersuchungen

Der Einfluß der inneren Diskontinuitäten auf die Körperschallleitung wird anhand der analytisch berechneten Wellenausbreitung und Auswertung der Isochromatenaufnahmen für verschiedene Modellvarianten unter instationärer Stoßanregung, **Bild 5.1.1**, sowie frequenzselektiver harmonischer Anregung, **Bild 5.1.2**, ermittelt. Bild 5.1.1 zeigt beispielhaft die Isochromatenverläufe für zwei verschiedene Modellvarianten anhand ausgewählter Zeitpunkte nach dem Stoßvorgang. Die hohe Ableitungsdämpfung durch die Getriebewelle verursacht ein rasches Abnehmen der Ausbreitungs- und Reflexionserscheinungen der Spannungswellen im Modellinneren. Die Isochromatenaufnahmen der gestörten Strukturen belegen eine wesentliche Verringerung der radialen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Spannungswellen gegenüber dem Grundmodell. Zur Beurteilung der Energieverteilung in der Struktur und der Dämmungseigenschaften der Varianten bei Stoßanregung wurde für diskrete Zeitpunkte eine vollständige Auswertung der Spannungsverteilung vorgenommen. **Bild 5.1.3** zeigt eine Darstellung der nach der Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) berechneten Vergleichsspannung. Das Quadrat der Vergleichsspannung beschreibt die Verteilung der potentiellen Energie

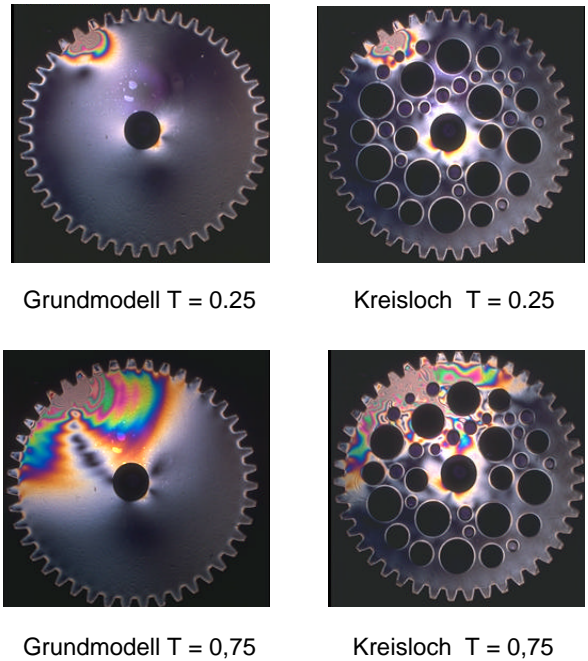


Bild 5.1.1: Isochromaten des Grundmodells zu diskreten Zeitpunkten

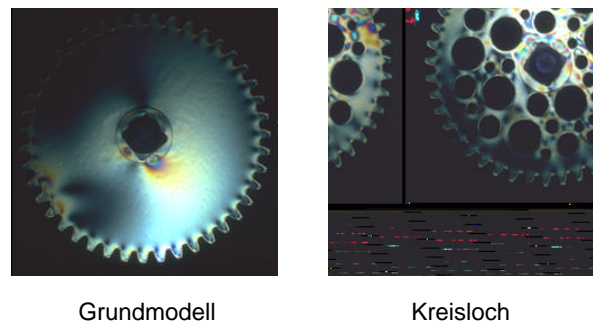


Bild 5.1.2: Isochromaten am Anregungsort bei 250 Hz

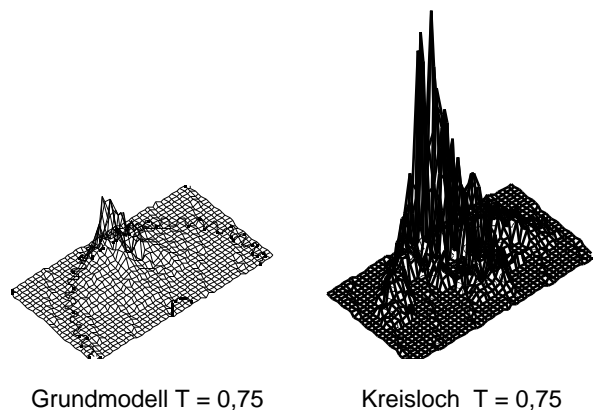


Bild 5.1.3: Vollständige Auswertung des Isochromatenfeldes nach der GEH

des Schwingungsvorganges. An den Varianten kann eine Umverteilung des Energieniveaus nachgewiesen werden. An den Störstellen im Körperschallleitungsweg werden die Spannungswellen in den äußeren Zahnradkörper zurückreflektiert, gestreut und gebeugt. Vor den Störstellen ist, durch die

Überlagerung der sich primär ausbreitenden Körperschallwellen mit den reflektierten Wellenfronten, ein Anstieg der Gestaltänderungsenergie zu verzeichnen, der das Reflexionsverhalten der Störstellen charakterisiert. Sowohl die absolute Höhe der Spannungen als auch der Gradient wird durch die Dämmmaßnahmen beeinflusst.

5.2 Körperschallmessungen

Zur vergleichenden akustischen Bewertung der Varianten wurden die Transferfunktionen, Durchgangs- und Einfügungsdämmungen unter Kraftanregung ermittelt. Die Messung der Lagerreaktionen wurde komponentenweise in einem radial und tangential am Eingriffspunkt E orientierten Koordinatensystem durchgeführt und hieraus die Resultierende bestimmt. Die Charakteristiken der einzelnen Varianten sind ausführlich in /6/ dargestellt. **Bild 5.2.1** zeigt beispielhaft eine Gegenüberstellung der Transferfunktionen und Einfügungsdämmungen der resultierenden Kräfte für einige ausgewählte Varianten. Die Verifikation der Modellversuche erfolgte an realen Zahnradstrukturen. Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Messungen auf dem institutseigenen Schwingungsprüfstand bestätigten weitgehend die in den spannungsoptischen und sensorischen Modellversuchen ermittelten Er-

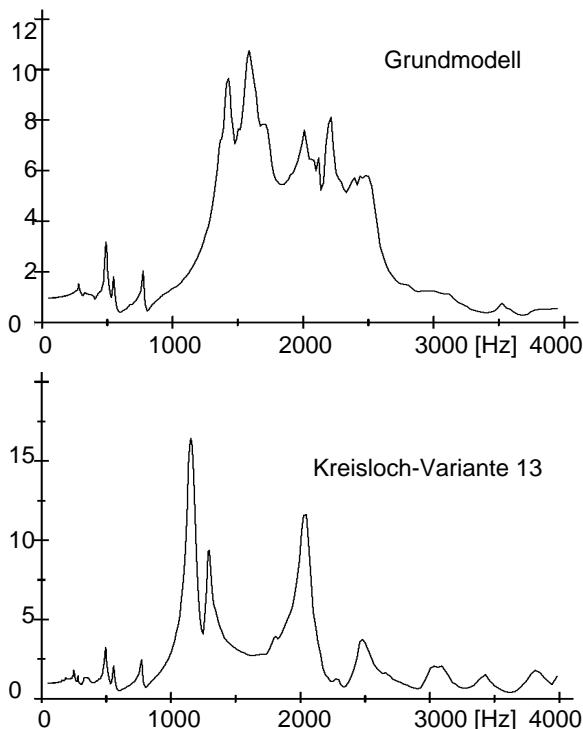


Bild 5.2.1: Gegenüberstellung der Transferfunktionen von Grundmodell und einer Störstellengeometrie

gebnisse.

6. Zusammenfassung

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die mechanische Impedanz des Radkörpers nicht losgelöst von den an den Koppelstellen zum kämmenden Rad oder der Getriebewelle auftretenden Randbedingungen gesehen werden kann. Die Übertragungsimpedanz des Radkörpers wird wesentlich von der Auslegung der Getriebewelle, der Lagerung und den kraftleitenden Gehäuseteilen mitbestimmt. Die Eingangsimpedanz kann hingegen positiv durch Massenanhäufungen im äußeren Radkörper beeinflusst werden. Die Untersuchungen zur Körperschalldämmung belegen auch bei kompakten Bauteilen die Möglichkeit einer Energieverteilung durch Diskontinuitäten im Ausbreitungsweg der Körperschallwellen. Die an diesen Diskontinuitäten ausgelösten Reflexionen beeinflussen stark die Amplitudenverteilung und den Gradienten der Körperschallwellen. Die Kombination von Körperschalldämmungsmaßnahmen mit ergänzenden Maßnahmen der Körperschalldämpfung bewirkt nur in Resonanzen der Struktur eine Reduzierung der Amplitudenüberhöhungen. In den Untersuchungen zeigen Dämpfungsmaßnahmen am äußeren Radkörper gegenüber anderen Strukturbereichen eine erhöhte Wirksamkeit.

7. Literatur

/1/ Opitz, H.; Timmers, J.; u.a.: Möglichkeiten zur Verbesserung des Geräuschverhaltens von Zahnradgetrieben. Forschungsber. des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 1867, 1967

/2/ VDI Richtlinie 3720 Blatt 9.1: Lärmarm Konstruieren-Leistungsgetriebe. VDI Verlag, 1990

/3/ Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall, Springer-Verlag, Berlin 1996

/4/ Heckl, M.; Müller, H. A.: Taschenbuch der Technischen Akustik. 2. Auflage, Berlin 1994

/5/ Meltzer, G.: Schwingungsisolierung im akustischen Frequenzbereich. Wiss. Zeitschrift der TH Karl-Marx-Stadt, Jahrg. XIV, Heft 2, 1972

/6/ Engel, K.: Analyse der Körperschalleitung mit sensorischen, optischen und numerischen Verfahren am Beispiel von Zahnradkörpern, Diss. TU Clausthal 1996 (unveröffentlicht)

EQUIP - Konstruktions-Beratungssystem für die Entwicklung lärmarmen Produkte

Gummersbach, F.; Haje, D.

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).

Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick der im Rahmen des EQUIP-Projektes erarbeiteten Ergebnisse kurz vor Ende des Projektes (Dez. 1996).

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).

This report gives a overview of some EQUIP results towards the end of the project (Dec. 1996).

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 Lärmproblematik 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.

2. Systemanforderungen der Anwender

Zur Bestimmung der Systemanforderungen wurde 1992 eine Umfrage unter 27 europäischen Unternehmen durchgeführt, vgl. /2, 3/.

Desweiteren wurden die bei den einzelnen am Projekt beteiligten Industriepartnern durchlaufenen Konstruktionsprozesse zur Abstimmung des Beratungssystems auf deren Belange detailliert untersucht. Anhand der hier gewonnenen Ergebnisse wurde die dem Beratungssystem zugrundeliegende Methodik zur Konstruktion lärmarmen Produkte entwickelt, opti-

miert und bewertet. /2/

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 bereitgestellte Information 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. /4/

3. Beschreibung 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.

Die im Rahmen des Projektes entwickelte Konstruktionsmethodik läßt sich anhand von **Bild 1** 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 erfolgt unter Berücksichtigung der Art des Produktes (z.B. Fahrzeug, Baumaschine) und des angestrebten Marktes.

Die Erarbeitung eines Produktkonzepts basiert auf maschinenakustischen Konstruktionsregeln, einfa-

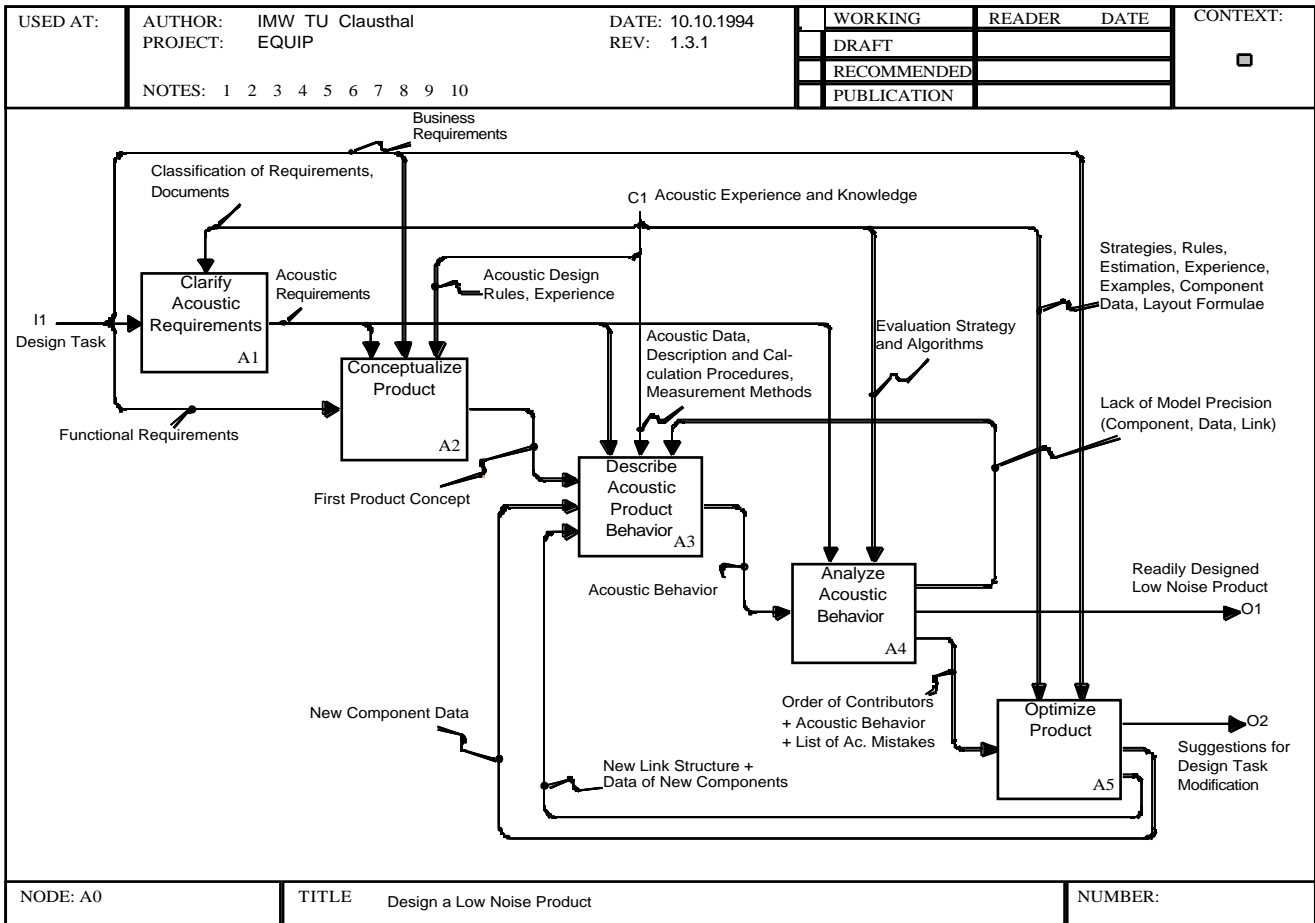


Bild 1 Methodik zur Konstruktion lärmarmen Produkte /4/

chen Formeln und grundlegenden Zusammenhängen. 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 Produktverhaltens 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 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/

4. Informationsmodellierung

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

Verwendet wurde die Beschreibungssprache EXPRESS (entwickelt für den Produktdatenaustausch im Rahmen von STEP, beschrieben in der internatio-

nen Norm ISO 10303-11).

Das Informationsmodell beinhaltet alle maschinenakustisch relevanten Komponenten und Schallentstehungsmechanismen, maschinenakustische Produktanforderungen mit den dazugehörigen Dokumenten, maschinenakustische Konstruktionsregeln usw.

Die alleinige Betrachtung der Komponenten ist oft für die Beschreibung der Schallentstehung nicht ausreichend; in vielen Fällen muß zur eingehenden Klärung der Schallsituation auch eine Betrachtung der Schallentstehungsmechanismen vorgenommen werden. Unter einem Schallentstehungsmechanismus ist das physikalische Prinzip der Schallentstehung innerhalb einer Maschine oder einer Struktur zu verstehen. Für den Konstrukteur ist die Bereitstellung von Informationen darüber, welche Schallentstehungsmechanismen für seine Konstruktion wichtig sind und in welcher Komponente diese auftreten, ausgesprochen nützlich.

Die Schallentstehungsmechanismen können in Körperschallquellen und in Fluidschallquellen (Flüssigkeit und Gas) untergliedert werden. /5/ Im Rahmen des EQUIP-Projekts wurden 12 grundlegende Körperschallquellen und 16 grundlegende Fluidschallquellen, die für das Gebiet der Maschinenakustik relevant sind, ausführlich beschrieben.

Somit hat der Konstrukteur die Möglichkeit, seine Maschine oder Anlage aus Komponenten und Schallentstehungsmechanismen aufzubauen. 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. /4/

5 Softwaretechnische Realisierung

Die softwaretechnische Realisierung vollzog sich projektbegleitend mittels einfacher Prototypen, um durch die direkte Umsetzung der Projektergebnisse deren Anwendbarkeit der zu überprüfen.

Im Rahmen der Konstruktionsmethodik wurde auch eine Vorgehensweise entwickelt, mit der der Konstrukteur seine maschinenakustische Problemstellung auf dem Rechner abbilden und auf weitere maschinenakustische Informationen gezielt zugreifen kann. Hierfür wurden softwaretechnische Module erstellt, die den Konstrukteur im Rahmen der unter Kapi-

tel 3 beschriebenen Konstruktionsmethodik unterstützen.

5.1 Der EQUIP-Modeller

Der Modeller stellt das zentrale Werkzeug dar, mit dem alle notwendigen Module zur Informations-Ein- und -Ausgabe aufgerufen werden können und ein maschinenakustisches Modell erstellt wird.

Um eine Konstruktion maschinenakustisch beurteilen zu können ist eine Abbildung des Konstruktionsobjektes auf dem Rechner notwendig, die eine Interpretation durch den Rechner erlaubt. Hierfür wird eine Modellierungsmethode benötigt, die für den Konstrukteur leicht verständlich anzuwenden ist und gleichzeitig durch den Rechner weiter verarbeitet werden kann. Die im Projekt verwendete Methode unterstützt sowohl die Denkweise des Konstrukteurs, die Berücksichtigung der physikalischen Schallentstehungskette (mit Quelle, Übertragung und Abstrahlung), sowie den Zugriff auf qualitative maschinenakustische und systemspezifische Informationen und Auswertungen in quantitativer Hinsicht.

5.2 Schallflußmodell

Die unter Kap. 5.1 gestellten Anforderungen sind durch die Verwendung eines graphisch orientierten Schallflußmodells zu erfüllen. Die graphische Benutzerschnittstelle benutzt der Konstrukteur um seine Konstruktion, im akustischen Sinn, mittels bestimmter Funktionsträger zu erstellen. Der Modeller benutzt die semantischen Beziehungen des Modells für einen eindeutigen Zugriff auf die Informationen der verwendeten Funktionsträger. Das Schallflußmodell ermöglicht somit einen Zugriff auf qualitative und quantitative Informationen (Wissen).

Quantitative Informationen werden hier als Daten und einer Berechnung zugängliche Teile des Schallflußmodells verstanden. Hierfür ist eine exakte Definition der direkten und indirekt bezogenen Formeln und Daten für jeden Funktionsträger notwendig. Durch die Definition der Verbindungen zwischen zwei Funktionsträgern werden die Eingangs- und Ausgangsinformationen automatisch festgelegt. Dies setzt voraus, daß Formeln und ihre übertragenen Attribute für die Berechnung der Schallübertragung und Abstrahlung definiert wurden.

Der Zugriff auf qualitative Informationen wird mittels der platzierten Funktionsträger des Schallflußmodells

realisiert. Somit ist ein Zugriff auf Konstruktionsregeln, Hinweise, leisere alternative Komponenten und Maßnahmen zur Lärmreduzierung möglich.

Für die akustische Modellierung des Konstruktionsobjektes stehen dem Benutzer "Funktionsträger" zur Verfügung, mit denen er das Schallflußmodell erstellen kann. Als Konsequenz daraus hat jedes graphische Element, das durch den Modeller repräsentiert wird, eine ganz bestimmte Funktionalität für den Modeller und dem Benutzer.

Als Funktionsträger fungieren Komponenten, Schallentstehungsmechanismen und Empfänger deren Eigenschaften mittels eines Informationsmodells beschrieben wurden (siehe Kap. 4).

Über die graphische Benutzerschnittstelle wird neben der reinen graphischen Repräsentation auch eine funktionale Beziehung zwischen den verwendeten Funktionsträgern (Komponenten, Schallentstehungsmechanismen und Empfänger) spezifiziert, **Bild 2** und **Bild 6**. Dazu werden zum Anfang die schallrelevanten Komponenten und Schallentstehungsmechanismen ausgewählt und auf der Benutzeroberfläche platziert. Als Hilfestellung kann hier ein im Hintergrund gelegtes Bild dienen. Im nächsten Schritt werden die Beziehungen zwischen den einzelnen Funktionsträgern mittels einer Verbindungsstruktur hergestellt.



Bild 2 Erstellung eines Schallflußmodells

Die Aufstellung des Schallflußmodells erfolgt komponentenorientiert, welches der Sichtweise des Konstrukteurs entspricht und somit eine abstrahierte Darstellung seines Konstruktionsobjektes repräsentiert. Es enthält zunächst keine quantitativen maschinenakustischen Angaben. Die weitere Spezifizierung des maschinenakustischen Modells erfolgt über die weite-

re Angabe der funktionsträgerbezogenen Kenngrößen. Für nachfolgende Berechnungen können die notwendigen Daten über entsprechende Editoren eingegeben oder aus Datenbanken übernommen werden.

5.3 Zugriff auf qualitative Informationen

Für die Erstellung eines akustisch verbesserten Produkts werden neben Berechnungsprogrammen auch qualitative Informationen benötigt. Der Zugriff auf diese erfolgt über eine implementierte Hilfsfunktionalität, mit der der Konstrukteur kontextsensitiv die geforderten Informationen abrufen kann. Hierüber erhält der Benutzer Zugriff auf qualitative maschinenakustische Informationen wie Maßnahmen zur Lärmreduzierung, Konstruktionsregeln zu bestimmten Komponenten, **Bild 3**, Schallentstehungsmechanismen, **Bild 4**, und systemspezifische Informationen wie Erläuterungen zur Software und akustischen Bezeichnungen. Gerade die qualitativen maschinenakustischen Informationen geben dem im Bereich der Maschinenakustik unerfahrenen Konstrukteur die Möglichkeit sich sukzessiv in das Problemgebiet einzuarbeiten.

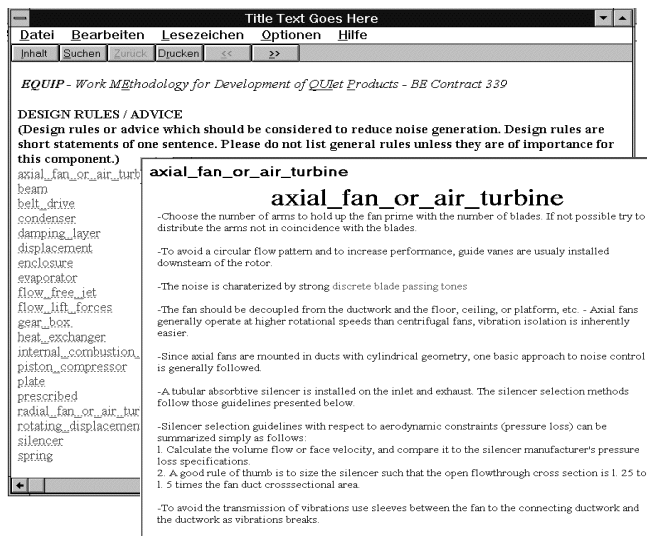


Bild 3 Konstruktionsregeln für den Axialventilator

5.4 Berechnungsfunktionalität

Das durch den Konstrukteur aufgebaute Schallflußmodell enthält durch die Angabe der Verbindungsstruktur auch eine funktionale Beziehung zwischen den Funktionsträgern, so daß nach der Eingabe aller notwendigen Daten ein Berechnungsmodell abgeleitet werden kann. Dieses wird durch ein Programm-Modul berechnet, und die Ergebnisse über Schnittstellen wieder an den EQUIP-Modeller übergeben.

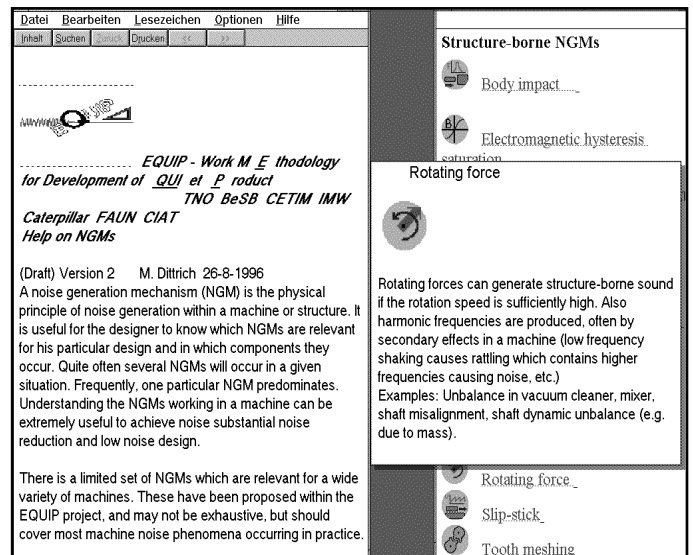


Bild 4 Erläuterungen zu den Schallentstehungsmechanismen

Die Ergebnisse können dann über den Modeller in einer geeigneten Form dargestellt werden. Eine Übersicht über die implementierten Berechnungsmöglichkeiten kann ebenfalls über die zur Verfügung gestellte Hilfsfunktionalität erhalten werden, **Bild 5**.

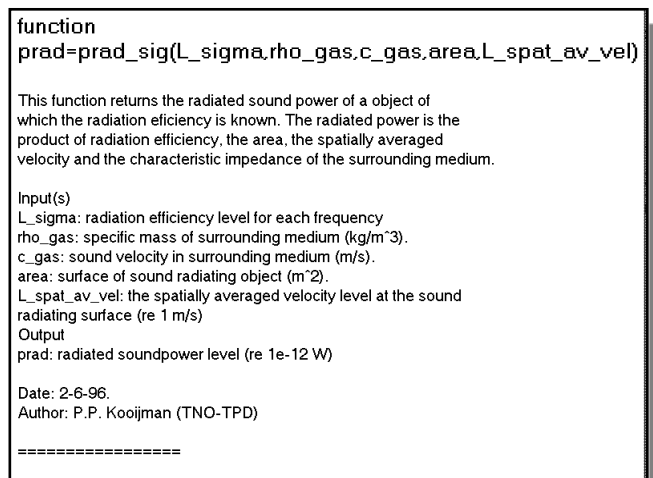


Bild 5 Auflistung und Erläuterung der implementierten Berechnungsfunktionen

5.5 Berechnungsbeispiel

Bild 6 zeigt ein berechnetes Schallflußmodell mit Schallentstehungsmechanismen, Komponenten und einem Empfänger. Berechnet wurde der gesamte A-bewertete Schalleistungspegel an der Empfängerposition. Die Berechnung basiert auf den Schalleistungsspektren der Hydraulikpumpe, des Schalldämpfers und der Kapsel.

Zum besseren Überblick zeigt das linke Diagramm (Figure No. 3) die Einzelspektren der im Schallfluß vor dem Empfänger stehenden Komponenten. Das Bal-

kendiagramm (rechts unten) gibt den A-bewerteten Gesamtpegel aller und der einzelnen Komponenten an. Mittels dieses "Level ranking" erhält man auf einfacher Weise die Möglichkeit, die Komponenten zu ermitteln, die wesentlichen Einfluß auf den gesamten Schalleistungspegel haben.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Artikel kann nur einen begrenzten Überblick über die Leistungsfähigkeit des im Rahmen des EQUIP-Projektes entwickelten Konstruktionsberatungssystems geben, zudem erarbeitete Projektergebnisse noch laufend in das System implementiert werden und damit die Leistungsfähigkeit erweitern.

Durch die Bereitstellung von aufgearbeitetem qualitativen und quantitativen maschinenakustischen Wissen erhält der Konstrukteur ein Werkzeug, mit dem er sein Konstruktionsobjekt in maschinenakustischer Hinsicht verbessern und optimieren kann. Gleichzeitig hat der maschinenakustisch unerfahrene Benutzer die Möglichkeit, über die implementierten Hilfsfunktionen sein akustisches Wissen zu erweitern.

Im Rahmen des kurz vor dem Abschluß stehenden EQUIP-Projektes wurde ein Konstruktions-Beratungssystem für die industrielle Nutzung entwickelt.

Das System wurde für die Unterstützung auch solcher Konstrukteure entwickelt, die kein maschinenakustisches Expertenwissen besitzen. Das System ist flexibel erweiterbar und kann auf branchen- und firmenspezifische Belange angepaßt werden.

Am entwickelten System werden nach Projektende von einigen Projektpartnern noch einige abschließende Arbeiten durchgeführt. Es soll mittelfristig kommerziell verfügbar werden.

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/ Dietz, P.; Haje, D.; Gummersbach, F.: Institutsmitteilung Nr. 19, IMW Clausthal 1994
- /5/ Dittrich, M.: Brief Description of EQUIP Noise Generation Mechanisms, EQUIP internal document TNO-TPD Delft, August 1996

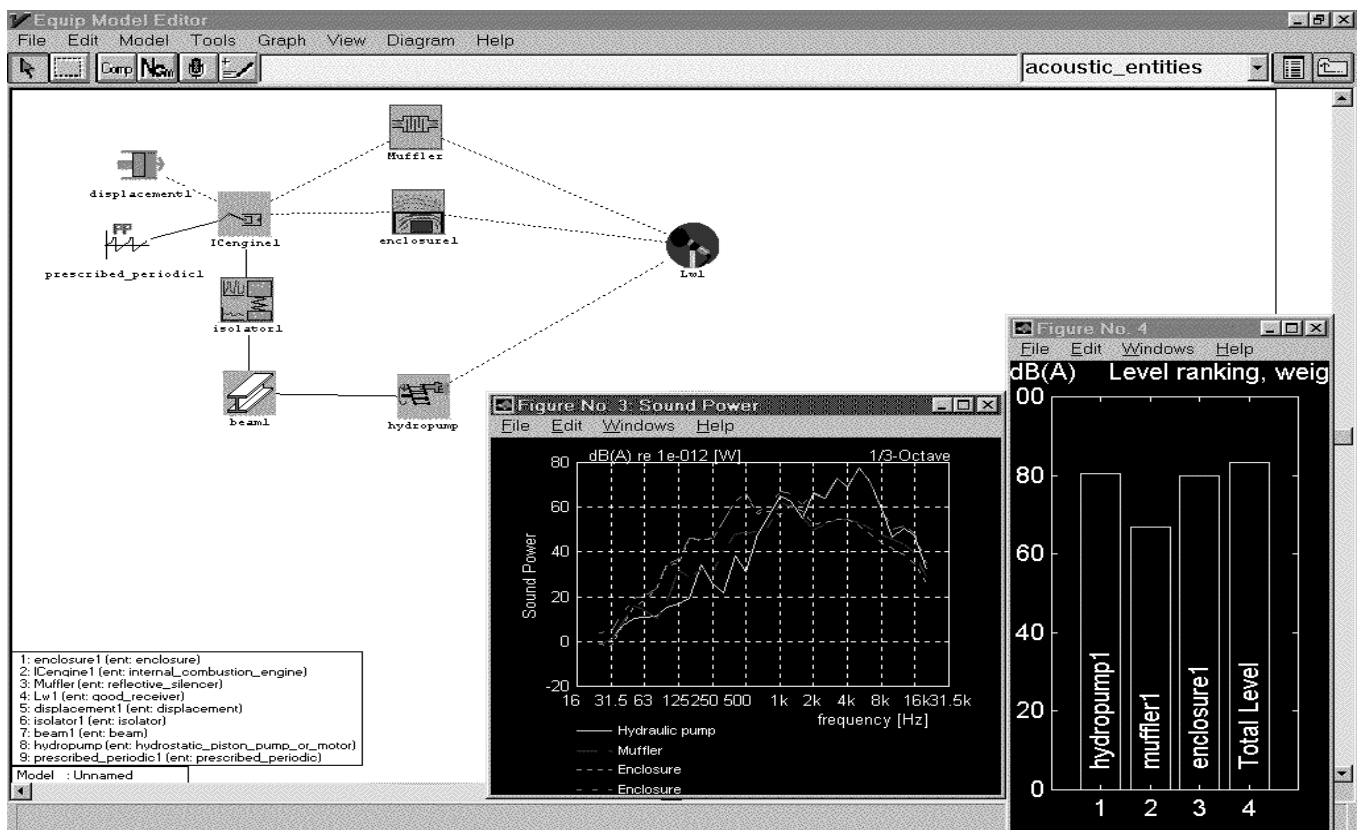


Bild 6 Beispiel eines berechneten Schallflußmodells

Entwicklung und Konstruktion eines pneumatischen Meßsystems zur Serienkontrolle

Heinen, F.

Im Rahmen eines niedersächsischen Verbundforschungsvorhabens wird am Institut für Maschinenwesen ein pneumatisches Meßsystem entwickelt. Die Verfahrensweise des pneumatischen Messens bietet viele Vorteile gegenüber konventioneller Meßtechnik. So arbeitet das Verfahren berührungslos und kann aus diesem Grund unkritischerweise auch verformungsempfindliche Stoffe vermessen. Durch die während des Meßvorgangs benötigte "Meßluft" wird gleichzeitig eine Reinigung des Meßobjektes erzielt. Diese prozeßbedingte Arbeitsweise macht den Einsatz in verschmutzten Umgebungen möglich. Desweiteren kann durch den Gebrauch vieler Meßdüsen das Meßobjekt gleichzeitig hinsichtlich sämtlicher geforderter geometrischer Charakteristika überprüft werden, das Meßsystem kann somit eine sehr hohe Geschwindigkeit vorweisen und eignet sich aus diesem Grund hervorragend für die Serienkontrolle.

The Institute for Mechanical Engineering is developing a pneumatic measuring system within a research cooperation project with the state of Niedersachsen. In comparison to conventional measuring methods, this kind of measuring system has many advantages. It works without touching the object to be measured. Therefore, also ductile materials can be measured. Also, parallel to measuring the object, the produced air is used to clean the object. Thus, this system can be used without problems in shop floor areas. In addition, the fact that a high number of measuring jets are used to measure the object from every side at the same time, makes the system work at a high speed and for that reason makes it ideal for series fabrication control.

1 Funktionweise pneumatisches Messen

Das pneumatische Messen stellt ein berührungsloses Meßverfahren dar. Es können Werkstoffe, bei denen berührende Meßverfahren Eindrücke hinterlassen, bspw. Schaumstoff oder Styropor-Teile, beschädigt

ungsfrei und fehlerunkritisch vermessen werden. Das Meßmedium ist Druckluft bzw. turbulente Luft. Der übliche Arbeitsdruck des pneumatischen Meßsystems liegt bei 1 bar Überdruck. Während des Meßvorgangs werden Meßdüsen und Meßobjekt stetig durch die ausströmende „Meßluft“ von Schmutz gereinigt. Hierdurch haben Verunreinigungen, sofern sie sich mittels Druckluft ablösen lassen, keinerlei Einfluß auf die Meßgenauigkeit.

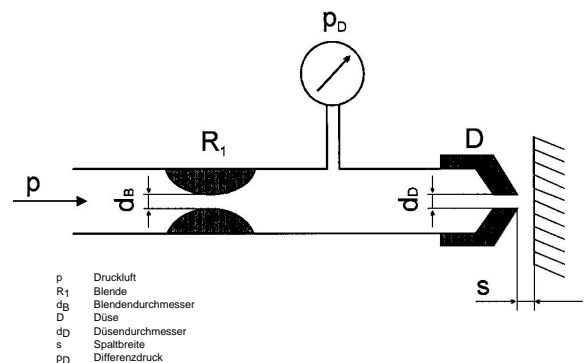


Bild 1: Prinzip der Staudruckmessung

Die Funktionsweise des Meßverfahrens beruht auf dem Staudruckprinzip (**Bild 1**). Wird der Abstand s zwischen Düse und Werkstückoberfläche vergrößert, nimmt der Staudruck ab, wird er verringert, nimmt der Staudruck zu. Durch die Verwendung der Blende R_1 wird die Möglichkeit geschaffen, diese Veränderung als Differenzdruck p_D , z.B. bei einfachster Anwendung mittels eines Flüssigkeitsmanometers, zu messen.

Die Abhängigkeit zwischen der Spaltbreite bzw. dem Meßbereich s und dem Differenzdruck p_D ist in **Bild 2** skizziert. Mittels der Blende wird der Meßbereich eingestellt. Wird der Blendendurchmesser d_B verkleinert, verkleinert sich gleichzeitig der Meßbereich, d.h. der zur Verfügung stehende Spalt s wird schmaler; durch diese Maßnahme erhöht sich jedoch die Auflösung des Meßsystems, die Meßgenauigkeit nimmt somit zu. Wird ein Blendendurchmesser gewählt, der dem der Meßdüse d_D entspricht, kann zwar der Meßbereich des Systems vergrößert werden, die Genauigkeit nimmt aber ab. Technisch günstig erscheint ein Blendendurchmesser von $d_B = 0,7$ mm bei einem

Meßdüsendurchmesser von $d_D = 1 \text{ mm}$ (**Bild 2**), da hier eine sehr hohe Meßgenauigkeit bei einer technisch sinnvollen Spaltbreite bzw. einem technisch sinnvollen Meßbereich gegeben ist.

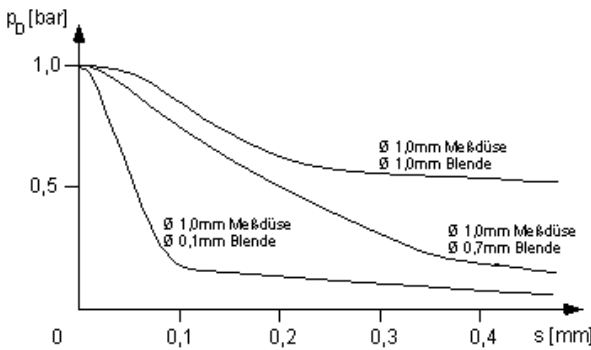


Bild 2: Differenzdruck p_D über Spaltbreite bzw. Meßbereich s bei normaler Meßdüse

Zur Vermeidung von Meßungenauigkeiten, die z.B. durch Schwankungen im Druckluftnetz verursacht werden können, bietet sich eine Verbindung mehrerer Düsen nach dem Prinzip einer Wheatstone'schen Brückenschaltung in der Elektrotechnik an (**Bild 3**).

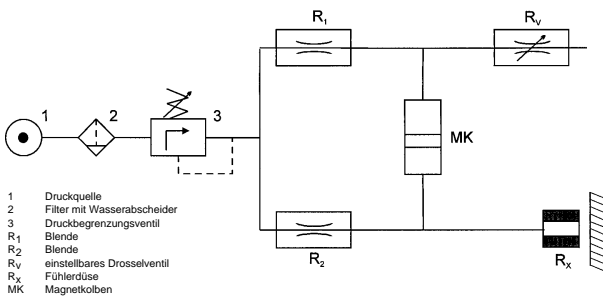


Bild 3: Aufbau einer pneumatischen Meßeinheit mittels Brückenschaltung

Die Blenden R_1 , R_2 , die Einstelldüse R_V sowie die Fühlerdüse R_X bilden hierbei die Strömungswiderstände. Die Rolle des Galvanometers in der elektrischen Ausführung übernimmt ein Zylinder mit einem magnetisierten Kolben. Auch hier wird wieder das Prinzip des Staudrucks verwendet. Je nach Abstand der Meßdüse R_X von der zu vermessenden Werkstückoberfläche ändert sich der Druck in diesem Zweig des Meßsystems. Mit Hilfe der Einstelldüse R_V kann der Gegendruck im anderen Zweig auf einen bestimmten Wert so eingestellt werden, daß sich der Kolben in der Mitte des Zylinders befindet. Verändert man nun die Entfernung der Meßdüse vom Werkstück, bewegt sich der Kolben in eine andere Position. Über drei Ruhe-Reedkontakte kann diese Position bestimmt werden. Schaltet einer dieser Kontakte, wird ein elektrisches Signal erzeugt, welches einer der Aussagen „zu klein“, „in Ordnung“ oder „zu groß“

entspricht. Diese Aussage wird auf das sogenannte Masterteil bezogen, welches zu Beginn der Messung zwecks Abgleich der Brücke in die Meßeinrichtung eingelegt werden muß.

Für den Fall, daß man eine qualitative Aussage über die tatsächlichen Maße des Werkstückes erhalten möchte, kann die Aufgabe des Magnetkolbens durch einen Piezokristall übernommen werden. Die Druckeinwirkung auf einen solchen Kristall führt zum Auftreten von elektrischer Ladung an der Oberfläche, die der Stärke der einwirkenden Kraft und damit des Druckes proportional ist. Mit Hilfe eines Meßverstärkers kann dieses elektrische Signal verstärkt und in eine Maßabweichung umgerechnet werden. Auch bei dieser Anordnung ist ein Abgleich mittels eines Masterteils notwendig.

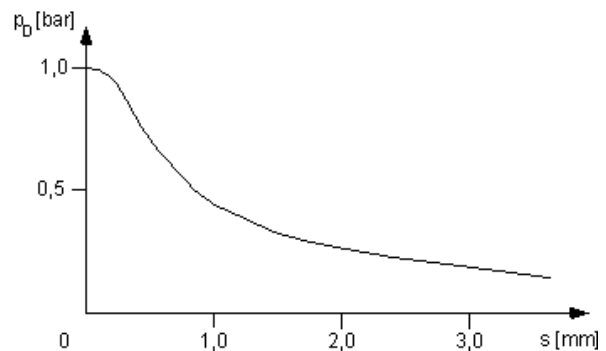


Bild 4: Differenzdruck p_D über Spaltbreite bzw. Meßbereich s bei Kegeldüse

Die bisher behandelten Düsen waren herkömmlicher Bauweise und ließen nur einen Meßbereich von 0,03 bis 0,4 mm zu. Bei diesem Düsentyp strömt die Luft aus einer zentralen Bohrung mit einem bestimmten Durchmesser auf die Werkstückoberfläche. Um einen größeren Meßbereich zu erhalten, wird die sogenannte Kegeldüse eingesetzt, die bei Spaltbreiten von 0,1 bis 3,5 mm eine Auflösung von $10 \mu\text{m}$ liefert (**Bild 4**).

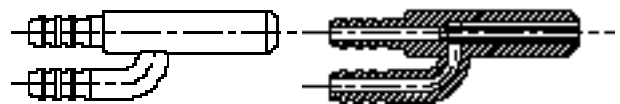


Bild 5: Kegeldüse

Eine solche Düse ist in **Bild 5** dargestellt. In der Mitte befindet sich wie gehabt der punktförmige Meßstrahl, dessen Staudruckänderungen registriert und ausgewertet werden. Um diese Düse herum befindet sich ein Ring, aus dem ebenfalls Druckluft ausströmt. Hierdurch wird vor der Düsen spitze ein Luftkegel erzeugt, der den zentralen Luftstrahl umschließt. Nähert man nun einer solchen Düse eine Prallfläche,

so wird der Luftkegel in Richtung Düsen Spitze verschoben, wodurch sich der Staudruck im zentralen Meßstrahl ändert. Der Ringstrahl dient also als „Hebelsystem“ für den eigentlichen Meßstrahl, der Meßbereich läßt sich dadurch um den Faktor 10 gegenüber der normalen Düse vergrößern.

2 Entwicklung der Meßsystemeinheit

Der erste Schritt in der Entwicklung des pneumatischen Meßsystems stellte eine Funktionsanalyse dar. Die hier gefundenen Funktionen wurden mittels konstruktionsmorphologischer Methoden bearbeitet, um möglichst viele Lösungsvarianten für die jeweilige Funktion zu erhalten. Mit Hilfe der Kesselringmethode wurden die Lösungsvarianten bzgl. der zu vermessenden Objekte bewertet und die beste Variante schließlich konstruktiv ausgeführt.

Bei der ausgewählten Lösungsvariante wird das Meßobjekt in eine nach drei Seiten offene Box gestellt und dort geklemmt (**Bild 6**). Eine vom Aufbau her gleiche, allerdings spiegelsymmetrische Box steht der ersten gegenüber. Die erste Box, in welcher das Meßobjekt steht, kann mittels Linearführungen und pneumatisch doppelwirksamem Kolben mit Endlagendämpfung so an die zweite Box herangefahren werden, daß beide dreiseitigen Boxen eine gemeinsame geschlossene Box bilden. Mittels eines weiteren doppelwirksa-

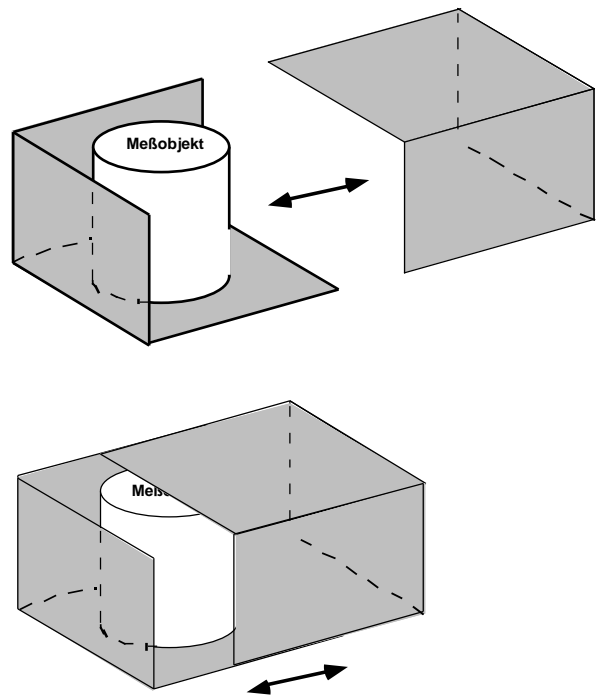


Bild 6: Schematische Darstellung der "Meßbox"

men Kolbens wird ein an der Spitze konischer Paßstift in ein im Boden der eingefahrenen Meßbox befindliches Passungsloch durch ein an der stationären Box befestigtes U-Profil hindurch eingeschoben. Auf diese Weise werden die beiden dreiseitigen Boxen über die Linearführungen der einen Box zunächst über den Konus des Paßstiftes in Position gezogen und dann fixiert. Da das Meßsystem vor der Messung abgeglichen werden muß, ist die absolute Lage der

Passungseinheit Stift / Bohrung unwichtig. Wichtig ist hingegen, daß die Konstruktion ausreichend steif ausgeführt wird, damit sich die relative Lage der Passungseinheit Stift / Bohrung während der Messungen nicht verändern kann. Die eigentliche Messung erfolgt über die in allen sechs Seiten der Meßbox eingebauten Meßsensoren und dauert nur wenige Sekunden. Das Meßobjekt wird gleichzeitig von sämtlichen Seiten vermessen.

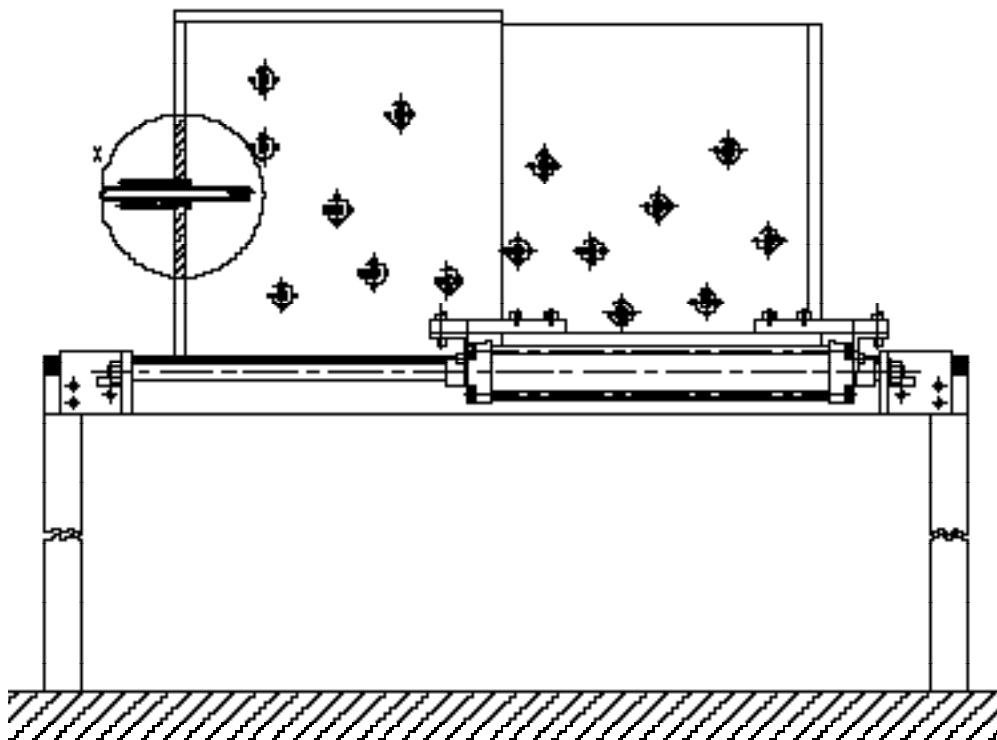


Bild 7: Meßsystem auf Meßtisch mit Einzelheit X

3 Konstruktive Einzellösungen

Im folgenden sollen exemplarisch einige konstruktive Einzellösungen der Meßsystemeinheit vorgestellt werden.

In **Bild 7** ist das installierte Meßsystem auf dem Meßtisch als Seitenansicht zu sehen. Man erkennt die in Absatz 2 erläuterten dreiseitigen Boxen.

Desweiteren sieht man die Linearführungen und den doppelwirkenden pneumatischen Verfahrkolben. Einheiten wie bspw. die Schlittenfixiereinheit liegen im Inneren des Tisches und können in dieser Ansicht nicht betrachtet werden. Die Einzelheit X zeigt eine Meßdüseneinheit, die in **Bild 8** vergrößert dargestellt ist.

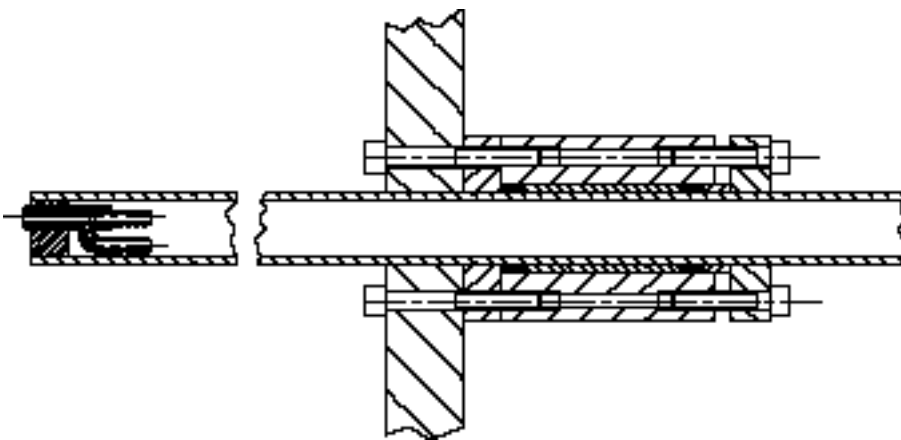


Bild 8: Meßdüsenhalterung und Fixierbuchse (Einzelheit X aus **Bild 7**)

Die oben dargestellte Meßdüseneinheit wurde so konstruiert, daß sie bei kostengünstiger Herstellung (Standard- und Gleichteile) gleichzeitig leicht und schnell auf neue Meßaufgaben einzurichten ist.

Zur Erläuterung dieser Einheit: Die Kegelmeßdüse sitzt in der Düsenfixierbuchse (**Bild 9**), die wiederum in einem Präzisionsrohr sitzt. Die Kegelmeßdüse wird in die Buchse eingeschoben und mittels einer Stiftschraube nach DIN 914 geklemmt. Mit Hilfe einer weiteren Stiftschraube, die in einem der Zeichnung zu entnehmenden Raumwinkel in die Buchse eingeschraubt wird, wird die Einheit im Präzisionsrohr geklemmt.

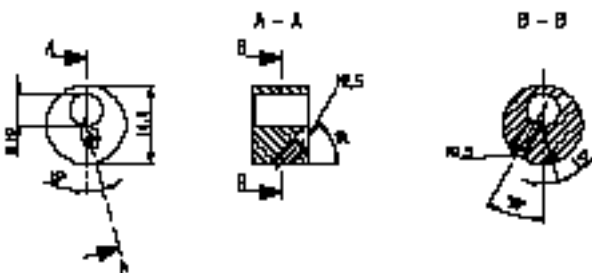


Bild 9: Düsenfixierbuchse

Das Präzisionsrohr steckt in einer Spannaufnahme, die an einer Wand der Meßbox mittels vier Schrauben befestigt wird. Es wird in dieser Aufnahme durch zwei Ringfederspannelemente sicher geklemmt. Bei gelöster Klemmung kann das Rohr an das Meßobjekt herangeschoben werden. Hierzu steckt man zunächst eine Kunststoffkappe auf das Rohr, führt es bis auf Kontakt an das Meßobjekt heran und fixiert es dann mittels der Spanneinheit durch Anziehen der vier Klemmschrauben. Die Ringfederspannelemente wurden so eingebaut, daß durch das Anziehen die Position erhalten bleibt, d.h. das Anziehen bewirkt kein Verschieben der Düseneinheit. Diesen Vorgang wiederholt man mit sämtlichen in der Box befindlichen Düseneinheiten. Hiernach fährt man die Meßbox vor-

sichtig auf und zieht die Kunststoffkappe vom Rohr ab. Durch diese Einrichtweise hat die Kegelmeßdüse ca. 2 mm Abstand vom Meßobjekt, was meßtechnischen Idealabstand darstellt. Nach Abgleichung mittels Masterteil kann die Messung beginnen. Durch mehrere solcher Düsen und die entsprechende Software können geometrische Charakteristika aufgenommen und ausgewertet werden.

Es empfiehlt sich, das Meßsystem nach jedem Einschalten zunächst mittels Masterteil abzugleichen bzw. bei extremen Werkstattbedingungen (starken Temperaturschwankungen, starken Erschütterungen ect.) nach einer bestimmten Anzahl von Messungen abzugleichen.

Trotzdem muß an dieser Stelle nochmals betont werden, daß dieses System auch unter meßtechnisch schwierigen Bedingungen problemlos eingesetzt werden kann.

Literatur

/1/ Heinen, F.: Verbundvorhaben Lost Foam Gießen, Zwischenbericht 8/1996 des Teilvorhabens Meßsystem/Vermessung

/2/ Mietzel, G.: Problems and Solutions, Firmenschrift MAWOMATIC GmbH, Arnsberg 1991

/3/ Stork, M.: Studienarbeit, Konstruktion eines pneumatischen Meßsystems, Clausthal 1996 in Arbeit

Untersuchungen zur Herstellung eines Moire-Gitters für Hochtemperaturanwendungen

Huimin, X.; Daxin, Z.

Für die Herstellung eines Hochtemperatur-Gitters wurde ein neues Verfahren entwickelt. Durch den Aufbau aus zwei aufgetragene Metallschichten erhöht sich die Widerstandsfähigkeit gegen Oxidation.

Die Anzahl der möglichen Anwendungsfälle des Gitters hat sich durch das neue Verfahren vergrößert, so daß jetzt fast alle Metalle beschichtet werden können. Das Verfahren und die Einflußfaktoren auf die Qualität des Gitters werden detailliert dargestellt.

In this paper, a new method for producing high temperature gratings was put forward. With two deposited metal layers on the specimen, the oxidation resistant ability of this grating was improved, and the objects of producing grating were enlarged, which covered almost all the metals. The procedure of producing grating and the controlling factors of grating quality were discussed in detail.

1 Einleitung

Die Verwendung der Moire-Methode für die Messung der Verformungen bei hohen Temperaturen begann in den 60er Jahren. 1964 haben Teocariss /1/ die Feuerfestmethode, Dantu /2/ die Radierungsmethode und Sciammarella/3/ die Beschichtungsmethode zur Herstellung der Hochtemperatur-Gitter entwickelt, um die Verformung von Objekten bei hohen Temperaturen zu messen. Diese Forschungen bildeten die wichtigste Grundlage der Hochtemperatur-Moire-Methode.

1979 benutzte Cloud /3/ eine Schicht Gold (Au) zur Formierung des Gitters und erhöhte den Messbereich der Temperatur bis auf 600°C.

Durch die Entwicklung moderner Wissenschaften und Technologien entsteht ein großer Bedarf an der Hochtemperatur-Moire-Methode, z.B. bei der Erforschung des Bruchverhaltens von Metallwerkstoffen und der mechanischen Eigenschaften von zusammengesetzten Werkstoffen unter Hochtemperatur, usw. Bei der Analyse dieser Probleme stellte sich her-

aus, daß immer höhere Meßbereiche und eine bessere Dauerstabilität des Gitters unter Hochtemperatur erreicht werden müssen.

In diesem Aufsatz wird dargestellt, wie durch ein neues Herstellungsverfahren des Gitters, in Form von zwei aufgetragenen Metallschichten die oben genannten Anforderungen zu erfüllen sind. Die Widerstandsfähigkeit des Gitters gegen Oxidation konnte auch bei langen Versuchszeiten unter Hochtemperatur (bis 950°C) sichtbar verstärkt werden. Für die Verifizierung der Forschungsergebnisse wurden die Gitter jeweils auf eine Metallplatte aus Beryllium-Bronze (QBe 2) und nichtrostendem Stahl (1Cr18Ni9Ti) aufgetragen. Damit wurden die Hochtemperaturversuche erfolgreich durchgeführt.

2 Die Herstellung des Gitters

(1) Bearbeitung der Probenoberfläche

Zunächst muß aus dem zu untersuchenden Grundwerkstoff eine Probe zur Applizierung des Gitters ausgewählt werden. Die Ebenheitsabweichung der Probenoberfläche darf 0.01mm nicht überschreiten und seine Rauhtiefe muß bis zu $R_{z0,8}$ poliert werden. Dann werden die vorhandenen Oxid- und Ölschichten mit Reinigungsmittel entfernt und unter fließendem Wasser abgespült. Nach dem Trocknen wird die Probe im Trockenglas aufbewahrt.

(2) Auftragen der Metallschicht A

Nach dem Schritt (1) wird die bearbeitete Oberfläche mit der Metallschicht A beschichtet. Ihre Dicke soll zwischen 0.5µm bis 1µm betragen. Das Material der Schicht A muß ein oxidationsresistentes Metall sein und die Kompatibilität der thermischen Verformung mit dem Probenmaterial haben.

Als Beschichtungsmethoden dienen entweder die Verdampfungsmethode im Vakuum oder die Schleuder-Methode. Um die Kompatibilität der beiden Materialien sicherzustellen, müssen im Vorfeld die Wärmeausdehnungskoeffizienten der Probe und der Metallschicht A gemessen werden.

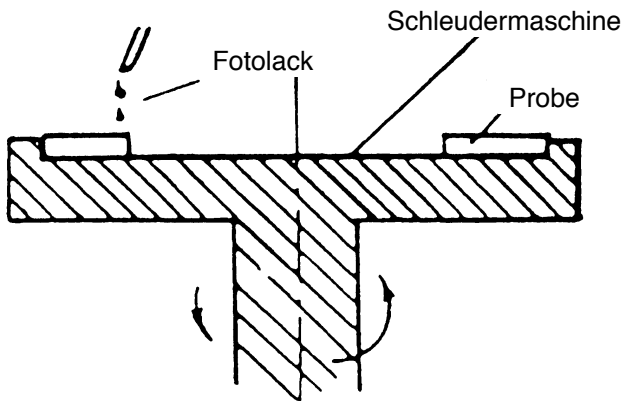


Bild 1: Skizze der Schleudermaschine

(3) Aufbringen des Fotolacks

Mit Hilfe der Schleuder-Methode wird eine Schicht Fotolack gleichmäßig über die Probenoberfläche verteilt. In **Bild 1** ist die Schleudermaschine in Form einer Skizze dargestellt. Die Dicke der Fotolackschicht kann über die Geschwindigkeit der Schleudermaschine eingestellt werden. Im allgemeinen kann die Dicke des Fotolacks $1\mu\text{m} - 3\mu\text{m}$ für die Herstellung eines Moire-Gitters mit der Liniendichte $10\text{ l/mm} - 100\text{ l/mm}$ betragen.

Um die Widerstandsfähigkeit gegen Oxidation zu erhöhen, muß die Probe nach dem Auftragen des Fotolacks in einem elektrischen Ofen erwärmt werden. Die Parameter der Temperatur und die Zeit für die Erwärmung hängt von der Eigenschaft des Fotolacks ab.

(4) Herstellung des Gitters

Die Vakuum-Absorptions-Maschine und das Belichtungssystem mit Ultraviolett-Lampe werden in **Bild 2** und **Bild 3** dargestellt. Bei Anschalten der Vakuum-

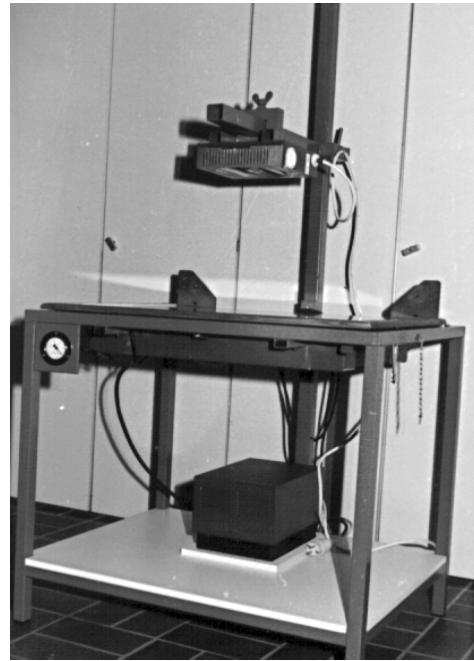
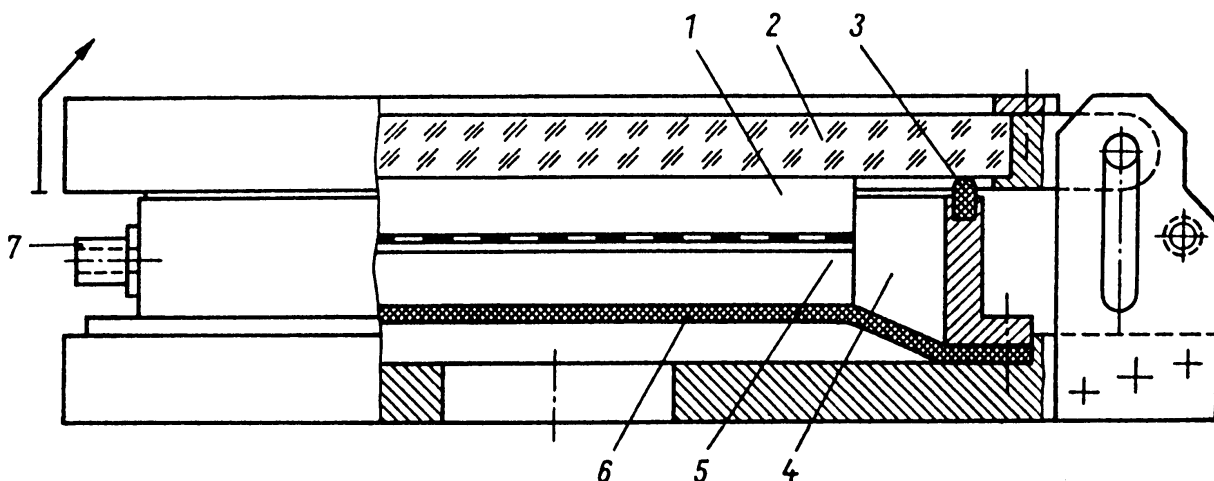


Bild 3: Belichtungssystem mit UV-Lampe

pumpe reduziert sich das Spiel zwischen Probe und Muttergitter mit Hilfe des Drucks des weichen Gummis 6 bis auf fast Null, so daß der Beugungseffekt des Muttergitters bei der Belichtung bzw. die Fehler zwischen den Abständen der Gitterlinien im wesentlich beseitigt werden können.

Der Fotolack wird von einer UV-Lampe über der Vakuum-Maschine belichtet (siehe Bild 3). Die Belichtungszeit hängt von der Dicke des Fotolacks, der Leistung der UV-Lampe und der Entfernung zwischen der Probe und der Lampe ab. Der Fotolack wird in den entsprechenden chemischen Lösungen nach der Belichtung entwickelt, fixiert und gespült, dadurch entsteht ein Fotolackgitter auf der Probenoberfläche.



1. Muttergitter; 2. Quarzglas; 3. Dichtungsring; 4. Vakuumraum, 5. Probe; 6. Gummi; 7. Absaugröhre

Bild 2: Zeichnung der Vakuum-Absorptions-Maschine

(5) Auftragen der Metallschicht B

Die Metallschicht muß auch aus oxidationsresistentem Material bestehen und die Differenz zwischen den Wärmedehnungskoeffizienten der Metalle A und B muß sehr klein sein.

Die Typen der Gitter hängen von der Auswahl des Metalls B ab. Wenn Schicht B und A aus dem gleichen Metall sind, wird ein Phasengitter formiert. Wenn es eine großen Wärmedehnungsdifferenz zwischen Metall A und B gibt, wird ein Amplitudengitter über der Probe formiert. Das Verfahren des Auftragens der Metallschicht B entspricht dem Schritt (2).

(6) Entfernung des Fotolacks

Der zwischen den Metallschichten A und B befindliche Fotolack kann mit Aceton oder AZ-100 von der Probenoberfläche entfernt werden. Somit ist ein Gitter aus den zwei Metallschichten A und B für Hochtemperatur auf der Probenoberfläche entstanden.

Das Verfahrensschritte des oben genannten Prozesses sind in **Bild 4** dargestellt.

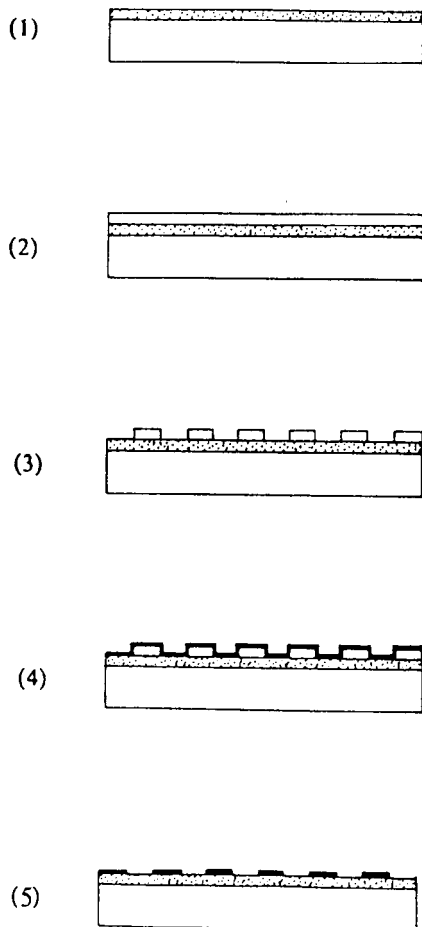


Bild 4: Verfahren zur Herstellung des Gitters mit zwei Metallschichten

- (1) Auftragen der Metallschicht A
- (2) Aufbringen des Fotolacks
- (3) Herstellung des Gitters
- (4) Auftragen der Metallschicht B
- (5) Gitter nach Entfernen des Fotolacks

3 Hochtemperaturversuch

Um die Durchführbarkeit der Methode zu prüfen, wurden je eine Metallplatte aus Beryllium Bronze (QBe 2) und eine aus nichtrostendem Stahl mit der Dicke von 0.14 mm als Objekt zur Herstellung der Gitter gewählt. Das Muttergitter war ein Amplitudengitter mit einer Liniendichte von 40 l/mm auf Glas.

Zur Herstellung der Gitter, wurde nach dem Polieren und dem Auftragen des Metalls A, die Probenoberfläche mit dem Fotolack in einer Dicke von 1,5 µm beschichtet. Danach wurde der Fotolack unter einer 1000W UV-Lampe (die Entfernung zwischen dem Fotolack und der Lampe betrug 1m) 40 Sekunden belichtet. Dann wurde die Probe in 0.5% NaOH 90 Sekunden entwickelt und mit destilliertem Wasser 60 Sekunden gespült.

Nach dem Auftragen des Metalls B und der Entfernung des übriggebliebenen Fotolacks zwischen A und B wurde schließlich ein Metallgitter mit zwei Metallschichten auf der Probenoberfläche hergestellt.

Um einen Oxidationsversuch durchzuführen, wurde das Gitter in einen elektrischen Ofen gelegt. Die Struktur des Gitters auf der nichtrostenden Stahlplatte (Type: A-A, Phasengitter) wurde nach 2 Stunden bei 950°C in **Bild 5** dargestellt.

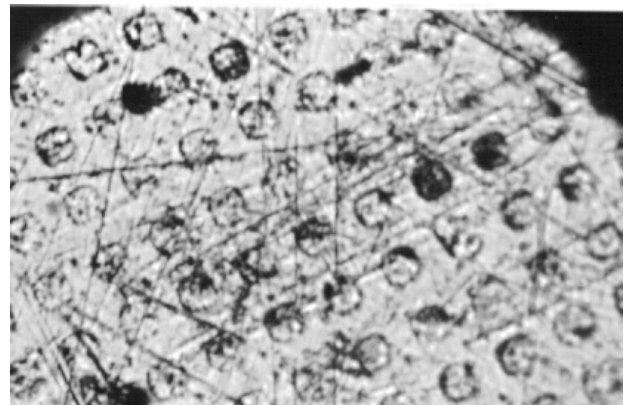


Bild 5: Gitterstruktur nach 2 Stunden bei 950°C

Ein Dauerversuch mit dem Gitter auf einer QBe 2 Platte (Typ: A-B, Amplitudengitter) dauerte 1000 Stunden bei 550°C. Die Gitterstruktur wurde unter einem "Scanner-Elektronen-Mikroskop" (S.E.M) aufgenommen (siehe **Bild 6**).

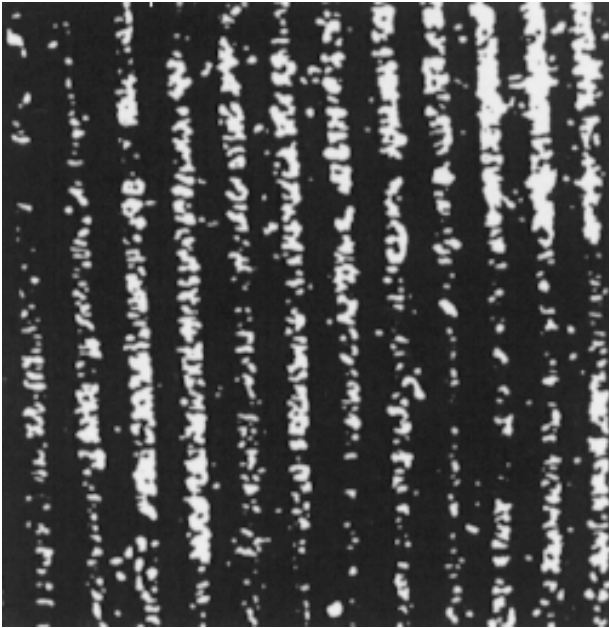


Bild 6: Gitterstruktur im S.E.M. nach 1000 h bei 550°C

4 Qualitätsanalyse des Gitters

Die wichtigsten Faktoren, die die Qualität des Gitters beeinflussen, sind die Umgebung der Fotoradierung, die Qualität des Muttergitters, die Parameter der Fotoradierung, der Beleuchtungszustand und die Parameter der Lampen. Die Faktoren werden nachfolgend jeweils analysiert:

(1) Umgebung der Fotoradierung

Die Operation der Fotoradierung muß in einem trockenen und staubfreien Raum durchgeführt werden.

(2) Auswahl des Muttergitters

Das Muttergitter muß klare Ränder und einen sehr großen Kontrast haben. Die Auswahl des Muttergitters wird unter einem metallografischen Mikroskop durchgeführt.

(3) Die Parameter der Fotoradierung

Die Parameter der Vorwärme, Belichtung und Entwicklung spielen eine entscheidende Rolle für die Qualität der Fotolackgitter. Wenn die Fotoradierung unter ungenügender Vorwärme, oder übermäßiger Belichtung, oder unsachgemäßer Entwicklung durchgeführt wird, entsteht ein unvollkommenes Gitter und es werden sogar ganze Gitterlinien entfernt. Wenn die Fotoradierung unter übermäßiger Vorwärme, oder unzureichender Belichtung, oder mangelhafter Entwicklung ausgeführt wird, können sich die Gitterlinien

auf der Probenoberfläche nicht formieren und die Metallschicht B wird bei Entfernung des Fotolacks zerstört.

Nomalerweise sollte man vor der Herstellung des Gitters ein Minimum der Belichtungsleistung für eine bestimmte Dicke des Fotolacks und die optimalen Parameter der Vorwärme und Entwicklung festlegen. O.g. Ergebnis gilt für positiven Fotolack.

(4) Lichtquelle

Bei Belichtung mit Punktlicht verursacht die Ausbreitung der Lichtquelle einen Fehler zwischen den Abstände der Gitterlinien (siehe Bild 7). Das wird in folgender Gleichung dargestellt.

$$\Delta P = \frac{L \cdot \Delta Z}{Z}$$

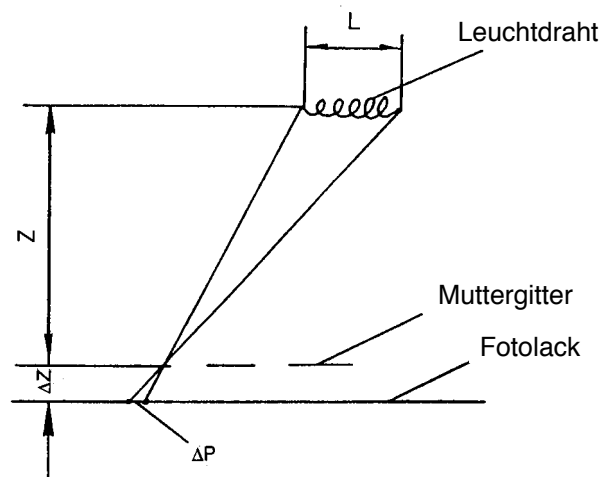


Bild 7: Die geometrische Analyse der Abstandfehler der Gitterlinien

ΔP : Der absolute Fehler der Abstände der Gitterlinien

L: Die Länge der Lichtquelle

Z: Die Entfernung zwischen der Lichtquelle und dem Muttergitter

ΔZ : Die Entfernung zwischen dem Muttergitter und dem Fotolack

Die Gleichung (1) führt zur Schlußfolgerung, daß, wenn $Z \gg L$, dann $\Delta P \approx 0$.

Bei der Belichtung mit einer parallelen Lichtquelle, müssen das Licht und die Probenoberfläche senkrecht aufeinander stehen, sonst entsteht der Fehler zwischen den Gitterlinien auch.

5 Zusammenfassung

Die o.g. Verfahren zur Herstellung des Gitters haben folgende Merkmale:

(1) Durch die Methode der zwei übereinander aufgetragenen Metallschichten auf die Probenoberfläche, wird das Verfahren zur Herstellung des Gitters auf alle Metalle erweitert, die poliert werden können. Die Methode kann als allgemeine Methode zur Herstellung der Moire-Gitter für Hochtemperatur genutzt werden. Das Verfahren eignet sich besonders für die Überleitung in den Handel, wenn man das Gitter auf Metallen herstellt, die eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Oxidation haben.

(2) Die Typen der Gitter hängen von der Metallschicht A und B ab. Es können entweder Phasengitter oder Amplitudengitter mit dem o.g. Verfahren hergestellt werden. Das Phasengitter kann zur regelmäßigen und langfristigen indirekten Vor-Ort-Messung der Restverformung unter Hochtemperatur angewendet werden. Dazu werden in regelmäßigen Zeitabständen Phasengitter-Aufnehmer am Meßobjekt für den Meßzeitraum befestigt und anschließend im Labor ausgewertet. Das Amplitudengitter dient als wichtiges Messelement zur direkten Messung der Verformung unter Hochtemperatur.

(3) Durch die Auswahl von Metallen mit hoher Widerstandsfähigkeit gegen Oxidation für beide Schichten wird die Temperaturbeständigkeit und die Kriechstabilität bei langer Versuchszeit sichtbar erhöht.

6 Förderung

Das Projekt wurde finanziell unterstützt durch die Naturwissenschaftliche Stiftung in China, den „Sonderforschungsbereich 180“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft und die Alexander von Humboldt Stiftung.

7 Literatur

/1/ Theocaris, P.S., 'The Moire Method in Thermal Fields', Exp. Mech., (5), 223-231, (1964).

/2/ Dantu, P., 'Extension of the Moire Method to Thermal Problems', Exp. Mech., (3), 64-69, (1964).

/3/ Sciammarella, C.A. and Ross, B.E., 'Thermal Stress in Cylinders by the Moire Method', Exp. Mech., (5) 289-296, (1964).

/4/ Cloud, G., Radke, R., and Peiffer, J., 'Moire Gratings for High Temperatures and Long Times', Exp. Mech., (5), 19N-21N, (1979).

/5/ Clauwe, M. De., 'Etching Moire Test Grids in Steel', Strain, (3), 135-138, (1974).

/6/ Xie, H. und Dai, F., 'Herstellung eines holographischen Gitters für hohe Temperaturen' Institutsmittellung ISSN 0947-2274 (Band 19, 1994).

/7/ Zou, Daqing; Xie, Huimin; Dai, Fulong, 'The Study of the Replicating Technique of the High Frequency Phase Style Deformed Gratings From a Curve Surface', Opticad Techniques (No. 4 1996)

Der Entwicklungs- und Konstruktionsprozeß von Flugkörpern

Betaneli, A. J.

Mit der Technischen Universität in Tbilissi, Georgien, besteht ein langjähriger Kontakt, der ursprünglich den Bereich der Spannungsoptik betraf, der sich aber in letzter Zeit auf einen Austausch von Erfahrungen im methodischen Konstruieren erweiterte. Der folgende Aufsatz behandelt die Anwendung konstruktionsmethodischer Vorgehensweisen auf den Bau von Flugzeugen, in dem die Universität Tbilissi eigene Erfahrungen aufweist. Im nächsten Jahr wird der Kontakt zu Tbilissi vertieft durch den Aufenthalt eines Gastwissenschaftlers und eines Studenten in Clausthal.

This contribution from our colleagues from the Technical University of Tbilissi, Georgia, bases on a already long time lasting cooperation of our Universities, initially in the area of fotoelasticity, but now more and more in an exchange of experience in the field of methodical design - the paper shows an application of VDI 2221 on the design of aeroplanes. During the next year, we will strengthen our collaboration by the visit of Georgian scientists in Clausthal.

1 Einleitung

Beim Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte muß eine Vielzahl unterschiedlicher Probleme gelöst werden. Es liegt deshalb nahe, das Vorgehen bei einem allgemeinen Problemlösungsprozeß auch auf den Entwicklungs- und Konstruktionsprozeß zu übertragen. Das systemtechnische Vorgehensmodell als Problemlösungsmethodologie für künstliche Systeme gliedert zunächst den zeitlichen Werdegang eines Systems vom Abstrakten zum Konkreten in Lebensphasen [1]. Das Vorgehensmodell ist ein konsequentes aufeinanderfolgendes Tätigkeitsschema für die optimale Organisation des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses.

Nach VDI 2221 wird der Entwicklungs- und Konstruktionsprozeß in generelle Arbeitsschritte (Phasen zunehmender Konkretisierung = Konstruktionsphasen), die das Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren

überschaubar, rational und branchenunabhängig machen, eingeteilt. Das Gesamtverfahren wird in sieben Arbeitsschritten gegliedert, aus denen entspre-

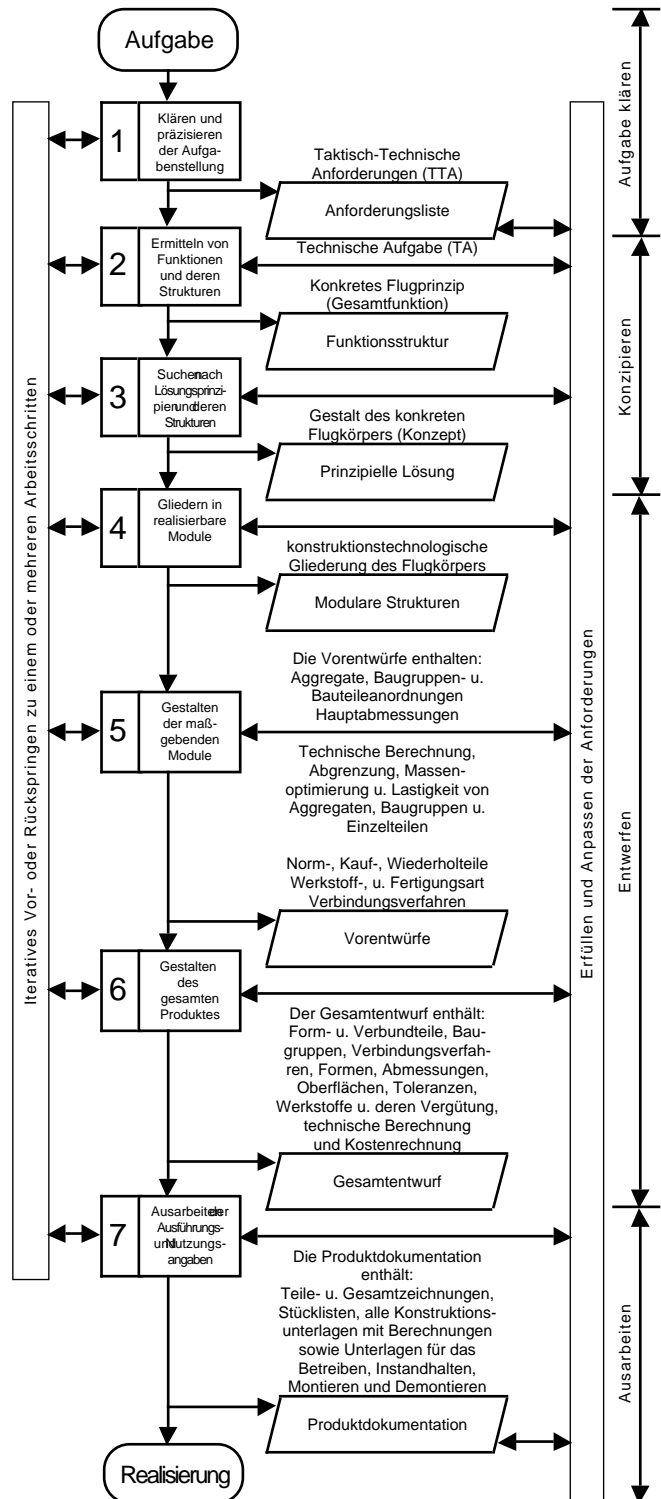


Bild 1: Vorgehensmodell zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozeß von Flugkörpern

chend sieben Arbeitsergebnisse hervorgehen. Diese Arbeitsschritte werden je nach Aufgabenstellung vollständig, nur teilweise oder mehrfach iterativ durchlaufen. Die Arbeitsschritte können je nach Branche und Erfahrung zu einzelnen Entwicklungs- oder Konstruktionsphasen zusammengefaßt werden, an denen sich auch terminliche und organisatorische Abläufe orientieren /1/.

Der Verfasser hat nach /2/ ein Vorgehensmodell zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozeß von Flugkörpern erarbeitet (**Bild 1**).

2 Vorgehensmodell zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozeß von Flugkörpern

Arbeitsabschnitt 1

Arbeitsschritt 1:

Die Markt-/Kundenbedürfnisse müssen (Flugverkehrsleistung, Raumfahrtprogramme, Umweltschutzbeschränkungen, usw.) durch Anwendung konventioneller (Normwesen, Recherchen, systematische Aufbereitung von Wissen) und rechnergestützter (Makrobibliotheken, Datenbanksysteme, Expertensysteme) Informationssysteme festgelegt werden.

Arbeitsergebnis 1:

Die Anforderungsliste muß man als taktisch-technische Anforderung (TTA) formulieren. Dann kann man die technische Aufgabe (TA) feststellen.

Arbeitsabschnitt 2

Arbeitsschritt 2:

Der Flug ist die Hauptfunktion des Flugkörpers. Hierüber bestimmt man in erster Linie das Flugprinzip.

Das Flugprinzip kann man durch die Machzahl

$$M = \frac{v}{a}$$

(v: Fluggeschwindigkeit; a: Schallgeschwindigkeit)

und Atmosphärenhöhe H, bei welcher der Flug durchgeführt wird, bestimmen /3/. In der Troposphäre (H= 0÷11km) ist es möglich den Flug mit Unterschallgeschwindigkeiten ($M < 1$), Transschallgeschwindigkeiten ($M \approx 1$) und Überschallgeschwindigkeiten ($M > 1$) durchzuführen. Entsprechend sind für Troposphäre aerostatische (Luftballon, Luftschiff), aerodynamische

(Flug mit Luftschraubenantrieb (Hubschrauber)) und auf reaktiven (Flugzeuge mit Strahlantrieb) Flugprinzipien gegründete Flugkörper möglich. In der Stratosphäre (H = 11 bis 50 km) sind aerostatischer (Stratospärenballon) und reaktiver (Hyperschallflugzeug ($M = 4 \div 9$) mit Raketenantrieb) Flug möglich. Die Flugprinzipien bestimmen den Flugkörper. Ein Kosmoflugzeug ($M < 20$) mit Raketenantrieb kann in den kosmischen Orbit (H= 150 ÷ 500 km) eine Nutzlast transportieren. Der Raumflug eines Raumfahrzeuges ist an das ballistische Flugprinzip gebunden. Jedoch muß am Anfang und am Ende der Bahn das reaktive Flugprinzip verwirklicht werden.

Arbeitsergebnis 2:

Die Funktionsstruktur muß man als konkretes Flugprinzip (Gesamtfunktion) formulieren.

Arbeitsabschnitt 3

Arbeitsschritt 3:

Ausgehend von bestimmten Flugprinzipien kann durch Anwendung konstruktionssystematischer Methoden zur Lösungsfindung (intuitive, diskursive, u.a.) eine Vielfalt möglicher Lösungsprinzipien und Verknüpfungen selbiger erzeugt werden. Aus der damit erzeugten Vielfalt von Konzeptvarianten muß nach einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung das günstigste Konzept (Lösungskonzept) ausgewählt werden. So kann man konkret den Flugkörper (Luftballon, Luftschiff, Stratosphärenballon, Flugzeug, Hubschrauber, Kosmoflugzeug, Raumfahrzeug usw.) festlegen.

Arbeitsergebnis 3:

Das Konzept ist die Gestalt des konkreten Flugkörpers (Konzeptentwurf).

Arbeitsabschnitt 4

Arbeitsschritt 4:

Strukturieren des Flugkörpers in gestaltungsbestimmende und abhängige Hauptfunktionsträger (Aggregate, Module, Baugruppe, Einzelteile)

Arbeitsergebnis 4:

Die Baustruktur muß man als konstruktionstechnologische Gliederung (KTG) darstellen.

Arbeitsabschnitt 5

Arbeitsschritt 5:

Die gegenseitige und räumliche Anordnung des Flugkörpers (Konstruktionsaufbau des Flugkörpers) wird festgelegt. Der Konstruktionsaufbau von Flugzeugen, Kosmoflugzeugen, Raumfahrzeugen ist möglich durch die Anwendung von CAD-Systemen. Norm-, Kauf-, Wiederhohlteile müssen gesucht, und Werkstoffsorten festgelegt werden. (Falls notwendig muß man Faserverbundwerkstoffe anwenden). Für Hyperschallflugzeuge, Kosmoflugzeuge und Raumfahrzeuge muß man auf die Notwendigkeit eines Wärmeschutzsystemes achten. Das Triebwerk und die Fluganlage wird anschließend bestimmt. Nachfolgend werden die aeromechanische- und Festigkeitsrechnung durchgeführt und die Hauptabmessungen festgelegt. Anschließend wird die Aggregate-, Module-, Baugruppen- und Teileauflistung angefertigt. Dabei sollte die Integral- und Differentialbauweise beachtet werden. Im nächsten Schritt wird die Massenoptimierung durchgeführt. Die Lastigkeitsregelung muß bestimmt werden, ebenso wie die Fertigungsart und die Verbindungsverfahren festzulegen sind. Es werden maßstäbliche Vorentwürfe erarbeitet. Es wird eine Kostenkontrolle, sowie eine Schwachstellensuche durchgeführt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse kommt es zu einer teilweisen Neubearbeitung des Vorentwurfs.

Arbeitsergebnis 5:

- die Vorentwürfe enthalten:
- Aggregate, Module, Baugruppen/ -Teileanordnung
- Hauptabmessungen
- Technische Berechnung
- Abgrenzung
- Massenoptimierung
- Lastigkeit
- Aggregate, Module, Baugruppen, Einzelteile
- Norm-, Kauf-, Wiederhohlteile
- Werkstoff- und Fertigungsart
- Verbindungsverfahren

Arbeitsabschnitt 6

Arbeitsschritt 6:

- Gesamtentwurf erstellen
- Teileauflistung
- Verbindungsverfahren im Einzelnen

- Formen, Abmessungen, Oberflächen
- Toleranzen
- Werkstoff und Oberflächenbehandlung festlegen
- Kostenkontrolle, Schwachstellensuche
- Überarbeitung des Gesamtentwurfs

Arbeitsergebnis 6:

- der Gesamtentwurf enthält:
- Formteile, Verbundteile, Baugruppen
- Verbindungsverfahren
- Formen, Abmessungen, Oberflächen, Toleranzen
- Werkstoffe, Werkstoff-Vergütung, technische Berechnung
- Kostenrechnung

Arbeitsabschnitt 7

Arbeitsschritt 7:

- Festlegen von Einzelheiten
- Gruppen und Gesamtzeichnung
- Stücklisten erstellen
- Zeichnungskontrolle
- Fertigung des Musterflugkörpers
- Normprüfung
- Erstellen von Anleitungen für Montage/Demontage, Betreiben, Instandhalten

Anmerkung:

Wenn nach der Mustererprobung des Flugkörpers eine Entscheidung getroffen wird über die Serienfertigung des Flugkörpers, muß man die Produktdokumentation für die Serienfertigung vorbereiten.

Arbeitsergebnis 7:

- die Produktdokumentation enthält:
- Teilezeichnungen
- Gesamtzeichnungen
- Stücklisten
- Konstruktionsakte mit Berechnungen
- Unterlagen für das Montieren/Demontieren, Betreiben und Instandhalten

Es ist bekannt, daß in entwickelten westlichen Ländern, vom Anfang unseres Jahrhunderts an bis zum Jahre 1960, die Arbeitsproduktivität um 100% gestiegen ist. Aber im selben Zeitabschnitt stieg die Arbeitsproduktivität des Konstrukteurs nur um 20%.

Danach wurden in den 70'er Jahren CAD (Computer-Aided-Design = Rechnergestützte Konstruktion) Systeme eingeführt, insbesondere in der Luft- und Raumfahrt.

Die Arbeitsmöglichkeiten des einzelnen Ingenieurs an seinem CAD-Arbeitsplatz sind sehr vielfältig. Je nach Aufgabe werden verschiedene Lösungen angeboten, die von der Erzeugung einer aerodynamischen Kontur über Festigkeitsberechnungen und Systemanalyse bis zur Produktionssteuerung reichen. Mit den geschilderten Perspektiven bietet die CAD-Technik eine umfangreiche Unterstützung bei der rationellen und schnellen Entwicklung eines Produktes bis zur Markteinführung. Auch dem leistungsstärksten Computer sind jedoch Grenzen gesetzt: Er kann nur die Daten verwenden, die eingegeben wurden. Die Kreativität der Ingenieure bleibt also auch in Zukunft jenes Element, welches das Produkt ausmacht /4/.

Nach /5/ kann in den Konstruktionsphasen zwischen den schöpferischen und schematischen Tätigkeiten unterschieden werden. Zu Beginn des Konstruktionsprozesses überwiegen die schöpferischen Aufgaben, da hier das Definieren, das Analysieren und das Konzipieren von Lösungen im Mittelpunkt steht. Die CAD-Technologie kann hier nur am Rande unterstützend wirken, um bereits erarbeitete Lösungskonzepte zu visualisieren oder Ergebnisse dieser Phasen zu speichern und für spätere kreative Prozesse bereitzustellen. Die schematischen Tätigkeiten, die im zweiten Teil des Konstruktionsprozesses sehr stark zunehmen, beinhalten Tätigkeiten wie Entwerfen und Ausarbeiten der Lösungen. Hier ist eine Unterstützung der CAD-Technologie sehr gut möglich und auch Stand der Technik.

3 Zusammenfassung

Nach VDI-Richtlinie 2221 (Mai 1993) ist das allgemeine Vorgehensmodell zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozeß von Flugkörpern (Luftballonen, Stratosphärenballonen, Luftschiffen, Flugzeugen, Hubschraubern, Kosmoflugzeugen, Raumfahrzeugen) erarbeitet.

Das Vorgehensmodell ist ein konsequentes aufeinanderfolgendes schöpferisches und schemati-

sches Tätigkeitsschema für die optimale Organisation des Entwicklungs-, und Konstruktionsprozesses von Flugkörpern. Das Modell ist interaktiv.

Das Vorgehensmodell kann man auf konventionelle Methoden zur Lösungsfindung, als auch in CAD-Systemen anwenden.

Literatur

- /1/ Dietz, P.; Konstruktionslehre, Vorlesungen
- /2/ VDI-Richtlinie 2221; Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Mai 1993.
- /3/ Betaneli A.; About Procedure Model of Aircraft Design, Bulletin of the Georgian Academy of Science, Volume 150, Nr. 2, 1994, p. 297-301.
- /4/ Hemker M.; Mit Maus und Monitor, Flug Revue, 10/94, Oktober, S. 73-75.
- /5/ Dietz P., CAD in der Konstruktionslehre, Vorlesungen.

Methodik zur Bestimmung des Diffusionskoeffizienten

Dumbadse, A. A.

Der folgende Artikel stellt einen Beitrag eines georgischen Wissenschaftlers aus der Technischen Universität Tbilissi dar, der die Forschungsschwerpunkte des Instituts für Maschinenwesen nur am Rande berührt. Die numerische Umsetzung der Integralgleichung und die Lösung mit Hilfe der Randelemente ist eine Methode, wie sie bei anderen Aufgaben, z.B. der Festigkeitsbetrachtung oder der dynamischen Verhaltensanalyse von Maschinenteilen im IMW angewendet werden.

This contribution of a Georgian scientist, who is in good contact with IMW, does not focus the inner circle of our interests. Nevertheless, the interesting method of formulating and evaluating problems of differential equations by boundary element methods is common in IMW in the calculation of the static and dynamic behaviour of machine elements.

1 Lösung des Flüssigkeitsdiffusionsproblems bei Polymermaterial durch die Randelementmethode

Die vorgeschlagene Methodik zur Bestimmung des Flüssigkeitsdiffusionskoeffizienten von Polymermaterial basiert auf der Lösung der Diffusionsgleichung für den achsensymmetrischen Probenkörper des Polymermaterials nach der Methode der Randelemente.

Gemäß dem Berechnungsprofil der Flüssigkeitskonzentration im Probekörper wird die Kinetik des Probekörperanschwellens bestimmt, die mit der im einfachsten Experiment erhaltenen gegenübergestellt wird.

Schreiben wir die Diffusionsgleichung auf:

$$\frac{C}{t} = D \nabla^2 C \quad (1.1)$$

wobei C - Flüssigkeitskonzentration ist; D - der Flüssigkeitsdiffusionskoeffizient im untersuchten Polymermaterial; T - Zeit; ∇^2 - Laplace Operator.

Es wird vermutet, daß der Diffusionskoeffizient von der Spannungsgröße nicht abhängig ist.

Für die Probenkörper-Ringe, an denen die Bestimmung des Diffusionskoeffizienten für eine Plastikröhre zweckmäßig auszuführen ist, erhalten wir Gleichungslösung (1.1) mit folgenden Grenzbedingungen erster Art:

Auf der Oberfläche S_1 ist die Flüssigkeitskonzentration $C = C^*$ aufgegeben. Die Grenzbedingung zweiter Art auf der Oberfläche S_2 wird durch die Gleichung

$$D \frac{C}{n} = q + (C - \bar{C}) \quad (1.2)$$

aufgestellt.

In dieser Gleichung sind folgende Bezeichnungen gewählt: q - Dichte des Diffusionsstromes; $-Nu \cdot D/d$ - Masseausgabekoeffizient; Nu - Nusselt Zahl; d - charakteristisches Probenkörperausmaß; C - Flüssigkeitskonzentration in der Umwelt.

Im beschriebenen Fall wird $q = 0$ angenommen. Für die Aufgabenlösung ist es in diesem Fall notwendig zwei Parameter des Prozesses aufzustellen:

Diffusionskoeffizient D und Massenausgabekoeffizient, die mit dem Diffusionskoeffizient durch die Nusselt Zahl Nu verbunden sind und dem charakteristischen Probenkörperausmaß d . Zur Bestimmung von d im Wärmedurchgang wird das Verhältnis

$$d = \frac{S}{P}$$

empfohlen, wo S - die Fläche ist, durch die der Massen- und Wärmeaustausch mit der Umwelt durchgeführt wird; P - Schnittperimeter vom untersuchten Prüfkörper.

Bei der rein molekularen Übertragung ist Nu eine konstante Größe, die von der Prüfgeometrie abhängig ist und im Bereich von 2 - 4 liegt. Anfangsbedingung: $C(0) = C^*$.

Zur Lösung der Diffusionsgleichung wird die Randelementmethode nach Galerkins Schema mit der Ausnutzung einer "Schwachen" Form verwendet /1, 2/

$$\dot{A}\dot{C} + KC = G \tag{1.3}$$

wobei gilt:

$$\dot{A}\dot{C} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^j \frac{C_e}{t} v_e e dv_n$$

$$KC = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^j DC_e v_e i_e i_j dv + \sum_{e=1}^m C_e S_2 e ds_n$$

$$G = \sum_{n=1}^N \sum_{L=1}^n \sum_{m=1}^S_1 \bar{C} ds_n$$

In diesen Verhältnissen ist

$$n_L = 1$$

wenn n_L

und

$$n_L = 0$$

wenn n_L

$m = 1, M$

$j, e = 1, 3$

$\beta = 1, B_n$

$i = 1, 3$

$j =$ Basisfunktionen

$N, M =$ Simplexen- und Knotenzahl im Bereich

$L =$ Elementenmenge, der Approximation der

Oberfläche S_2 vom Prüfkörper

$B_n =$ Zahl der Simplexeinheiten n , die sich auf der

Oberfläche des Körpers befinden

$C_j =$ Konzentration im Knoten j

$\sum_m^j =$ Bulews – Prozedur

$$\sum_m^j = 1$$

wenn j n der m P Knoten entspricht.

In allen anderen Fällen gilt:

$$\sum_m^j = 0$$

Zur Lösung der evolutionären Aufgabe wurde das

Krank-Nikolsons Schema benutzt, daß für (1.3) fol-

gendes Ergebnis liefert:

$$A \frac{C_{j-1} - C_j}{t_{j+1}} + KC_{j+1} = G \tag{1.4}$$

mit

$$t_{j+1} = t_{j+1} - t_j$$

Die Bestimmung von D wird nach dem folgenden Schema durchgeführt. Es wird die Anfangsbedeutung D_0 aufgegeben, damit werden Konzentrationsprofile im Prüfkörper und Anschwellungsgrad W in der Abhängigkeit von der Zeit berechnet. Dann vergleicht man die berechnete Abhängigkeit mit der experimentellen und beginnt mit weiteren Iterationen.

2 Programm zur Berechnung des Konzentrationsprofils im Prüfkörper und des Anschwellungsgrads vom Polymer

Der Algorithmus der beschriebenen Lösung ist als FORTRAN-Programm für einen PC - Typ IBM-AT als zusammengestelltes Programmpaket verwirklicht worden.

Der entwickelte Programmkomplex besteht aus zwei absoluten Modulen, die mit "govv.exe" und "r3mtv.exe" bezeichnet sind. Mit dem ersten von ihnen läßt sich nichtstationäre Masseübertragung in den achsensymmetrischen Körper berechnen. Das zweite Modul ist zur Berechnung des gespannt-deformierten Zustands vom achsensymmetrischen Körper bestimmt, unter der Berücksichtigung der Einwirkung der diffundierenden Flüssigkeit auf die Eigenschaften des Polymermaterials.

Struktur des Programmkomplexes:

- Vorbereitung und Eingabe der Anfangsdaten.
- Erstellung des Randelementenetzes
- Aufstellung der Gleichungssystemmatrix
- Bestimmung des Außenbelastungsvektors
- Berücksichtigung der Grenzbedingungen
- Lösung des Gleichungssystems
- Berechnung der nötigen Charakteristiken in den Knoten des Randelementenetzes
- Ausgabe der Berechnungsergebnisse

Vor der Fileeingabe "govv.exe" muß unbedingt ein File mit den Ausgangsdaten vorbereitet werden. Der Fileaufbau ist beschrieben im Komplex- ft 13. Die Ausgangsdaten zur Berechnung des nicht stationären Prozesses der Massenübertragung und Anschwellungskinetik sind folgende:

1. Knotenzahl an der Grenze des betrachteten Bereichs (nb)
2. Dimensionsmassiv bnod(), das die Nummer dieser Knoten in der Bypassordnung gegen den Uhrzei-

gersinn enthält. Die Massivelemente werden ins Format 216 eingeschrieben.

3. Massive $z(\)$ und $R(\)$, in die die Grenzknotenkoordinaten im Format 2E12.3 eingetragen werden.

4. Grenzknotenanzahl $kgrx$, in denen die Grenzbestimmungen der I. Art aufgegeben sind (Konzentrationswerte). Wenn solche Knoten vorhanden sind, so ist es notwendig Massiv $volx(\)$ mit den entsprechenden Konzentrationswerten aufzustellen. Diese Massive werden in den Formaten I6 und E12.3 zusammenformiert. Wenn solche Massive nicht vorhanden sind, ist unbedingt $kgrx = 0$ einzugeben.

5. Zahl der Knotenpaare (Grenzelementenseiten), $kgrp$, auf denen die Grenzbedingungen der II. Art aufgegeben sind - es sind Massenfluß und Masseausgabekoeffizient bestimmt. Das Massiv, in das die untersuchten Paare eingetragen werden, wird mit IURZ $(\)$ bezeichnet. E wird im Format Z 16 formiert.

6. Die Zahl der Knotenpaare (Grenzelementenseiten), auf denen die Grenzbedingungen der III. Art aufgegeben sind. Das Massiv IUP3 $(\)$ schließt die im Format Z16 eingetragenen Nummern von diesen Knoten ein.

7. Konstantenbezeichnungen lam , alz , tz , gz - entsprechen dem Diffusionskoeffizienten, Masseausgabekoeffizienten, der Flüssigkeitskonzentration in der Umwelt und dem Massenfluß. Diese Konstanten werden nach dem Format 4 E 12.3 eingetragen.

8. Maximale Schrittzahl in der Zeit ns_{max} , die 250 nicht überschreiten soll, und die Schritte in der Zeit tau werden in die Formate I 6 und E 12.3 eingetragen

Die Formierung des Randelementenetzes wird durch die Unterprogramme TRIIRA, KRISSP und MATRJ 1 durchgeführt.

Der Aufbau der Außenbelastungsvektoren wird mit der Verwendung des Unterprogramms GNDOSOS durchgeführt.

Zur Lösung der linearen algebraischen Gleichungssysteme, die symmetrisch, positiv bestimmt, zugelassen sind, sind die Programme SOLVE 1 und SOLVE 2 vorgesehen. In der Methode ist die effektive, gerade Faktorisierungsmethode LDL^T verwendet. Alle Ergebnisse werden als Tabelle der Werte von Flüssig-

keitskonzentrationen in den Randelementeknoten, und auch als Kennlinien des Regelabstandes von den bestimmten Konzentrationswerten dargestellt. Für diesen Zweck sind die Unterprogramme VISUAL, MENU 5 bb 1 im Komplex ausgenutzt.

3 Bestimmung des Diffusionskoeffizienten von Pretroleum in den Plastikrohrleitungen

Die angebotene Methodik ist zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten von Pretroleum in Plastikrohrleitungen ausgenutzt worden. Der innere Durchmesser der Rohrleitung ist 44 mm, der äußere 51 mm. Die experimentelle Untersuchung der Anschwellungskinetik dieses Materials in Petroleum wurde an ringförmigen Prüfkörpern, mit der Höhe von 10 mm durchgeführt. Die Anfangsmasse der Prüfkörper war ungefähr 6 g. Die Prüfkörper wurden vom Plastikrohr abgeschnitten. Die Dauer des Experiments war 5 Stunden. Nach jeder Stunde wurden die Körper gewogen. Der Anschwellungsgrad wurde wie ein relativer Zuwachs der Probenmasse infolge der Petroleumdiffusion bestimmt.

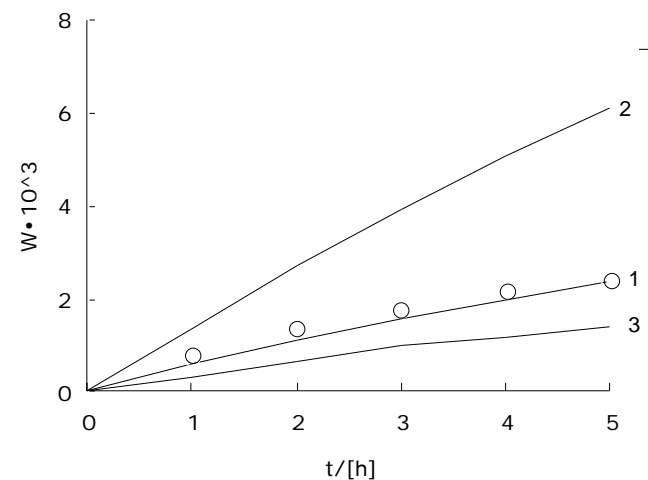


Bild 1: Anschwellungsgrad von Polyäthylen in Petroleum als Funktion der Zeit.

o = Experiment

1 = Berechnet mit $D=2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$, $Nu=3,66$

2 = Berechnet mit $D=2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$, $Nu=10$

3 = Berechnet mit $D=2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$, $Nu=2$

Auf **Bild 1** ist die Abhängigkeit des Anschwellungsgrades von der Zeit im Untersuchungsprozeß dargestellt. Auf der Abbildung sind auch die berechneten Abhängigkeiten des Anschwellungsgrades aufgetragen, die bei den verschiedenen Werten des Diffusionskoeffizienten und bei der Nusselt Zahl Nu enthalten sind. Wie aus den angeführten Angaben zu sehen

ist, liegt die experimentelle Abhängigkeit des Anschwellungsgrades sehr nah an den berechneten Ergebnissen bei denen folgende Parameterwerte zugrundegelegt wurden: $D = 2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$; $Nu = 3,66$. Die angenommene Größe Nu entspricht dem Zylinderrohr mit allseitigem Wärme- und Massenaustausch. Wie aus den angeführten Angaben zu sehen ist, ist die Genauigkeit der Diffusionskoeffizientenbestimmung mit der Ausnutzung der vorgeschlagenen Methodik von der Richtigkeit der Auswahl von dem entsprechenden Wert der Nusseltkriteriums Nu bedeutend abhängig.

4 Schlußfolgerung

I Es ist eine Methodik für die Bestimmung des Diffusionskoeffizienten von flüssigen Medien in polymere Materialien aufgestellt worden, die auf der Lösung der nichtstationären Masseübertragung im festen Körper mit Hilfe der Randelementemethode und auf der Analyse der Materialanschwellungskinetik in dem untersuchten Medium basiert.

II Es ist ein Programm zur Realisation der Randelementemethode entwickelt worden, für die Lösung des Problems der Masseübertragung in achssymmetrischen Körpern.

III Mit Anwendung der vorgeschlagenen Methodik ist der Wert des Petroleumdiffusionskoeffizienten in der Polyäthylenrohrleitung bestimmt worden.

IV Die Genauigkeit der Bestimmung des Diffusionskoeffizienten nach der vorgeschlagenen Methodik ist von der Richtigkeit der Auswahl des entsprechenden Wertes des Nusselt-Kriteriums abhängig.

V Es scheint zweckmäßig aufgrund der erhaltenen Ergebnisse eine Bewertungsmethodik für die Wirkung der Diffusion des flüssigen Mediums auf den gespannten deformierten Zustand der Konstruktionen aus Polymermaterialien zu erarbeiten. Dazu gehört auch die Methodik der experimentellen Untersuchung der Wirkung von mechanischen Belastungen auf den Masseübertragungsprozeß in den Polymermaterialien.

Literatur

/1/ Brichal, J.D.; Kelly, A.: New inorganic materials, "Sci. Amer.", 1983, v. 248, N 5, p. 88-95

/2/ Flagg, D.L.; Grossman, F.W.: Analysis of viscoelastic response of composite laminate during hydrothermal exposure, J. of Comp. Mater., 1981, v. 15, N 1, p. 21-40

/3/ Crank, J.: The mathematics of diffusion, Oxford, 1956, 350 p.

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 Laufverhalten 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;
- CAD-gestützte Simulation von Fertigungsverfahren;
- Ermittlung von Daten zur Qualitätssicherung und Übergabe zur Konstruktion;
- Werkzeugdatenverwaltung;
- Aufbau und Gestaltung WWW-Servern.

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 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 lärmarmen, schnelllaufender Mühlen;
- Baureihenentwicklung von Kreislaufreaktoren mit innenliegendem Kreislauf für Gasphasenreaktionen.

Maschinenakustik

- Geräuschminderung von Einzelmaschinen und Maschinenhallen;
- Systematisches Konstruieren lärmarmen Maschinen und Schallminderung;
- Untersuchungen zu Körperschall;
- Entwicklung von Körperschall-Impedanzelementen;
- Schallemission, Schallanalyse im schallarmen Raum;
- Entwicklung eines Konstruktionsberatungssystems Akustik;
- Arbeitsmethodik lärmarmes Konstruieren.

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 Auswertverfahren 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;
- Durchführung von Beanspruchungsanalysen von Maschinen / Maschinenteilen im Betrieb unter Verwendung von hochdynamischen Multiplexern in Verbindung mit einer Telemetrieanlage.

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:

- Methodisches Konstruieren;
- Gestalten lärmärmer Maschinen;
- 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 Apparatebauunternehmen 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;
- Frequenzselektiver spannungsoptischer Prüfstand (1kN Shaker) mit paralleler Messung der Transferfunktion, Durchgangs-, Einfügungsdämmung, Impedanz an Strukturen mit genormten Prüfabläufen.
- 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;
- Schallpegelmessung von 4 Hz - 100 kHz;
- Terz- und Oktavfilter nach DIN-, IEC- und ANSI-Anforderungen;
- Hand-Schallpegelmesser mit Terz- und Oktavfilter;
- FFT-Analyse, Schmalbandanalyse.

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, 128Mb, 20 Gbyte);
- Fileserver (PC-Bereich): SparcStation 10/40 (64Mb, 6 Gbyte), PC Pentium 90 (32 Mb, 3 Gbyte);
- Batch: SparcStation 20/50 (2 CPU's, 96Mb, 1,5Gbyte), IBM 590H (128Mb, 2 Gbyte);
- Netzverwaltung / -dienste: SparcStation2 (32 Mb, 2 Gbyte);
- Arbeitsplätze: 38 Unix-Workstations (Sun), 55 Apple Macintosh, 8 PC, 4 Meßrechner
- Vernetzung: Localtalk, 10Base2, 10Base5, 10BaseT, 10Base-FL.

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
B 242 → 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.

