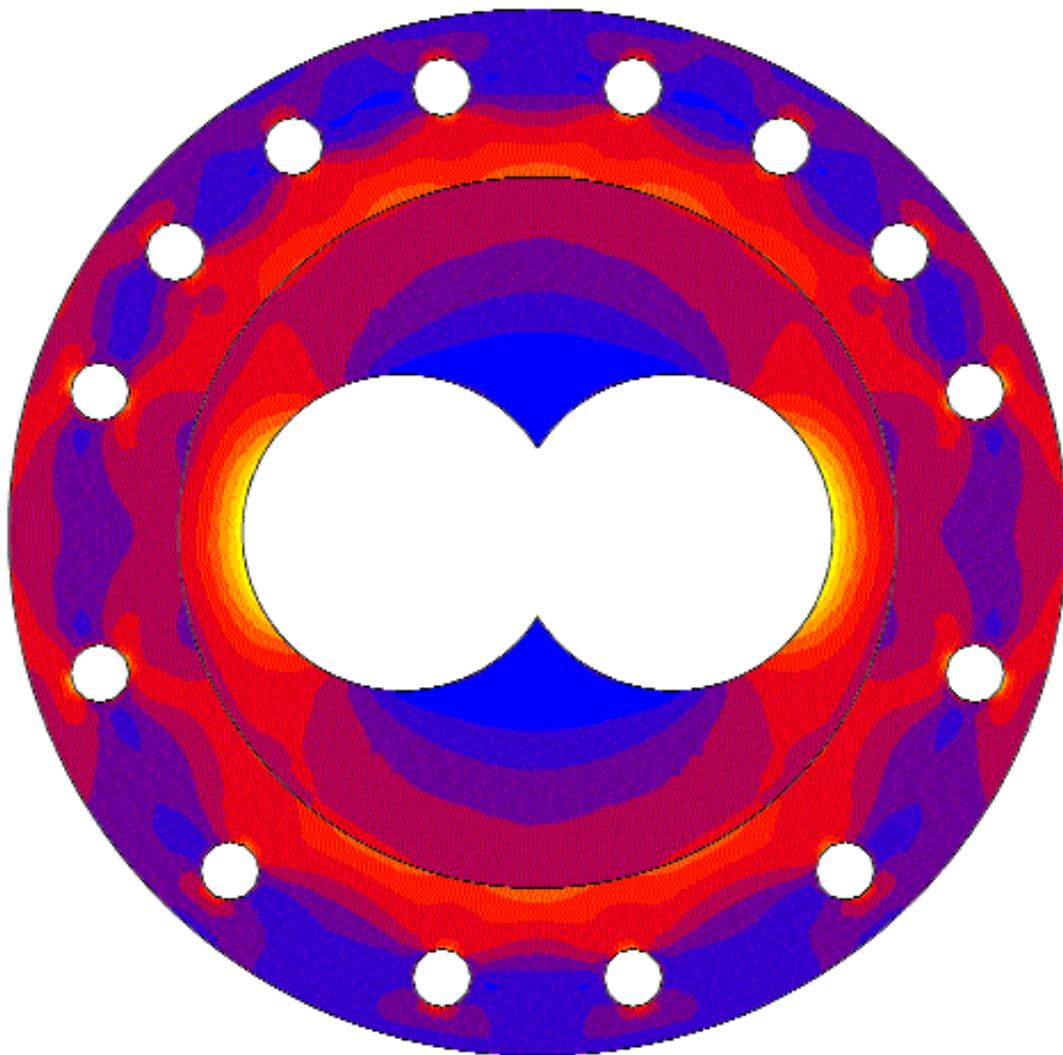




Institut für Maschinenwesen

Mitteilung Nr. 23 (1998)



Mitteilungen aus dem
Institut für Maschinenwesen
der
Technischen Universität Clausthal

Nr. 23

(November 1998)

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz

Redaktion und Layout:

Dr.-Ing. Günter Schäfer
Dipl.-Ing. Martin Garzke

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:

Das Institut für Maschinenwesen führt numerische und experimentelle Bauteiluntersuchungen durch. Das Titelbild zeigt die Spannungen eines Doppelschneckenextrudergehäuses, bei dem das Außenteil auf das Innenteil aufgeschumpft wurde.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen	
Dietz, P.: Tragfähigkeitssteigerungen von Maschinenelementen durch teilplastische Verformungen	3
Garzke, M.; Wuttke, S.: Untersuchung der Kegelpreßverbindung einer Zerkleinerungsmaschine.....	13
Birkholz, H.: Qualitätssicherung an Zahnwellen-Verbindungen	17
Schäfer, G.: Verschleiß und Lebensdauer von Zahnwellen-Verbindungen	19
Henschel, J.; Mupende, I.: Analyse der Beanspruchungen an Windentrommeln	27
Birkholz, H.; Garzke, M.; Mupende, I.: TWINTORS® - Membrankupplung für Turbomaschinen	31
Otto, St.: Die Kurbelschleife als Bauelement zur Bewegungsumwandlung in Verbrennungsmotoren	35
Grünendick, T.: Thermisches Spritzen in der Luftfahrtindustrie	39
Konstruktionssystematik und rechnerunterstützte Produktentwicklung	
Müller, N.: Einsatz der Informationstechnik für die Produktentwicklung.....	47
Große, A.: Stahlauswahl für Konstrukteure im Internet.....	51
Bönig, S.; Heimannsfeld, K.: Die KOMB-Analyse am Beispiel einer Niedertemperaturentschwefelungsanlage.....	59
Heinen, F.; Tawil, M.: Untersuchung der Rückfederung tiefgezogener Bleche	67
Klemp, E.: Rapid Tooling – Schnelle Herstellung von Prototypenwerkzeugen für den Formenbau	75
Heimannsfeld, K.; Judith, M.: KARE – Knowledge Acquisition and Sharing for Requirement Engineering	79
Gummersbach, F.: Informationsbasis zur Konstruktion lärmarmen Produkte.....	83
Judith, M.: ProManual – Intelligente Produkthandbücher.....	89
Tawil, M.: 3D-CAD-Einsatz in Konstruktion und Fertigung	93
Goltz, M.; Schmitt, R.: SIMNET – Workflow Management for Simultaneous Engineering Networks	97

Experimentelle Methoden und meßtechnische Untersuchungen

Käferstein, B.:	
3D-Verformungsmessungen auf 10 nm genau	
Grundlagen und Anwendungsbeispiele der Speckle-Interferometrie.....	101
Garzke, M.; Henschel, J.; Schäfer, G.:	
Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 1)	109
Birkholz, H.; Heider, G.:	
Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 2)	115
Grünendick, T.; Käferstein, B.; Otto, St.:	
Messdatenrückführung als Ausgangsbasis für Rechnersimulationen.....	117

Maschinenakustik

Dietz, P.; Haje, D.:	
Entwicklung lärmarmen Produkte -	
Rechnergestützte Beratungshilfen für den Konstrukteur	121
Gummersbach, F.; Käferstein, B.:	
Ansätze zur Schallminderung am Beispiel einer elektrisch angetriebenen Transporteinheit.....	129

Institutsbetrieb

Müller, N.:	
Tradition und Zukunft: Die Clausthaler Konstruktionswoche – CKW'99.....	135
Große, A.:	
Das Praktikum "Konstruktion technischer Produkte"	137
Klemp, E.:	
Forschungsförderung durch die Europäische Kommission –	
Ein Angebot für kleine und mittelständische Unternehmen	145

Hochschulkontakte

Dietz, P.; Wächter, M.:	
Modularisierung von Studiengängen	147
Brandt, A.; Dietz, P.:	
ERASMUS/SOCRATES – europäisches Studenten- und Dozentenaustauschprogramm	151
Grethe, V.:	
Netzwerk für zukünftige Kooperationen - COPES führt europäische Wissenschaftler nach Clausthal	153
Kalwa, R.; Schäfer, G.:	
Die Kooperationsaktivitäten zwischen der TU Clausthal und der Universität Fuxin in China	155
Betaneli, A. J.; Sanadse, G. O.:	
Der goldene Schnitt im Maschinenbau	161
Dzik, S.; Siemieniec, A.; Wolny, S.:	
Das Richten von Stahlbauwerken durch gezielt aufgeschweißte Verstärkungslaschen.....	165

Ausstattung etc.

Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes	171
Veröffentlichungen des Institutes seit dem 1.1.1994	174

Autoren 177

Tragfähigkeitssteigerungen von Maschinenelementen durch teilplastische Verformungen

Dietz, P.

Durch Ausnutzung des plastischen Verformungsvermögens üblicher Maschinenbauwerkstoffe läßt sich die Tragfähigkeit von Maschinenelementen erheblich steigern. Der Aufsatz stellt an einigen Beispielen die Kriterien zur Auslegung von Bauteilen mit teilplastischen Verformungen dar. Es gelten dabei andere Versagensmechanismen als bei der linear-elastischen Berechnung, die von der Überschreitung von Grenzdehnungen bis zur Abschätzung von Steifigkeitsverlusten reichen. Teilplastische Verformungen können auch zum „Trainieren“ von Verbindungen mit Mehrfacheingriff genutzt werden.

The acceptance of plastic deformations in machine elements leads to increased load capacity. The publication describes criteria to design structures with partly plastic deformations by some characteristic examples. Mechanisms of failure change compared with the linear-elastic dimensioning of machine parts, new criteria are for example limiting stresses or the loss of stiffness. Plastic deformations can be used for „training“ connections with multiple working contacts as splined joints.

1 Einführung

Die Grenzbeanspruchung von Maschinenbaustrukturen wird heute in den weitaus meisten Fällen nach dem Kriterium des linear-elastischen Verhaltens der Bauteile und ihrer Materialien ermittelt. Eine solche Betrachtung "auf der sicheren Seite" unterschätzt grundsätzlich die Beanspruchbarkeit des Bauteils, da die plastische Verformbarkeit und das damit verbundene Arbeitsaufnahmevermögen nicht berücksichtigt werden. Die bei solchen Berechnungen gesetzte untere Schranke hat aber auch den Vorteil, daß das Deformationsverhalten einfach abgeschätzt werden kann. Die Nutzung des plastischen Verformungsvermögens wird in vielen Fällen unter dem Begriff "Streckgrenzenverhältnis" als zusätzliche Sicherheit genutzt, bis auf wenige Fälle wie z.B. beim elastisch-plastischen Schrumpfverband oder bei der Berechnung dickwandiger Rohre im Apparatebau werden teil-

plastische Beanspruchungs- und Verformungszustände im Festigkeitsnachweis von Maschinenbaustrukturen nicht verwendet. Zulässige teilplastische Verformungen oder zulässige Größen von plastisch deformierten Zonen sind normalerweise nicht bekannt, daneben gibt es aber fallspezifische Betrachtungen wie zulässige Gesamtverformungen oder die Ausnutzung der Verfestigung bei mehrfacher Belastung (low cycle fatigue). Meist steht auch dem Aufwand einer Berechnung oder experimentellen Bestimmung die Unsicherheit bei der Interpretation der Ergebnisse gegenüber. Lediglich in der mechanischen Umformtechnik wird bewußt nach der Verformbarkeit durch plastisches Fließen ausgelegt, um beispielsweise die Betriebskräfte von Fließpressen, Tiefziehmaschinen usw. zu berechnen.

Die kontrollierte Berücksichtigung von Beanspruchungen und Verformungen im teilplastischen Bereich kann aber erheblich zur Steigerung der Tragfähigkeit und zum Leistungsvermögen von Maschinenbauteilen beitragen, da

- durch das Fließvermögen des Werkstoffs Spannungsspitzen infolge Verteilung auf weniger beanspruchte Bauteilbereiche abgebaut werden,
- durch die örtlich unterschiedlichen Verformungen nach Entlastung Eigenspannungszustände vorherrschen können, die zu einer Entlastung beitragen, und
- aufgrund der Materialverfestigung die Grenzbeanspruchungen steigen.

Die Frage nach einer Versagenshypothese unter Ausnutzung plastischer Verformungsanteile ist in der Literatur nur in Sonderfällen behandelt, z.B. für die Rißausbreitung in duktilen Werkstoffen /1, 2, 3/ oder die Berechnung teilplastisch beanspruchter rotationssymmetrischer Preßverbindungen nach DIN 7190 /4/. Eine sinnvolle Grenze besteht z.B. in der Vorschrift, daß das Bauteil nicht "durchplastiziert", wie dies in (**Bild 1**) am Beispiel einer Lasche gezeigt wird. Man geht davon aus, daß die bei teilplastischer Verformung übrigbleibende elastische Zone eine Stützwirkung gewährleistet und das

Verformungsverhalten sich nicht wesentlich von dem im linear-elastischen Bereich unterscheidet.

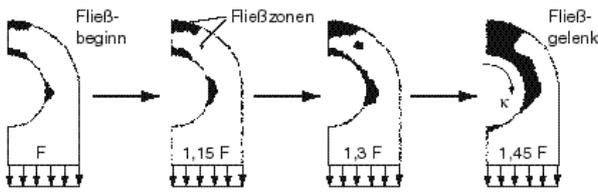


Bild 1: Plastifizierungsfolgen einer spielbehafteten Bolzen-Lasche-Verbindung. κ = Kontaktwinkel des Bolzen-Lasche-Kontakts; F = Zuglast

Im folgenden soll an einigen Beispielen gezeigt werden, wie teilplastische Verformungen im Rahmen einer Tragfähigkeitsrechnung behandelt werden können und wie man - abhängig vom jeweiligen Anwendungs- und Versagensfall - eine Strategie zur Optimierung von Maschinenteilen unter Ausnutzung von Teilplastizität entwickeln kann.

Rechnerisch läßt sich das Fließvermögen und die Verfestigung des Werkstoffs sinnvoll auswerten, wenn man die Spannungs-Verformungsbeziehungen nach Überschreiten der Fließgrenze durch mathematische Beziehungen formuliert, die bei einfachem Aufbau eine möglichst große Annäherung an die gemessenen Verläufe des Zugversuchs gestatten /1, 2, 3/. Am bekanntesten sind die folgenden Darstellungen:

- Elastisch-idealplastisches Materialverhalten (**Bild 2**, Kurve 1)

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_s} = \frac{\sigma}{\sigma_s} \quad \text{für} \quad \frac{\sigma}{\sigma_s} \leq 1; \quad \epsilon \text{ unbegrenzt anwachsend für} \quad \frac{\sigma}{\sigma_s} = 1$$

- Elastisch-plastisches Materialverhalten mit linearer Verfestigung (**Bild 2**, Kurve 2)

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_s} = \frac{\sigma}{\sigma_s} \quad \text{für} \quad \frac{\sigma}{\sigma_s} \leq 1; \quad \frac{\epsilon}{\epsilon_s} - 1 = m \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} - 1 \right) \quad \text{für} \quad \frac{\sigma}{\sigma_s} \geq 1$$

- Elastisch-plastisches Verhalten mit exponentieller Verfestigung (**Bild 2**, Kurve 3)

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_s} = \frac{\sigma}{\sigma_s} \quad \text{für} \quad \frac{\sigma}{\sigma_s} \leq 1; \quad \frac{\epsilon}{\epsilon_s} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^n \quad \text{für} \quad \frac{\sigma}{\sigma_s} \geq 1$$

Alle folgenden Darstellungen beruhen auf den mechanischen Bedingungen isotroper und homogener Werkstoffe, die zur Anwendung kommende Fließbedingung ist die Gestaltänderungsenergiehypothese (v. Mises). Die Ergebnisse beruhen im wesentlichen auf der Berechnung mit finiten Elementen an typischen Maschinenbeispielen, auf die Entwicklung geschlossener Lösungen im Sinne von /2/

und /3/ wurde zugunsten einfacher, an den Konstrukteur gerichteter Aussagen und Konstruktionsregeln verzichtet.

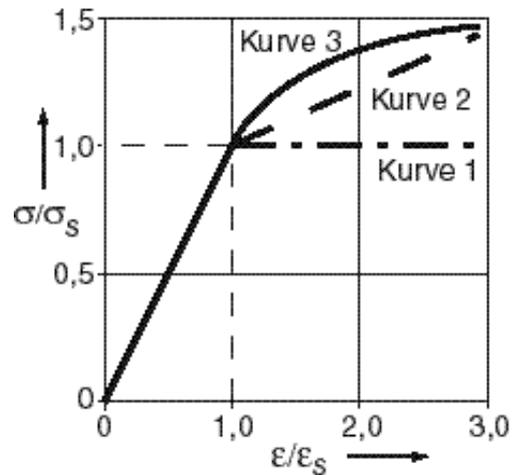


Bild 2: Elastisch-plastisches Materialverhalten. Kurve 1: Elastisch-idealplastisches Verhalten, Glg.(1). Kurve 2: Elastisch-plastisches Verhalten mit linearer Verfestigung, Glg. (2). Kurve 3: Elastisch-plastisches Verhalten mit exponentieller Verfestigung, Glg. (3)

2 Versagenskriterium Festigkeit unter teilplastischer Beanspruchung

2.1 Beispiel: Bolzen-Lasche Verbindung

Im folgenden Beispiel soll anhand eines Bauteils unter zweiachsiger Beanspruchung gezeigt werden, daß allein durch das teilplastische Verformungsvermögen und die damit einhergehende Umverteilung der Beanspruchungen erhebliche Tragfähigkeitssteigerungen errechnet werden können. Als Materialgesetz wird elastisch-idealplastisches Verhalten (Kurve 1 in **Bild 2**) vorausgesetzt, die Berücksichtigung der Materialverfestigung ergäbe weitere Reserven zur Laststeigerung.

Der als Beispiel gewählte Augenstab zeigt bereits im elastischen Beanspruchungsbereich eine Kopplung von Verformung und Beanspruchung, die von den geometrischen Verhältnissen (Kopf- und Wangenquerschnitte), vom Spiel zwischen Bolzen und Lasche und von der Höhe der Belastung abhängen. **Bild 3** zeigt als Ergebnis einer FE-Berechnung die Radial- und Schubspannungen einer solchen Verbindung, es lassen sich damit eindeutig eine ungleichmäßige Beanspruchungsverteilung und damit gefährdete Bereiche feststellen /6/.

Das Einsetzen örtlicher plastischer Verformungen führt hier zu einer Umverteilung der Beanspruchun-

gen und zu einem Abbau der Spannungsspitzen an den Berührstellen der spielbehafteten Verbindung - die Lasche "wickelt" sich infolge plastischer Verformung um den Bolzen. Da das Verhältnis von Zug/Druck- und Biegespannungen von der geometrischen Form abhängt, ist eine zusammenfassende Aussage über den Tragfähigkeitsgewinn durch Ausnutzen teilplastischer Verformungen nur bei spielhaft möglich.

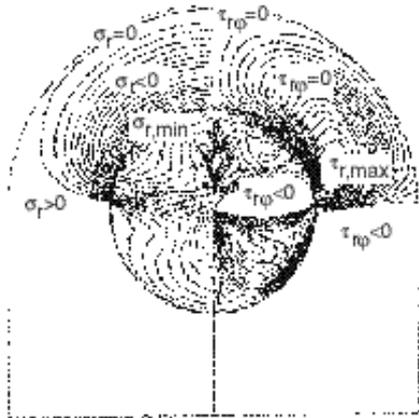


Bild 3: Linien gleicher Spannungen in einem Augenstab unter Zug mit einem Spiel von 0,1%. Ergebnisse einer Rechnung mit finiten Elementen. Links: Radialspannung σ_r , Rechts: Schubspannung $\tau_{r,\phi}$. Die Tangentialspannung ist auf diesem Bild nicht dargestellt.

Bild 4 zeigt den Tangentialspannungsverlauf in der Laschenwange bei steigender Belastung, deutlich sieht man die Zunahme der plastischen Verformung und damit die erforderliche Spannungsverlagerung bei den höheren Lasten. Hieraus ist auch die im Bild erkennbare Verlagerung der neutralen Faser bei starken teilplastischen Verformungen erkennbar. Dies ist nur möglich bei Biegebeanspruchung, bei der im Fall der Überschreitung der Fließgrenze an der Außenfaser der "Reservebereich" im Inneren des Biegequerschnitts zur Verfügung steht.

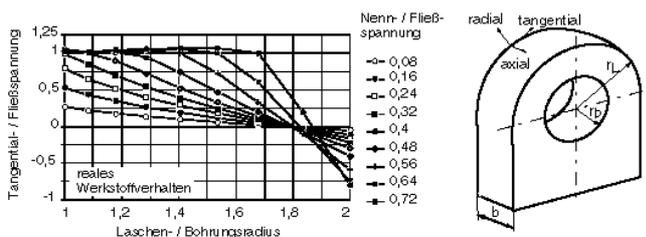


Bild 4: Tangentialspannungsverlauf in der Laschenwange bei steigender Belastung für reales elastisch-plastisches Werkstoffverhalten. Ergebnisse von FEM-Rechnungen.

Die Auswertung einer Reihe von Berechnungen mit kombinierter Zug/Druck- und Biegespannung läßt eine Verallgemeinerung bei der Einschätzung der Tragfähigkeitssteigerung in ebenen Spannungszuständen zu. Das Lösungsfeld in **Bild 5**, das aus mehr als 1000 Berechnungen mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente entstanden ist, zeigt Bereiche des Werkstoffverhaltens bei der Annahme elastisch-idealplastischen Werkstoffverhaltens. Aufgetragen sind die jeweils auf die Streckgrenze normierten maximalen Zug/Druck- und Biegespannungen in den Laschenquerschnitten, wenn eine rein elastische Rechnung durchgeführt würde:

- Das Feld der rein elastischen Beanspruchungen (iEaE) reicht bei reiner Biegebeanspruchung und reiner Zugbeanspruchung bis zu den Quotienten +1 und -1. Dazwischen lassen sich die Beanspruchungen linear miteinander verknüpfen.
- Um dieses Feld herum liegen die Felder einseitig plastischer Verformung (iEaZ, iEaD, iDaE und iZaE). Bei reiner Biegebeanspruchung bzw. reiner Zugbeanspruchung erreichen sie eine minimale, bei einer kombinierten Beanspruchung eine maximale Ausdehnung. Die eingezeichnete Gerade zeigt am Beispiel eines Verhältnisses von Biege- zu Zugspannungsanteil von zwei, daß bis zu einem Verhältnis $\sigma_z/\sigma_s = 0,32$ der elastische Bereich nicht verlassen wird (Pkt. 1). Bei größer werdender Belastung beginnt die Lasche außen unter Zugbeanspruchung zu fließen, während sie innen noch im elastischen Bereich verbleibt. Der Moment des Fließgelenks (Durchplastizierung) tritt bei einer Erhöhung der Last um 67% gegenüber dem rein elastischen Zustand ein (Pkt. 2).
- Bei überwiegender Biegebeanspruchung schließt sich ein Feld der beidseitig plastischen Beanspruchung an (iZaD und iDaZ). Aufgrund der elastisch-idealplastischen Rechnung ist dieser Zuwachs im Bereich der Zug/Druckbeanspruchung gleich Null.
- Außerhalb dieser Zone liegt das Gebiet der nicht realisierbaren Lösungen, bei denen die Lasten so groß sind, daß eine Durchplastizierung stattfindet.

Bereits mit Hilfe dieser vereinfachten Betrachtung läßt sich der Tragfähigkeitsgewinn bei elastisch-idealplastischem Materialverhalten gut abschätzen. Die Tragfähigkeitsgrenze kann neben der Bildung

des Fließgelenks auch dadurch erreicht werden, daß im teilplastischen Verformungsgebiet die Grenzdehnung des Werkstoffs überschritten wird.

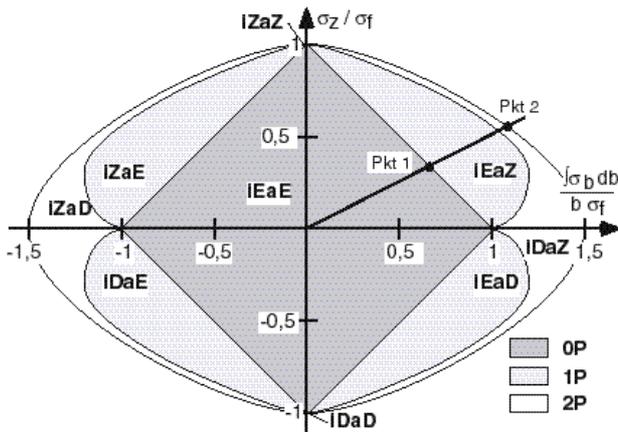


Bild 5: Lösungsfelder bei elastischer und teilplastischer Verformung infolge unterschiedlicher Belastungskombinationen aus Biege- und Zug/Druckbeanspruchung am Beispiel von Laschenverbindungen (gilt auch für den Fall der Beanspruchung krummer Balken). IEaE = innen und außen elastisch, iZaE = innen teilplastischer Zug und außen elastisch, iDaE = innen teilplastischer Druck und außen elastisch, iDaD = innen und außen teilplastischer Druck usw.; 0P = keine plastische Verformung, 1P = plastische Verformung auf einer Biegeseite, 2P = plastische Verformung im Zug- und Druckspannungsbereich der Biegezone). Pkt.1: Grenze des elastischen Bereichs; Pkt. 2: Fließgelenk im beschriebenen Beispiel

3 Versagenskriterium Steifigkeit unter teilplastischer Verformung

3.1 Beispiel Preßverband mit konstruktiven Schwächungen

Im Gegensatz zu dem bisher betrachteten Beispiel der Laschenverbindung, bei der teilplastische Verformungen keine wesentlichen Einflüsse auf die Funktion der Verbindung ausüben, sind bei dem folgenden Beispiel des Preßverbandes Steifigkeit und Verformung entscheidend für die Funktionserhaltung. Die Theorie des ebenen Spannungszustandes zur Berechnung teilplastisch beanspruchter Preßverbindungen entsprechend DIN 7190 geht davon aus, daß eine verbleibende elastische Zone eine hinreichende Stützwirkung zur Aufrechterhaltung des Vorspannungszustandes ausübt. /4/ und /5/ arbeiteten für elastisch-plastisch beanspruchte rotationssymmetrische Preßverbände ein Ausle-

gungsverfahren aus, das als Fließbedingung die modifizierte Schubspannungshypothese benutzt, mit dem auch das Verhalten verfestigender Werkstoffe gut wiedergegeben werden kann. Nach diesem Verfahren kann gegenüber der rein elastischen Auslegung ein bis zu 2,31-faches Übermaß zugelassen werden.

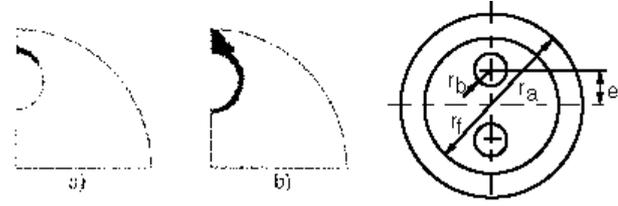


Bild 6: Plastische Zonen einer geschrumpften Welle mit 2 Bohrungen ohne Fügeflächenreibung. a) Überschreitung des bei elastischer Verformung maximal zulässigen Übermaßes um 10%. b) Überschreitung um 40%. Abmessungsverhältnisse der gerechneten Verbindung $r_b/r_f = 0,2$; $e/r_f = 0,625$; $r_f/r_a = 0,7$.

Der Zusammenhang von plastisch verformten Bereichen der Welle-Nabe-Verbindung auf das Steifigkeits- und damit auch Tragverhalten soll im folgenden an Preßverbindungen erläutert werden, die konstruktive Unregelmäßigkeiten wie Bohrungen, Nuten o.ä. aufweisen, bei denen also bereits im elastischen Bereich kein rotationssymmetrischer Spannungszustand vorherrscht. Zur Simulation des elastisch-plastischen Verhaltens der Konstruktionswerkstoffe wird ein linear verfestigendes Verhalten gewählt (Kurve 2 in **Bild 2**). Als Fließbedingung wird die Gestaltänderungsenergiehypothese (v.Mises) angenommen.

Am Beispiel einer durch zwei Bohrungen geschwächten Welle ohne Fügeflächenreibung (Ölpreßverband) zeigt **Bild 6** die plastische Zone bei zunehmendem Übermaß. Die vom Bohrungsrand mit der höchsten Beanspruchung ausgehende plastische Zone nimmt mit steigendem Übermaß zu und erreicht schließlich im Grenzfall die Fügefläche. Für dieses Beispiel zeigt **Bild 7** den auf die Streckgrenze R_e bezogenen durchschnittlichen Fugendruck \bar{p} in Abhängigkeit vom auf die elastische Dehnung an der Streckgrenze ϵ_s bezogenen Übermaß \bar{u}_{egrenz} . Hieraus kann zunächst anschaulich folgendes abgeleitet werden:

- Solange die maximale Bohrungsrandspannung σ_{vmax} kleiner als die Streckgrenze R_e ist, wird die Welle rein elastisch beansprucht (Bereich 1 in **Bild 7**).

- Wenn die maximale Bohrungsrandspannung σ_{vmax} die Streckgrenze Re überschreitet, wird die Welle teilplastisch beansprucht. Solange die dünnste Stelle zwischen Bohrungsrand und Fügefläche nicht vollplastisch beansprucht wird, weicht der durchschnittliche Fugendruck \bar{p} nur "geringfügig" von der Linearität ab (Bereich 2 in **Bild 7**). Durch die Stützwirkung der verbleibenden elastischen Zonen behalten die plastischen und elastischen Dehnungen die gleiche Größenordnung und die Steifigkeit des Schrumpferverbandes bleibt fast unverändert. Dieser Bereich ist für die Erhöhung der Tragfähigkeit durch Zulassen teilplastischer Verformung konstruktiv besonders wichtig. Bei dem hier gerechneten Beispiel kann die Übertragungsfähigkeit durch Ausnutzen des teilplastischen Bereichs um 40% gegenüber einer rein elastischen Auslegung erhöht werden.
- Mit Erreichen der vollplastischen Durchverformung krümmen sich die Fugendruck-Übermaß-Linien stärker mit abnehmendem Verfestigungsmodul E_{pl}/E , Glg. 2 (Bereich 3 in **Bild 7**).

Unter Berücksichtigung zugelassener teilplastischer Verformung ergeben sich - je nach konstruktiver Ausbildung des gestörten Preßverbands - mehrere Auslegungsgrenzen und die Bedingung für den Grenzdruck

$$\bar{p}_{pgrenz} = \min(\bar{p}_{Sbf}, \bar{p}_{Sbb}, \bar{p}_F)$$

Dabei ist \bar{p}_{Sbf} eine Steifigkeitsbedingung und bezeichnet den mittleren Paßfugendruck, bei dem die dünnste Stelle zwischen Bohrungsrand und Fügefläche gerade vollplastisch beansprucht wird (Übergang Bereich 2 / Bereich 3 in **Bild 7**). Die Grenze \bar{p}_{Sbb} bezeichnet den mittleren Fugendruck, bei dem im Fall mehrerer Bohrungen eine Durchplastizierung in den Stegen zwischen den Bohrungen erfolgt und dadurch eine Steifigkeitsminderung erreicht wird. \bar{p}_F bezeichnet eine Festigkeitsgrenze, bei der die plastische Dehnung eine Grenzdehnung überschreitet. Dieser Grenzwert ist wesentlich durch die Verfestigungseigenschaften des Konstruktionswerkstoffes bestimmt (**Bild 8**).

Die Ausbildung teilplastischer Zonen ist von der geometrischen Gestalt der Verbindung und der Störungen abhängig. Das in **Bild 9** gezeigte Beispiel einer aufgepreßten Nabe mit Sackbohrung zeigt neben den bisher betrachteten kritischen Bereichen der geschwächten Nabe (Zone 1 und 2)

eine weitere Festigkeitsgrenze im Bereich des plastisch verformten Bohrungsendes (Kerbwirkung durch Bohrerspitze, Zone 3). Zur detaillierten Berechnung von gestörten Preßverbindungen verschiedener Ausführungsformen sei auf /7/ verwiesen.

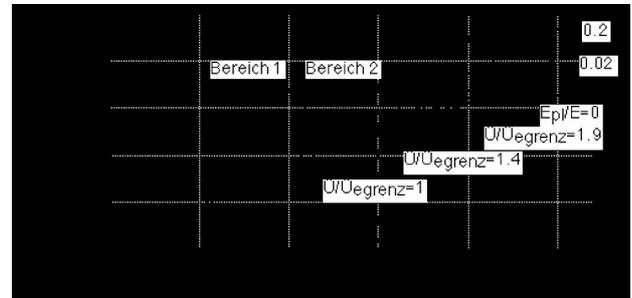


Bild 7: Fugendruck-Übermaßverhältnis einer geschrumpften Welle mit 2 Bohrungen ohne Fügeflächenreibung. $\bar{u} = (r_{fWelle} - r_{fNabe})/r_f$ auf den Fügeflächenradius bezogenes Übermaß ; \bar{u}_{egrenz} Übermaß bei Erreichen der Streckgrenze an einem Punkt der Verbindung ; E_{pl}/E Verhältnis der Steigungen im plastischen und elastischen Bereich im Zugdiagramm (vergl. Bild 2, Kurve 2) bei linearer Verfestigung im plastischen Bereich. Abmessungsverhältnisse der gerechneten Verbindung $r_v/r_f = 0,2$; $e/r_f = 0,625$; $r/r_a = 0,5$.

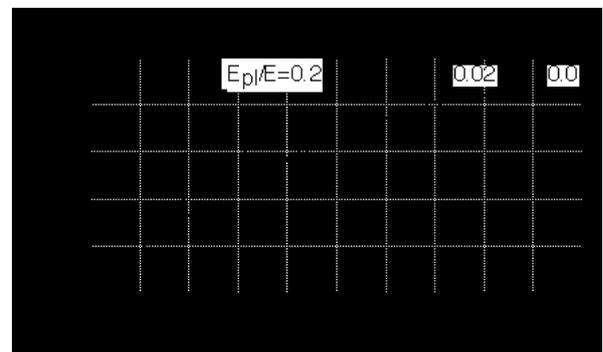


Bild 8: Übertragungsfähigkeit einer durch Bohrungen geschwächten, geschrumpften Welle in Abhängigkeit von einer zulässigen plastischen Dehnung. p_F/p_{egrenz} durch die Grenzdehnung bedingter maximaler mittlerer Fugendruck bezogen auf den durch den elastischen Bereich bedingten mittleren Fugendruck ; $\epsilon_{pzul}/\epsilon_S$ maximal zulässige plastische Dehnung bezogen auf die elastische Grenzdehnung, Werkstoffeigenschaft; E_{pl}/E Verhältnis der Steigungen im plastischen und elastischen Bereich im Zugdiagramm (vergl. Bild 2, Kurve 2) bei linearer Verfestigung im plastischen Bereich.

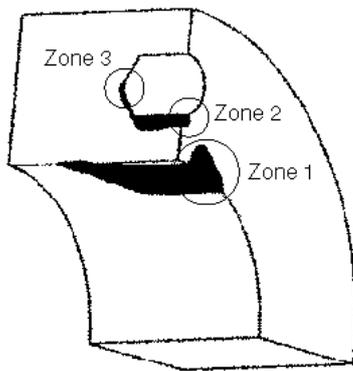


Bild 9: Plastische Zonen an einer aufgeschrumpften Nabe mit Sackbohrung. Zone 1: Plastizieren an der Fügefläche im Bereich der Schwächung durch die Bohrung. Zone 2: Plastische Verformung an der Stirnseite der Bohrung. Zone 3: Plastische Verformung am Bohrungsgrund durch die Kerbwirkung (Bohrerspitze)

Die dargestellten Beispiele machen deutlich, daß sich auch unter der Bedingung eines vorwiegend elastisch bedingten Vorspannungsverhaltens die Übertragungsfähigkeit von Preßverbindungen durch Zulassen teilplastischer Verformungen wesentlich erhöhen läßt, solange die plastischen Verformungen in der Größenordnung der elastischen Verformungen bleiben. Diese Erhöhung wird durch die von den Geometrieparametern abhängigen Steifigkeitsbedingungen und die von den Materialparametern abhängigen Festigkeitsbedingungen begrenzt.

4 Versagenskriterium Verformung

4.1 Beispiel Seiltrommel unter mehrlagiger Bewicklung

Mit dem hier geschilderten Beispiel soll der Fall verhältnismäßig großer plastischer Verformungen angesprochen werden, bei denen die plastischen Dehnungen für die Tragfähigkeit der Struktur nahezu ohne Belang sind, während die Verformungen selbst zu empfindlichen Funktionseinbußen führen. Dies tritt besonders bei druckbelasteten Maschinenelementen auf, bei denen das Verfestigungsverhalten in Verbindung mit der Querschnittszunahme zu einer Vergrößerung des "Streckgrenzenverhältnisses" im Druckbereich führen. Die hier als Beispiel gewählte Seiltrommel zeichnet sich dadurch aus, daß

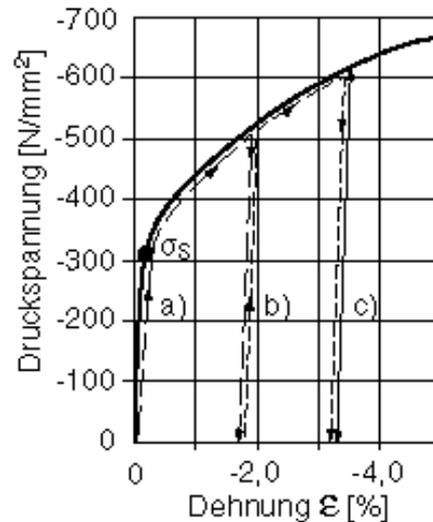


Bild 10: Spannungs-Dehnungsdiagramm des quasistatischen Druckversuchs für den Trommelwerkstoff GGG 40.3. Eingetragen ist der Vorgang des "Einfahrens" der Trommel infolge erstmaliger Belastung (a) und b)) und der dadurch vergrößerte elastische Bereich für die nachfolgenden Belastungen (c)).

- der unter der Umschnürung des Seilpaketes vorwiegend unter Druck belastete Trommelmantel auch bei plastischer Verformung bezüglich der Lastaufnahme durch die Seilwindungen keine Funktionsmängel aufweist,
- die extreme Verfestigungskurve im Druckbereich der verwendeten Werkstoffe (**Bild 10**) eine Anwendung des plastischen Bereichs empfehlen läßt, da sie nahezu eine Verdoppelung der Belastungsfähigkeit verspricht. Die gleichen Ergebnisse zeigen Schwingversuche im Druckbereich, so daß auch für den low-cycle-fatigue Fall die vorliegenden Aussagen angewendet werden können. In **Bild 10** eingezeichnet ist der Vorgang des "Einfahrens" eines Trommelmantels auf eine plastische Vorverformung, was nach der Erstbelastung eine Erhöhung des elastischen Bereichs für die Folgebelastungen verspricht.

Die Forderungen nach extremem Leichtbau von Hebezeugen, insbesondere im Fahrzeug- und Schiffsbau, führen zur konsequenten Ausnutzung dieses Werkstoffverhaltens, wobei sich erwiesen hat, daß eine plastische Rechnung der Beanspruchungen und Verformungen empfehlenswert ist /8/. Am Beispiel einer typischen Seiltrommelkonstruktion in **Bild 11** sei anhand von Schadensfällen aufgeführt, daß der Bereich großer plastischer Verfor-

mungen (Pos. A) in den meisten Fällen nicht die kritische Beanspruchung darstellt, sondern daß

- Schiefstellungen infolge plastischer Verformungen zu Lagerschäden führen oder Eingriffsstörungen des Antriebsstranges verursachen (Pos. B),
- Axialverformungen der Trommel zu Störungen der Lagerung beitragen (Pos. C),
- der Übergang der plastischen zu elastischen Verformungen im Bereich der Bordscheibenanschlüsse zu Vorspannungen führt, die die Kerbwirkung vergrößern können (Pos. D), und
- der Bereich der Endscheiben unzulässige Verformungen aufweisen kann, die den Bau- raum überschreiten. Am Beispiel einer Schiffswinde mit mehrlagiger Bewicklung konnte wegen zu großer Verformung der Bordscheiben die Last nicht mehr eingeholt werden. Im Falle von Bremscheiben bewirkt die Schiefstellung die Beeinträchtigung der Bremsfunktion (Pos. E).

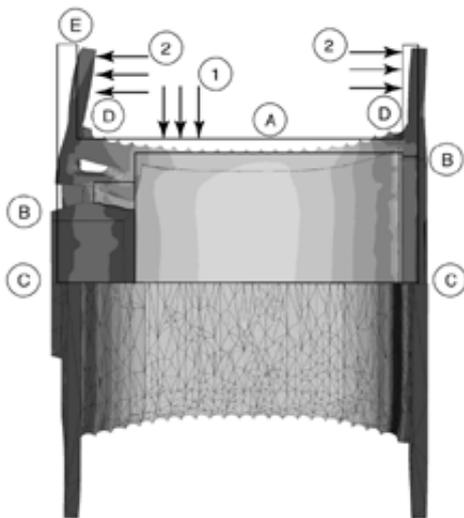


Bild 11: Seiltrommel, Beanspruchungs- und Verformungsverhalten anhand einer FE-Rechnung. Problemzonen: A Trommelmantel; B Lagerbereich infolge Radialverformung und Schiefstellung; C Einbaubegrenzung in axialer Richtung; D Kerbwirkungen im Bereich der Bordscheibenanschlüsse; E Endscheibenverformung bei mehrlagiger Bewicklung

Eine Optimierung der Trommeln ist aber bei Berechnung der Verformungen auch im plastischen Bereich durchaus möglich. **Bild 12** zeigt eine mit Hilfe der CAO-Technik /9/ berechnete ausgewogene Konstruktion unter Einbeziehung plastischer

Verformungen mit erheblicher Verringerung der Kerbwirkung im Bordscheiben-Anschlußbereich durch verformungsgerechte Gestaltung.



Bild 12: Optimierte Leichtbautrommel nach dem CAO-Verfahren

5 Ausgleichwirkung der teilplastischen Verformung bei Mehrfacheingriff

5.1 Beispiel Zahnwellen-Verbindung unter Torsionsbeanspruchung

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Fällen wird im folgenden Beispiel eine kontrollierte teilplastische Verformung bewußt eingesetzt, um einen Belastungsausgleich bei Mehrfacheingriffen zu erzielen, deren Übertragungsverhalten von Fertigungsabweichungen und den Verformungen unter Last stark abhängt. Das bekannteste Beispiel ist die überelastisch angezogene Schraubverbindung, bei der die Verformung der Schraubengänge einen Beitrag zur Lastverteilung leistet. Im folgenden sei als Beispiel die Zahnwellen-Verbindung gewählt, bei der infolge Verzahnungsabweichungen von Welle und Nabe und abhängig von der jeweiligen Einbaustellung sich eine ungleichförmige Lastaufteilung ergibt, wie sie **Bild 13** als Rechenergebnis im elastischen Bereich darstellt /10/.

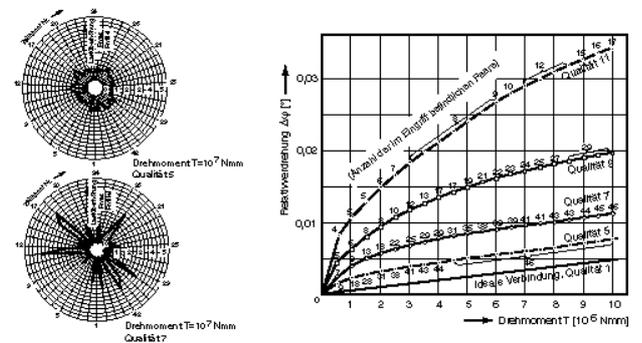


Bild 13: Lastaufteilung und Verdrehfederkennlinie einer durch reines Drehmoment belasteten Zahnwellen-Verbindung DIN 5480 - 95x2x30x42 in Abhängigkeit von der Herstellungsqualität. Elastischer Bereich.

Die Verzahnungsabweichungen bewirken, daß ein Teil der Zahnpaare erst bei hohen Lasten oder überhaupt nicht zum Eingriff kommen und dafür andere überlastet werden. Gleichzeitig zeigen Versuche, daß am Verbindungsende der Drehmomenteneinleitung die Beanspruchung am größten ist und daß infolge der Zahnfußausrundung eine erhebliche Kerbwirkung besteht. **Bild 14** stellt die Verteilung der Zahnfuß-Vergleichsspannung für eine Verbindung mit einem Längendurchmesser Verhältnis von $d_b = 0,5$ und einer sehr kurzen Nabe mit $b/d_b = 0,05$ dar /11, 12/.

Sowohl der Torsionseinfluß als auch der Einfluß der Biegebeanspruchung können zu einer plastischen Verformung im Zahnfuß der einzelnen Zähne führen, die beeinflusst werden kann durch die Wahl der Zahnform (Eingriffswinkel, Profilverschiebung, Zahnfußausrundung, Kopfhöhe usw.), **Bild 15**. Durch den relativ großen Querschnitt bis zur Durchplastizierung des Zahnfußes und damit zum Abscheren des Zahnes kann man einen Bereich der kontrollierten plastischen Dehnung definieren, bei dem die Zahnflanken eine Positionsänderung (Angleichung an die Gegenflanke) erfahren ohne die Übertragbarkeit der Zahnpaarung wesentlich zu beeinflussen (**Bild 16**). Da die Zahnkörper gegenüber dem Wellenkörper (Fußkreiszyylinder) eine wesentlich größere Verformbarkeit aufweisen, erfolgt - über der Länge der Verbindung gesehen - diese Angleichung im Bereich hoher Drehmomente stärker als am lastfreien Ende der Verbindung.

Der Vorgang der Angleichung soll an einem Versuchsbeispiel erläutert werden /11/: Die Prüfzahnwelle DIN 5480 - 45x2x30x21 IT8 aus dem Werkstoff 25MoCr4 ($R_e = 350 \text{ N/mm}^2$, $R_m = 535 \text{ N/mm}^2$, Bruchdehnung 30%) (**Bild 17**), zeigt in einer elastisch-plastischen Berechnung mit Werkstoffverfestigung gemäß Glg. (3) nach gemessenem Zugdiagramm folgende markanten Grenzen auf:

Beginn des plastischen Fließens am Zahnfuß (bei IT8) $T_{sg} = 390 \text{ Nm}$.

Beginn des plastischen Fließens am Zahnfuß (bei IT1/fehlerfrei) $T_{s1} = 1160 \text{ Nm}$.

Das heißt, daß im Moment des plastischen Fließens bei fehlerfreier Verzahnung der zuletzt belastete Zahn die Streckgrenze erreicht hat und alle anderen Zähne bereits plastisch geflossen sind. Durch plastisches Fließen um $36 \mu\text{m}$ entsprechend der nach DIN 3962 bestimmten Teilungs-Gesamtabweichung an dem Zahnpaar mit der größten Gesamtabweichung ist die durch die Fertigungs-

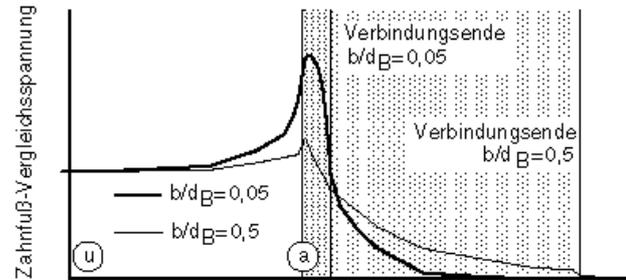


Bild 14: Wellenzahnfuß-Vergleichsspannung (Zugseite des Zahns) bei Beanspruchung durch Torsion und Zahnbiegung in einer Zahnwelle bei verschiedenen langen Naben. u = Welle unter Torsion außerhalb des Nabenbereichs; a = Nabenanfang, belastete Seite.



Bild 15: Ausbildung der plastischen Zonen eines überelastisch beanspruchten Wellenzahns bei gleicher Zahn-Normalkraft in Abhängigkeit von der Zahnform. Verzahnung nach DIN 5480, $z = 6$. a) Profilverschiebung mit mittlerem Flankendruckwinkel $\alpha = 24^\circ$; b) Profilverschiebung mit mittlerem Flankendruckwinkel $\alpha = 27^\circ$.

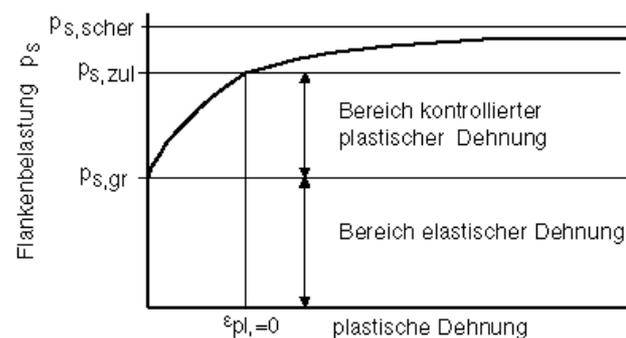


Bild 16: Grundsätzlicher Verlauf der plastischen Dehnung im Zahnfuß einer Zahnwellenpaarung bei Überschreiten der Elastizitätsgrenze.

fehler bedingte ungleichmäßige Lastaufteilung durch plastisches Fließen der einzelnen Zahnpaare ausgeglichen und die Zahnpaare weisen nach Entlastung ein für alle Zahnpaare gleiches Spiel in Belastungsrichtung auf (Achtung: Dies gilt natürlich nur für die Einbaustellung, in der die Last aufgebracht wurde!). Die entsprechenden plastischen

Dehnungen betragen bei diesem durch eine ausgeprägte Streckgrenze gekennzeichneten Werkstoff (**Bild 17**) bei Überschreiten der Streckgrenze in allen Paarungen mindestens $\varepsilon_s = 2\%$ der im Verfestigungsbereich liegende Zuwachs an plastischer Dehnung im Zahnfuß der maximal belasteten Paarung kann mit 0,05% abgeschätzt werden /11/.

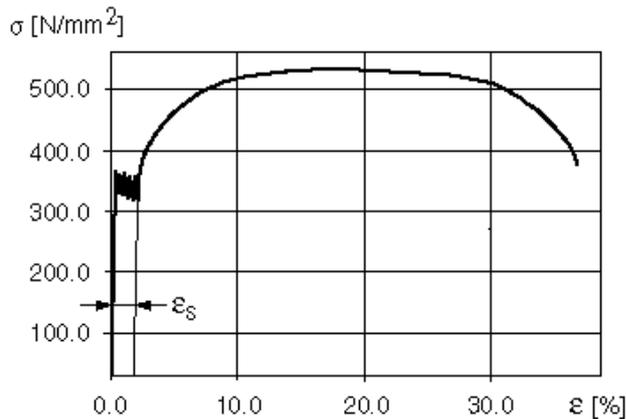


Bild 17: Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus Zugversuch. Rundprobe DIN 50125. Werkstoff 25MoCr4 /8/

Angesichts der hohen Bruchdehnung bietet sich hier eine hervorragende Möglichkeit, durch ein "Trainieren" der Verbindung, also ein Überlasten in den teilplastischen Bereich hinein, Fertigungsfehler auszugleichen und damit erhebliche Kosten zu sparen. Der Einfluß des Trainierens auf die Dauerfestigkeit der Verbindung ist Gegenstand aktueller Forschung.

Bild 18 zeigt die Zahnflankenverschiebungen der Prüfpaarung nach einem Verdrehversuch bis zur Zerstörung. Das im Versuch maximal ertragbare Drehmoment lag beim Zehnfachen der elastischen Rechnung, die bleibenden Zahnflankenverschiebungen übersteigen die Fertigungsabweichungen ebenfalls bei weitem und zeigen zudem ihre höchsten Werte in den Verdrehungen außerhalb des Verbindungsbereichs, so daß das beschriebene Verfahren einer Angleichung der Fertigungsfehler durch bewußte Überlastung in den teilplastischen Bereich hinein für die Tragfähigkeit der Verbindung keine Nachteile hat. Die in /11/ durchgeführten Rechnungen und Experimente ergaben eine hervorragende Übereinstimmung, so daß man auch von einer zuverlässigen theoretischen Bestimmung dieses Vorgangs ausgehen kann.

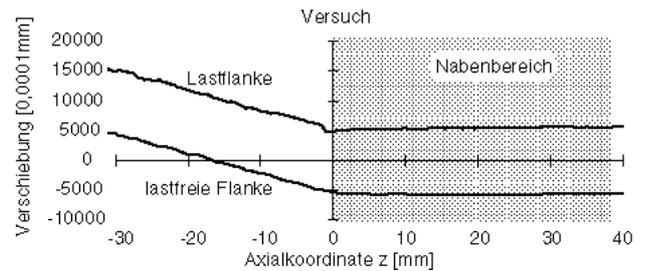


Bild 18: Zahnflankenverschiebungen nach Entlastung aus einem Verdrehversuch bis zur Zerstörung. Zahnwelle DIN 5480 - W 45x2x30x21 aus 25MoCr4, Drehmoment bei Zerstörung $T = 3900 \text{ Nm}$.

6 Zusammenfassung

Die beanspruchungsgerechte Gestaltung von Maschinenteilen unter extremen Leichtbaubedingungen bedeutet in vielen Fällen eine bewußte Ausnutzung des plastischen Verhaltens der Konstruktionswerkstoffe. Nur in seltenen Fällen kann der Konstrukteur dabei auf bestehende Speziallösungen zurückgreifen, bei denen eine zulässige teilplastische Verformung für sein spezielles Bauteil unter definierter Belastung angegeben ist. An einigen charakteristischen Bauteilen des Maschinenbaus werden Grenzbedingungen erläutert:

- Überschreiten der Beanspruchbarkeit durch teilplastische Verformung bis in den Bereich einer maximal möglichen plastischen Dehnung hinein. Die Bauteilverformungen spielen hierbei nur eine untergeordnete Rolle. Am Beispiel der Bolzen-Lasche-Verbindung wurden einfache zweidimensionale Beanspruchungszustände im Hinblick auf eine Empfindlichkeit gegenüber der Überschreitung der Elastizitätsgrenze betrachtet. Es sind Laststeigerungsraten um 50% bei Ausnutzung teilplastischer Verformungen zu erwarten.
- Aufhebung der Steifigkeit von Maschinenbauteilen und deren Verbindungen durch teilplastische Verformungen, im wesentlichen bei Kraftschlußverbindungen. Am Beispiel von Preßverbindungen mit konstruktiven Störungen wurde gezeigt, daß in einem weiten Bereich teilplastischer Verformungen das Verformungsverhalten der Maschinenteile und damit auch die Grundgleichungen der elastischen Spannungsverformung sich im teilplastischen Bereich nicht wesentlich ändern. Bei den gezeigten Fällen ist eine Erhöhung der Tragfähigkeit durch Ausnutzen des teilplastischen Verformungsbereichs um 50% durchaus möglich.

- Beherrschung der zum Teil erheblichen Verformungen im plastischen Bereich und deren Auswirkung auf die konstruktiven Randbedingungen der Konstruktion. Das Beispiel der mehrlagig bewickelten Seiltrommeln zeigt Belastungssteigerungen von mindestens 50% gegenüber dem elastischen Verformungsbereich durch die Verfestigung der Maschinenbauwerkstoffe insbesondere im Druckbereich. Der bewußte Einsatz von plastischen Verformungen zur Leistungssteigerung erfordert aber eine sorgfältige Berechnung der in der Maschinenstruktur herrschenden Verformungen und deren Grenzbedingungen.
- Im Bereich der Mehrfacheingriffe mit Kopplung von Verformung, Fertigungsabweichungen und Belastungen können teilplastische Verformungen zum Ausgleich und zur Verstetigung von Belastungen eingesetzt werden. Am Beispiel einer Zahnwellen-Verbindung wurde gezeigt, daß eine zum Ausgleich von Fertigungsabweichungen vorgenommene Vorverformung ("Trainieren") der Verbindung im Bereich der zulässigen Verformungen der meisten Maschinenbauwerkstoffe liegt und durch den o.a. Vorgang sich wesentliche Fertigungskosten einsparen lassen. Auch hier sind - abhängig von Lasteinleitung und Fertigungsabweichungen - Tragfähigkeitssteigerungen über 20% nicht ungewöhnlich.

Bei einer elastisch-plastischen Auslegung sind die kontinuumsmechanischen Grundlagen komplizierter als bei einer rein elastischen. Damit wachsen auch die zu überwindenden mathematischen Schwierigkeiten. Geschlossen lösbare Differentialgleichungen sind bisher nur für einfachste Geometrien (z.B. /2, 4/) möglich, die von /1/ und /3/ angestellten Überlegungen beziehen sich vorwiegend auf die Behandlung des Kerbproblems. Die heute verfügbaren FEM-Programme erlauben aber eine hinreichend zuverlässige Vorherbestimmung des teilplastischen oder plastischen Spannungs- und Verformungszustandes, so daß eine gezielte konstruktive Gestaltung von Maschinenstrukturen unter Ausnutzung des überelastischen Materialverhaltens zum Stand der Technik gehören könnte. Eine konstruktionssystematische Aufbereitung der bisherigen Erkenntnisse über charakteristische Kriterien und eine Weiterentwicklung der Vorgehensweisen anhand von Analogiebetrachtungen und Konstruktionsregeln könnte Gegenstand künftiger konstruktionmethodischer Forschung sein.

7 Literatur

- /1/ Sähn, S. und Göldner, H.: Bruch- und Beurteilungskriterien in der Festigkeitslehre. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1989
- /2/ Lippmann, H.: Mechanik des plastischen Fließens. Springer Verlag 1981
- /3/ Neuber, H.: Kerbspannungslehre. Theorie der Spannungskonzentration. Genaue Berechnung der Festigkeit. Springer Verlag 1985
- /4/ Kollmann, F.G.: Welle-Nabe-Verbindungen. Gestaltung, Berechnung, Auswahl. Springer Verlag 1984
- /5/ Önoz, E.: Die Auslegung elastisch-plastisch beanspruchter Querpreßverbände unter Berücksichtigung der Werkstoffverfestigung. Fortschr.Ber. VDI-Z., Reihe 1, Nr. 108 (1983)
- /6/ Rothe, F.: Spielbehaftete Laschenverbindungen bei quasistatischer Belastung unter der Berücksichtigung nichtlinearer Randbedingungen. Diss. TU Clausthal 1994
- /7/ Li, T.: Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit der geschwächten Welle-Nabe-Verbindung im elastischen und teilplastischen Bereich. Diss. TU Clausthal 1993
- /8/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln. Fortschrittsberichte VDI-Z, Reihe Fördertechnik, Nr. 12
- /9/ Mattheck, C.: Design in der Natur. Der Baum als Lehrmeister. Rombach GmbH+Co Verlagshaus KG, Freiburg im Breisgau, 1993
- /10/ Dietz, P.: Die Berechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen. Selbstverlag des Verfassers, Büttelborn 1978
- /11/ Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentbelasteter Zahnwellenverbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung. Diss. TU Clausthal 1996
- /12/ Villmer, F.-J.: Zum Mechanismus der Lastverteilung in Zahnwellenverbindungen. Diss. TU Clausthal 1984

Untersuchung der Kegelpreßverbindung einer Zerkleinerungsmaschine

Garzke, M.; Wuttke, S.

Maschinenelemente bilden einen Schwerpunkt der Forschungstätigkeit am Institut für Maschinenwesen. Neben grundlegenden Analysen zum Festigkeits-, Verschleiß- und Übertragungsverhalten dieser Bauteile werden auch spezielle und eingehendere Untersuchungen, z. B. für komplizierte Geometrie- und Lastsituationen oder überelastisches Werkstoffverhalten durchgeführt. Nachfolgend wird über einen Schadensfall an einem Kegelpreßverband im Antrieb einer Zerkleinerungsmaschine berichtet.

Machine elements are a special subject within the research activities of the Institute of Mechanical Engineering. In addition to basic analyses concerning fatigue and wear behaviour of these elements, several investigations with focus on complex geometry and load situation or elastic-plastic material behaviour are being carried out. This article describes the damage of a shrink fit in a shredder.

1 Einleitung und Problemstellung

Preßverbindungen gehören zu den reibschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen und können bei richtiger Dimensionierung und exakter Kenntnis

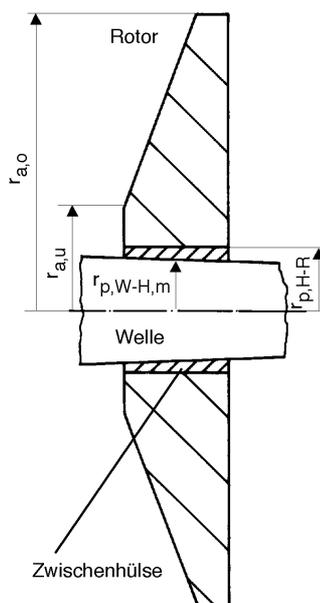


Bild 1: Kegelpreßverband mit Welle, Zwischenhülse und Rotor

der Rand- und Prozeßbedingungen hohen dynamischen Belastungen ausgesetzt werden /1/. Eine analytische Berechnung ist besonders einfach, wenn die zu fügenden Bauteile einen rotations-symmetrischen Querschnitt ohne Diskontinuitäten aufweisen. Zum Teil können heutige Berechnungsansätze einen gewissen Grad an Teilplastizität und verschiedene geometrische Schwächungen bei der Dimensionierung berücksichtigen /2/, jedoch ist die Berechnung insbesondere dann mit Unsicherheiten behaftet, wenn funktions- oder montagebedingt weitere Diskontinuitäten notwendig sind, z. B. Ölzuführungsbohrungen zur Montage der Verbindung oder eine von der Zylinderform abweichende Nabenaußengeometrie.

Unter diese Gesichtspunkte fällt auch die konstruktive Ausführung eines Kegelpreßverbandes, der aus einer Welle, einer extrem dünnen Zwischenhülse und einem aufgesetztem Rotor besteht (**Bild 1**).

Bei der Nutzung dieser Verbindung im Antriebsstrang einer Zerkleinerungsmaschine traten im Betrieb Kaltverschweißungen zwischen Rotor und Zwischenhülse auf. Beide Teile waren selbst durch hohe äußere Kräfte auf einer entsprechenden Vorrichtung nicht voneinander zu trennen, lediglich durch das axiale Aufbohren des Rotors in der Nähe der Paßfuge konnten beide Bauteile getrennt werden.

2 Beanspruchung von Preßverbindungen

Die Beanspruchungen, die sich nach dem Fügevorgang infolge des Übermaßes \bar{u} in einem Preßverband einstellen, sind schematisch in **Bild 2** zu sehen. An lastfreien Oberflächen werden die Radialspannungen der Bauteile zu Null, es herrscht dort ein einachsiger Spannungszustand.

2.1 Berechnung der zur Übertragung der äußeren Belastungen notwendigen Pressung

Die zur Übertragung des Drehmomentes und der Axialkraft erforderliche Pressung zwischen Rotor

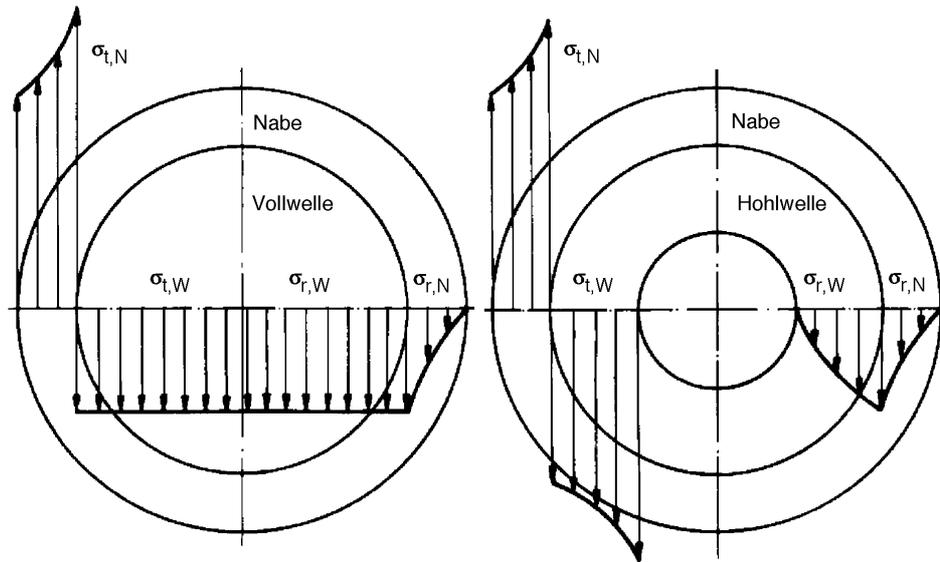


Bild 2: Verlauf der Radial- und Tangentialspannungen in Pressverbänden /3/; Indices: W - Welle, N - Nabe

und Zwischenhülse kann mit Gleichung (1) berechnet werden:

$$p_{\text{erf}} = \frac{s_r}{2 \cdot \pi \cdot r_p \cdot b \cdot \mu} \cdot \sqrt{(F_{ax})^2 + \left(\frac{T}{r_p}\right)^2} \quad (1)$$

Mit den geometrischen Daten und einer Rutschsicherheit $s_r = 1$ folgt $p_{\text{erf}} = 44,86 \text{ N/mm}^2$. Für die Rutschsicherheit wurde bewußt der untere Grenzwert gewählt, der deutlich zu gering ist.

2.2 Berechnung der minimalen Pressung zwischen Welle und Zwischenhülse

Die Berechnung der Pressung zwischen Welle und Außenteil ist Voraussetzung zur Ermittlung der sich nach dem Fügen der Bauteile einstellenden Radialspannung zwischen Hülse und Rotor. Mechanisch kann das Verhalten des Außenkörpers als ein unter Innendruck stehendes Rohr

$$\ddot{u} = p \cdot r_p \cdot \left[\frac{1}{E_W} \cdot \left(\frac{1+q_W}{1-q_W} - \nu_W \right) + \frac{1}{E_N} \cdot \left(\frac{1+q_N}{1-q_N} + \nu_N \right) \right] + \Delta s \quad (2)$$

$$\Delta s = 0,4 \cdot (R_{Z,W} + R_{Z,N}) \quad (3)$$

$$q_W = \left(\frac{r_i}{r_p} \right)^2 \quad (4)$$

$$q_N = \left(\frac{r_p}{r_a} \right)^2 \quad (5)$$

aufgefasst werden. Hülse und Rotor sind dabei als ein homogenes Gesamtbauteil anzusehen, da aus den Konstruktionsdaten hervorgeht, daß aufgrund der gewählten Übergangspassung zwischen Hülse und Rotor im ungünstigsten Fall ein Spiel auftreten kann. Deshalb wird bei den weiteren Untersuchungen ein Übermaß $\ddot{u}_{H-R} = 0 \text{ mm}$ zwischen Hülse und Rotor angesetzt („ein Bauteil“).

Durch Umstellen der Gleichung (2) nach p und Einsetzen des minimalen Übermaßes \ddot{u}_{min} (schlimmster Fall, untere Einsatzgrenze) entsprechend der gewählten Passung zwischen Welle und Hülse kann der Mindestpaßfugendruck zwischen Welle und Nabe berechnet werden /3/, /4/. Δs (Gleichung (3)) ist der Übermaßverlust infolge des Einebnens von Oberflächenrauigkeiten, q_W und q_N (Gleichungen (4) und (5)) sind dimensionslose Kennzahlen zur Beschreibung der Steifigkeit von Welle und Nabe. Aufgrund der besonderen Geometrien des Rotors (vgl. **Bild 1**) mit der

sich in Abhängigkeit von der Radialkoordinate ändernden Rotorbreite werden die Berechnungen mit einem geringen Radius $r_{a,u} = 1,77 \cdot r_{p,H-R}$ und mit einem großen Radius $r_{a,o} = 5,13 \cdot r_{p,H-R}$ durchgeführt. Ein den Beanspruchungen äquivalenter Rotoraußendurchmesser würde zwischen diesen beiden Grenzwerten liegen.

Durch Umstellen der Gleichung (2) folgt:

$$p_{\min} = 83,7 \text{ N/mm}^2 \text{ (dünnwandige Nabe),}$$

$$p_{\max} = 108,6 \text{ N/mm}^2 \text{ (dickwandige Nabe).}$$

2.3 Berechnung der Pressung zwischen Hülse und Rotor

Aufbauend auf den Ergebnissen aus Kapitel 2.2 kann mit Gleichung (6) /1/ die sich in der Trennfuge zwischen Hülse und Rotor infolge des axialen Aufschiebens auf den kegelförmigen Teil der Welle einstellende Radialspannung berechnet werden:

$$\sigma_r(r) = \frac{1}{1-q} \cdot \left[\sigma_r^a - q \cdot \sigma_r^i + (\sigma_r^i - \sigma_r^a) \cdot \left(\frac{r_i}{r} \right)^2 \right] \quad (6)$$

Ein anschließender Vergleich mit dem in Kapitel 2.1 berechneten erforderlichen Paßfugendruck zwischen Rotor und Hülse kann eine Aussage über die Übertragbarkeit der äußeren Belastungen durch den Kegelpreßverband gemacht werden.

Mit

$$\sigma_r^a = 0 \text{ (lastfreie Oberfläche am Außendurchmesser des Rotors)}$$

$$\sigma_r^i = p_{\min} = 83,7 \text{ N/mm}^2 \text{ (dünnwandige Nabe) bzw.}$$

$$\sigma_r^i = p_{\min} = 108,6 \text{ N/mm}^2 \text{ (dickwandige Nabe)}$$

$$r_i = r_{p,W-H,m} = 0,9 \cdot r_{p,H-R} \text{ (Paßfugradius zwischen Welle und Hülse)}$$

$$r = r_{p,H-R} \text{ (Paßfugradius zwischen Hülse und Rotor)}$$

folgt aus Gleichung (6):

$$\sigma_r(r_{p,H-R}) = p = 62,85 \text{ N/mm}^2 \text{ (dünnwandige Nabe),}$$

$$\sigma_r(r_{p,H-R}) = p = 87,92 \text{ N/mm}^2 \text{ (dickwandige Nabe).}$$

Mit den Ergebnissen der Kapitel 2.1 und 2.3 lassen sich über Gleichung (7) die Sicherheiten v_{T+F} für die Übertragbarkeit des Drehmomentes T und der Axialkraft F_{ax} berechnen:

$$v_{T+F_{ax}} = \frac{p(r_{p,H-R})}{p_{erf}} \quad (7)$$

Demnach ergibt sich für die

dünnwandige Nabe: $v_{T+F} = 1,4$ bzw. für die

dickwandige Nabe: $v_{T+F} = 1,96$.

Die Radialspannung in der Preßfuge $p(r_{p,H-R})$ und die Übertragungssicherheiten des ausgeführten Kegelpreßverbandes werden zwischen den berechneten Werten liegen, sind aber zu gering, da folgende Einflüsse in den analytischen Berechnungen nicht berücksichtigt werden konnten, die jedoch entscheidend die Übertragungsfähigkeit beeinflussen:

- Bei einer Drehzahl $n > 1700 \text{ min}^{-1}$ und der ausgeführten Rotorkonstruktion (großer Außenradius $r_{a,o} = 5,13 \cdot r_{p,H-R}$, hohe Masse) kann der Einfluß der pressungsreduzierenden Fliehkraftwirkung auf keinen Fall vernachlässigt werden.
- Die in Kapitel 2.2 berücksichtigten Elastizitätsmoduln für Welle und Nabe gelten für eine Temperatur $\vartheta = 20^\circ\text{C}$, die Prozeßtemperaturen beim Einsatz der Kegelpreßverbindung liegen jedoch über 160°C . Entsprechend der gängigen Fachliteratur und den Veröffentlichungen der Stahlhersteller sind deshalb deutlich reduzierte Elastizitätsmoduln der Bauteile anzunehmen. Dadurch verringert sich die minimale Flächenpressung p_{\min} zwischen Welle und Hülse, die wiederum verringerte Radialspannungen in der Trennfuge zwischen Hülse und Rotor hervorruft.

Treten zusätzlich noch erhöhte Belastungen auf, die aus einem unsachgemäßen und nicht dem Verwendungszweck entsprechenden Betrieb der Zerkleinerungsmaschine herrühren, muß die Summe dieser Randbedingungen als Grund für die zu den Kaltverschweißungen führenden Relativbewegungen zwischen Rotor und Hülse angesehen werden.

3 Simulation des Fügevorgangs und der Fliehkraftbelastung mit der Methode der Finiten Elemente (FEM)

Zur Untermauerung der in Kapitel 2 ermittelten Ergebnisse wurde eine FEM-Berechnung des Fügevorgangs (Aufschieben der mit Übermaß $\ddot{u}_{H-R} = 0 \text{ mm}$ gefügten Bauteile Hülse und Rotor auf den kegelförmigen Teil der Welle) mit an-

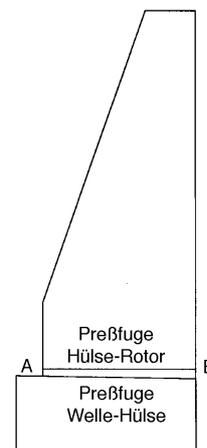


Bild 3: Preßfugen am Kegelpreßverband

schließender Fliehkraftbelastung $n > 1700 \text{ min}^{-1}$ durchgeführt. Ausgewertet wurde sowohl die Pressung in der Trennfuge Welle - Hülse (**Bild 4**) als auch in der Trennfuge Hülse - Rotor (**Bild 5**), die Auswerterichtung ist in **Bild 3** zu sehen.

Im Bereich der normierten Pressfugenposition zwischen ca. 0,2 - 0,8 ist die Flächenpressung nahezu konstant und stimmt sehr gut mit den in Kapitel 2 berechneten Werten überein (**Tabelle 1**). Durch die Fliehkraftbelastung wird die Flächenpressung in den einzelnen Fugen verringert. Durch die ungleiche Massenverteilung entlang der Verbindungsachse greift die durch die Drehbewegung hervorgerufene Fliehkraft nicht in der Mitte der Preßverbindung an, sondern ist ein Stück in Richtung Punkt B verschoben (**Bild 3**). Daraus resultiert ein Moment um den Punkt A, wodurch die Pressung im Bereich des größten Rotordurchmessers stärker verringert wird als im übrigen Preßfugenbereich (**Bild 4** und **Bild 5**).

Preßfuge	mittlere Pressung [N/mm ²] nach dem Fügevorgang	mittlere Pressung [N/mm ²] Fügevorgang + Fliehkraft
Welle-Hülse	100 - 105	70 - 75
Hülse-Rotor	85 - 95	55 - 60

Tabelle 1: mittlere Flächenpressungen in den Trennfugen Welle - Hülse und Hülse - Rotor

Die durch die Fliehkraftwirkung hervorgerufene Pressungsreduzierung in den Fugen (ca. 30 - 50% gegenüber dem Fügezustand) hat zur Folge, daß die Drehmoment- und Axialkraftübertragung bei zu geringen Flächenpressungen nicht mehr mit ausreichender Sicherheit erfolgt. Im Zusammenhang mit den unbekanntem Werkstoffkennwerten für den Einsatz der Kegelpreßverbindung bei ca. 170°C konnte mit dem unzureichenden Übermaß \ddot{u}_{H-R} zwischen Hülse und Rotor die Ursache für die zu den aufgetretenen Kaltverschweißungen führenden Relativbewegungen aufgezeigt werden.

Der Übergang auf eine eindeutige Preßpassung zwischen Hülse und Rotor ist unumgänglich, die konstruktive Überarbeitung der ausgeführten Konstruktion wurde angeraten.

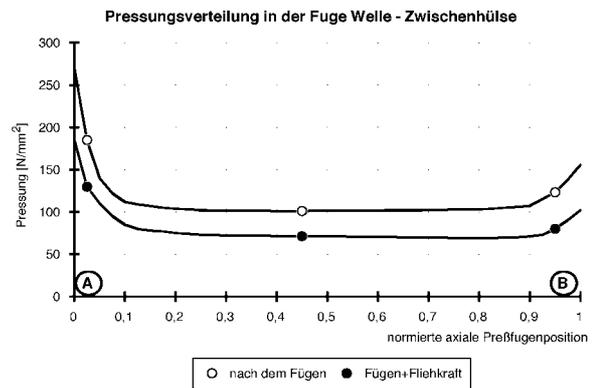


Bild 4: Pressungsverteilung in der Preßfuge Welle - Zwischenhülse

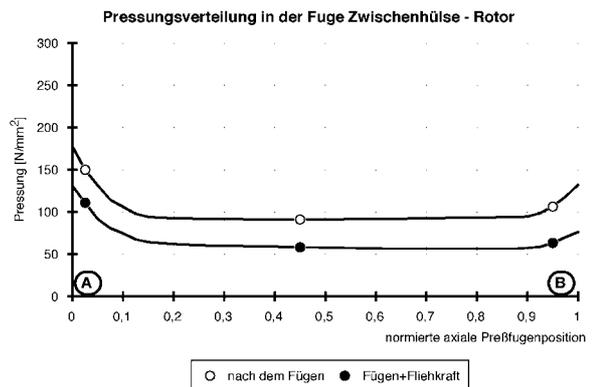


Bild 5: Pressungsverteilung in der Preßfuge Zwischenhülse - Rotor

4 Literatur

- /1/ Kollmann, F.: Welle-Nabe-Verbindungen, Springer-Verlag Berlin, 1984
- /2/ Tan, L.: Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit der geschwächten Welle-Nabe-Preßverbindungen im elastischen und teilplastischen Bereich, Diss. TU Clausthal, 1993
- /3/ Dietz, P.: Vorlesungsumdruck „Konstruktionselemente I-III“, Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, Clausthal 1996
- /4/ DIN 7190: Preßverbände, Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln, Beuth-Verlag, Berlin, Juli 1988

Qualitätssicherung an Zahnwellen-Verbindungen

Birkholz, H.

Weltweit existieren für Zahnwellen-Verbindungen die unterschiedlichsten Normen, die alle unterschiedliche Meßverfahren beinhalten. Zur Beurteilung der Paarbarkeit und Qualität einer Zahnwellen-Verbindung sind verschiedene Meßmethoden zulässig. Diese werden gleichrangig nebeneinander behandelt, daher ist eine einheitliche qualitative Beurteilung einer Zahnwellen-Verbindung nicht gewährleistet. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) sollen optimierte Meßstrategien für Zahnwellen-Verbindungen erarbeitet werden, die eine sachgerechte Toleranzauswahl berücksichtigt.

To estimate spline shafts there are worldwide different standards, containing different types of measuring methods. These methods are considered to be of equal priority, so it is impossible to estimate the quality of spline shafts homogenously. In a research work supported by the Deutsche Forschungsgesellschaft, an improvement of measuring methods shall be worked out.

1 Stand der Technik

Zahnwellen-Verbindungen sind lösbare Verbindungselemente für die Übertragung von Drehmomenten /1,2/. Eine derartige Verbindung besteht aus einer Innenverzahnung sowie einer in diese gefügten Außenverzahnung. Die Übertragung des Drehmomentes erfolgt über die Zahnflanken der Zähne, diese Zahnflanken sind in den meisten Fällen als Evolventen ausgebildet.

Aus den Hauptforderungen, der sicheren Übertragung des Drehmomentes und der Gewährleistung eines eventuell erforderlichen Spiels ergeben sich die Problemstellungen bei der Auslegung bzw. Tolerierung von Zahnwellen-Verbindungen:

- die Paarbarkeit der Verbindung inklusive eines definierten Spiels sowie
- die Qualität der Verbindung im Betrieb, d.h. eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Belastungen auf alle Zahnflanken.

Aus diesem Grund werden für die Paarung von Innen- und Außenverzahnung Abmaße vom spielfreien Zustand festgelegt, wie in **Bild 1** dargestellt.

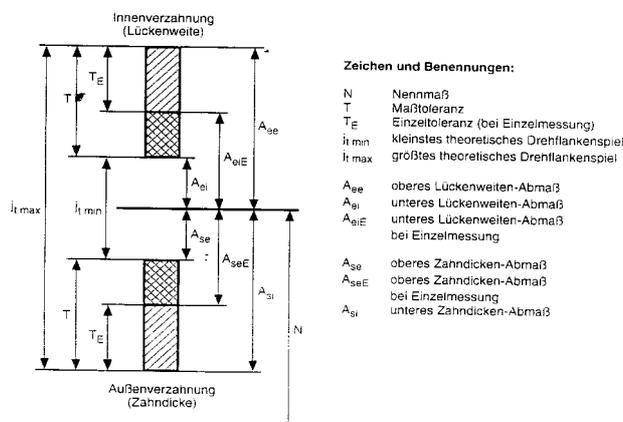


Bild 1: Passungen an Zahnwellen-Verbindungen (nach DIN 5480/14)

Toleriert werden sowohl die Zahndicke der Außenverzahnung als auch die Lückenweite der Innenverzahnung. Das erforderliche Abmaß hängt dabei vom mindestens erforderlichen Flankenspiel und den spielvermindernden Einflüssen der Verzahnungsabweichungen ab. Das maximal zulässige Abmaß ergibt sich aus dem maximal zulässigen Flankenspiel sowie den erreichbaren Fertigungstoleranzen beim Verzahnen.

Für das Spiel einer Zahnwellen-Verbindung ist nicht nur das Istmaß der Zahndicke bzw. der Lückenweite von Bedeutung, auch die auftretenden Verzahnungsabweichungen /3/ – vor allem Teilungsabweichungen, Flankenabweichungen und Rundlaufabweichungen beeinflussen das Spiel. Bei der Passung von Zahnwellen-Verbindungen ist der Einfluß der Verzahnungsabweichungen auf die Paarungseigenschaften wesentlich größer als der Einfluß des Istmaßes.

Aus diesen Gründen muß eine Prüfung bzw. Passungskontrolle nach dem Taylorschen Grundsatz erfolgen /4/. Dabei ist die Ausschußseite als Istmaß (auch *actual*) der Zahndicke bzw. Zahnweite im Teilkreisbogen, die Gutseite als Paarungsmaß (auch *effective*) zu prüfen. Das Paarungsmaß ist dabei die Zahndicke bzw. Zahnweite einer formidealen Gegenverzahnung (Hüllverzahnung), mit der die zu prüfende Verzahnung gerade noch zu paaren ist. **Bild 2** zeigt die Zusammenhänge am Beispiel eines einzelnen Zahnes einer Außenverzahnung.

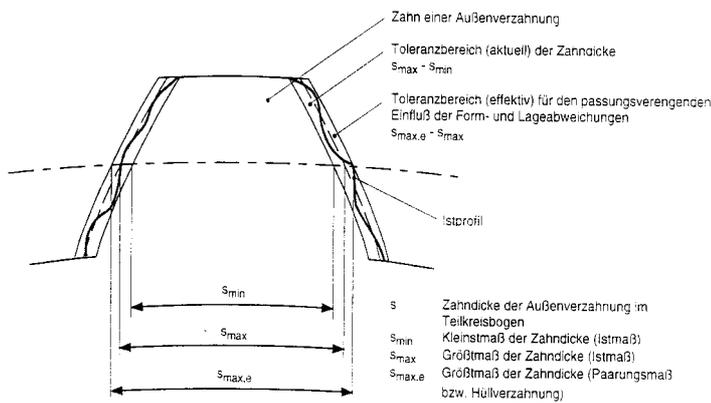


Bild 2: Toleranzproblematik an Zahnwellen-Verbindungen

1.1 Normen und Prüfmethoden

Für die technische Beherrschung von Passungen verschiedenster Maschinenelemente wurden und werden national und international verschiedene Normen erarbeitet. Eine bekannte Norm ist z.B. die ISO 286 zur Paarung von Welle und Bohrung. Auch zum Thema Zahnwellen-Verbindungen existieren viele nationale und internationale Normen, für Deutschland beispielsweise die DIN 5461 bis DIN 5465 zu Keilwellen-Verbindungen, für Großbritannien die BS 3550 (Specification for involute splines) oder für Japan die JIS D 2001 (Involute spline for Automobiles).

Diese und andere Normen betreffend Zahnwellen-Verbindungen beinhalten verschiedenste Prüfmethoden. Für die Messung der Zahndicken / Zahn-lücken (Istmaß/actual) umfassen die genormten Prüfverfahren sektorverzahnte Ausschußlehren, Maß über/zwischen Rollen, konische, sektorverzahnte Ausschußlehren sowie die Zahnweitenmessung, nichtgenormte Meßverfahren sind das Maß über/zwischen Kugeln statisch und dynamisch, sektorverzahnte Verdrehflankenspiel-Meßgeräte oder die Abrollprüfung mit Kugelrädern. Für die effektive Hüllverzahnung (Paarungsmaß/effective) kommen genormt vollverzahnte Gut- und Ausschußlehren sowie vollverzahnte konische Gutleh-dorne zum Einsatz, während vollverzahnte Verdrehflankenspiel-Meßgeräte und Rechenalgorithmen aus Istmaß- und Einzelabweichungen nicht genormte Prüfverfahren darstellen.

Für die Ermittlung von Form- und Lageabweichungen existieren keine genormten Meßverfahren, nicht genormte Verfahren sind die Bestimmung mit Kugeln und Rollen oder die Bestimmung mit Rechenalgorithmen.

1.2 Ziel der Untersuchungen

Es sollen Anforderungen an eine „ideale“ bzw. optimierte Prüfstrategie für Zahnwellen-Verbindungen erarbeitet werden. Dazu ist es nötig, die Behandlung von Aspekten der Qualitätssicherung in der Literatur in Bezug auf den gegenwärtigen Stand der Technik kritisch zu untersuchen. Die Untersuchungen sollen Unklarheiten sowie Schwierigkeiten bei der Anwendung der vorhandenen Normen zur Prüfung von Zahnwellen-Verbindungen offenlegen. Die einzelnen Meßverfahren müssen

untersucht und hinsichtlich der Aussagekraft der Meßergebnisse bewertet werden. Gleichzeitig müssen theoretische Ursachen für Meßwertunterschiede herausgearbeitet und kenntlich gemacht werden.

Es werden weiterhin die geeigneten Prüfverfahren an seriennahen Prüflingen sowie Prüflingen mit gezielt hergestellten Verzahnungsabweichungen angewendet und verglichen. Dazu sollen Meßreihen mit verschiedenen Meßgeräten durchgeführt werden. Als Referenz dient die vollständige Vermessung der Prüflinge mit der Koordinatenmeßmaschine.

Zusätzlich werden die Prüflinge einer Verdrehspielmessung unterzogen. Ebenfalls zur Anwendung kommen rechnergestützte Modellierungs- und Simulationstechniken zum Paarungs- und Zentrierverhalten.

Mittels der gewonnenen Erkenntnisse soll es ermöglicht werden, die Anwendung einzelner Prüfmethoden zu beschreiben und Prüfeempfehlungen zu erarbeiten.

1.3 Literatur

- /1/ W. Beitz; K.-H. Küttner (Hrsg.): *Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau*; 18. Aufl. Berlin; Springer Verlag, 1995
- /2/ K.-H. Decker: *Maschinenelemente – Gestaltung und Berechnung*; 8. Aufl. München; Carl Hanser Verlag, 1982
- /3/ H. Huber: *Untersuchungen über die Zentrierkräfte flankenzentrierter Zahnwellen-Verbindungen*; Mannheim; John Deere Werke; Februar 1965
- /4/ H. Winter; A. Seifried: *Der Taylorsche Grundsatz – ein Beitrag zur Theorie des Prüfens mechanisch gefertigter Werkstücke*; TZ für praktische Metallbearbeitung Bd. 59 (1965) Nr 7., S 419-425

Verschleiß und Lebensdauer von Zahnwellen-Verbindungen

Schäfer, G.:

Gestaltfestigkeit, Verschleiß und Lebensdauer als gleichwertige Dimensionierungsgrundlagen. Ein dazu entwickelter spezieller Ansatz zur Lebensdauerberechnung von Zahnwellenverbindungen.

Fatigue, friction wear and lifetime as equivalent calculation bases. A special calculation method for lifetime determination of involutesplines.

1 Prinzipielles Verschleißverhalten

Der Verschleiß und die sich daraus ergebende Lebensdauer sind neben der klassischen Gestaltfestigkeitsbetrachtung die Dimensionierungsgrenzen für Zahn- und Keilwellen-Verbindungen. Das IMW führte und führt zu diesem Thema umfangreiche Prüfstandsuntersuchungen durch, die von entsprechenden theoretischen Überlegungen flankiert werden. Der folgende Artikel stellt einen kleinen Ausschnitt dieser Arbeiten dar.

Als Einführung für die theoretischen Untersuchungen sollen zunächst die drei Verschleißbereiche, **Bild 1**, erläutert werden.

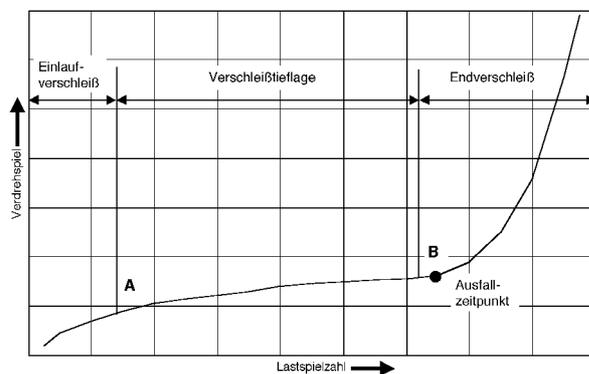


Bild 1: Prinzipieller Verschleißverlauf /1/

Der Einlaufverschleiß stellt die erste Verschleißphase dar, sie reicht vom Laufzeitbeginn bis 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 lastvergleichmäßig aus. Die notwendigen plastischen Verformungen sind nach /2/ 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 Ausgleichsvorgang 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 Spannungspitzen durch Fließ- und Abrasionsvorgänge abgebaut. Im klassischen Sinn handelt es sich bei der Einebnung von Oberflächenrauigkeiten nicht um Verschleiß. 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 Verbindungsändern zu einer Lastüberhöhung, allgemein als Kantenträgen bekannt. Diese Lastüberhöhung führt lokal zu erhöhtem Verschleiß und in dessen Folge zu ebenso lokal begrenztem Absinken der Belastung. In **Bild 2** ist dieser Vorgang qualitativ dargestellt. Die integrale Belastung der Flanke bleibt dabei konstant, es findet lediglich

eine Vergleichmäßigung über der Verbindungsbreite statt.

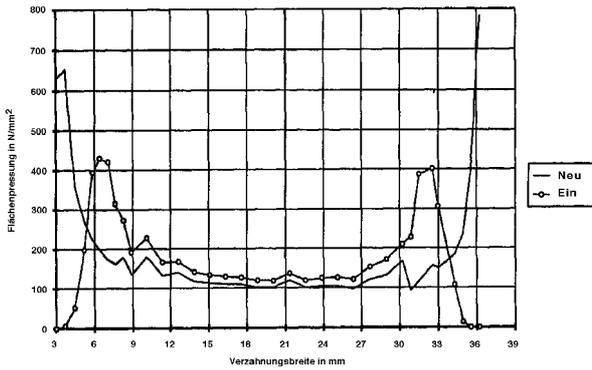


Bild 2: Flächenpressungsverteilung über der Verzahnungsbreite im Neuzustand und nach dem Einlauf /1/

Diese drei Vorgänge innerhalb der Einlaufverschleißphase sind in **Bild 3** gut zu erkennen. Auffällig ist der fast kontaktlose Bereich etwas exzentrisch von der Verzahnungsmittle. 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 Verbindungsändern hin noch zunehmen und dort ihr charakteristisch stumpfes Aussehen haben.



Bild 3: Flankenoberfläche in der Einlaufverschleißphase /1/

Genauere Untersuchungen dieser stumpfen Bereiche über der Laufzeit ergaben in Übereinstimmung mit /3/, daß unabhängig von der Ausgangsrauhtiefe eine Grenzrauhtiefe erreicht wird. Die dabei entstehenden Oberflächennarben, **Bild 4**, sind Flach und weisen keine scharfen Kerben auf, ihre Kerbwirkung ist daher zu vernachlässigen.

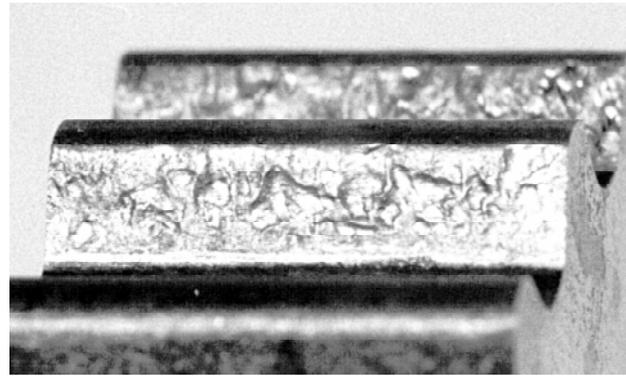


Bild 4: Flankenoberfläche in der Endverschleißphase /1/

Ähnlich wie bei der Untersuchung der Flankenpassungen durch Zapf /4/ ist für das Reibkorrosionsverhalten auch die Ausgangsrauhtiefe der Flankenoberflächen unbedeutend. Durch die sich einstellende einheitliche Grenzrauhtiefe konnten von /3/ in **Bild 5** keine Unterschiede in den erreichten Reibdauerhaltbarkeiten für die beiden Ausgangsrauhtiefen $R_t = 5 \mu\text{m}$ und $R_t = (23 \pm 2) \mu\text{m}$ festgestellt werden.

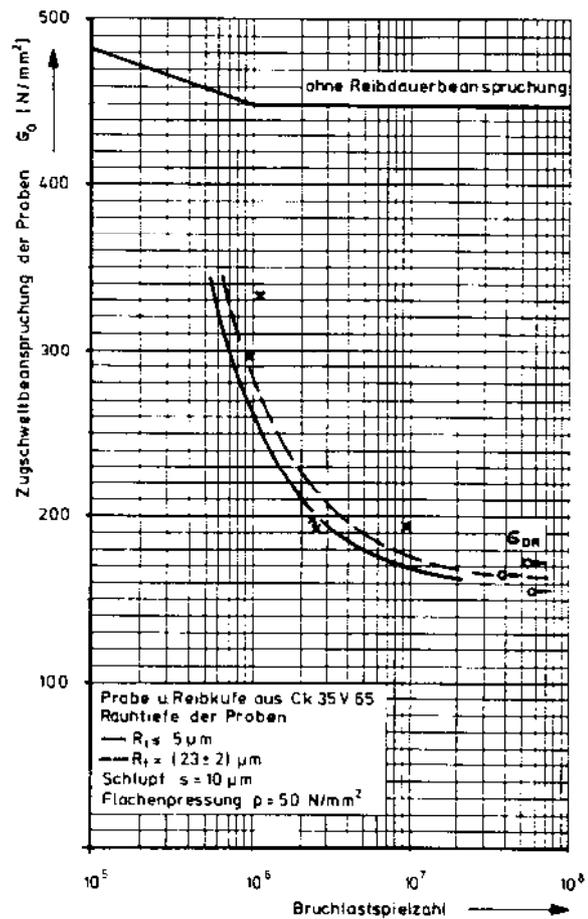


Bild 5: Rauhtiefeneinfluß auf die Reibdauerhaltbarkeit /3/

Als Ergebnis dieser Betrachtungen kann festgestellt werden, daß die wirtschaftlicher zu produzierenden Zahnwellen-Verbindungen mit größeren Spielpassungen und Oberflächenrauigkeiten durchaus nicht die technisch minderwertigeren Verbindungen sind. 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. Eine Tragfähigkeitsberechnung findet aus diesen Gründen für diese erste Lebensphase der Zahnwellen-Verbindung nicht statt. Dennoch ist die Kenntnis der darin ablaufenden Vorgänge sehr bedeutsam für die Berechnung der Flankenlasten und Flächenpressungen in der anschließenden Verschleißtieflage.

Die Verschleißtieflage (vergl. **Bild 1**) 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, **Bild 6**.

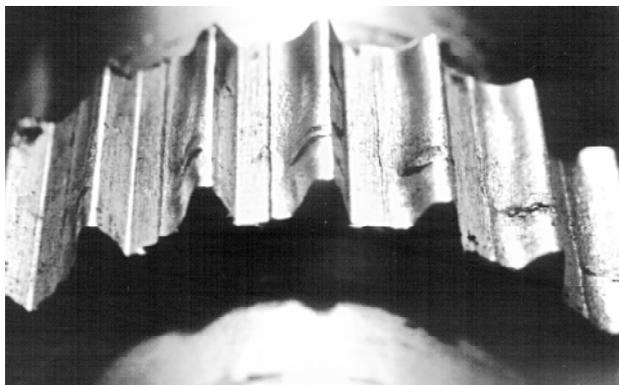


Bild 6: Durch überwiegende Drehmomentbelastung verschlissene Zahnwelle /1/

Bei axial bewegten Verbindungen ist der Verschleiß auch konstant, liegt aber höher und hat einen geringeren Reibrostanteil. Reibkorrosionsvorgänge sind nach /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 Lebensdauerab-

schätzung anhand des abgetragenen Verschleißvolumens /4/. Die rechnerische Auslegung einer Zahnwellen-Verbindung erfolgt daher bis zum Ende der Verschleißtieflage sinnvollerweise durch einen Tragfähigkeitsnachweis nach DIN 5466 in Kombination mit der darin beschriebenen Lebensdauerabschätzung nach dem Verschleißvolumen.

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 Ermüdungsverschleiß. **Bild 7** aus /1/ zeigt einen Schliff senkrecht zur Flankenoberfläche, in dem ein Ermüdungsanriß zu erkennen ist.

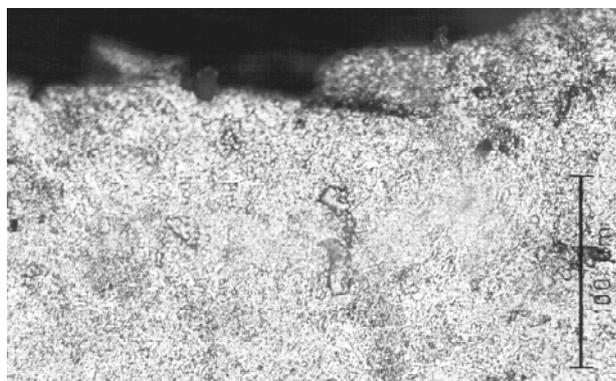


Bild 7: Schliffbild mit Anriß einer Zahnflanke /1/

Nach wenigen weiteren Umdrehungen kommt es an solchen Stellen zum Ausbrechen größerer Flankenpartikel. Neben dem Ermüdungsverschleiß tritt abhängig vom ideellen Radius zusätzlich Adhäsions- und Abrasionsverschleiß auf. Das Zusammenwirken dieser Verschleißmechanismen führt zu sehr großen Verschleißbeträgen pro Umdrehung. Rechnerisch ist dieses Zusammenwirken nur näherungsweise erfaßbar und dabei mit sehr großem Aufwand für die Parameterbestimmung verbunden. 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 in **Bild 1** 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. Die notwendigen Be-

rechnungsgrundlagen dazu, werden nachfolgend erarbeitet.

2 Spannungszustand in der Flanke

Ausgehend von **Bild 7** sollen in diesem Kapitel die mechanischen Hintergründe des beobachteten Flankenrisses kurz erläutert werden.

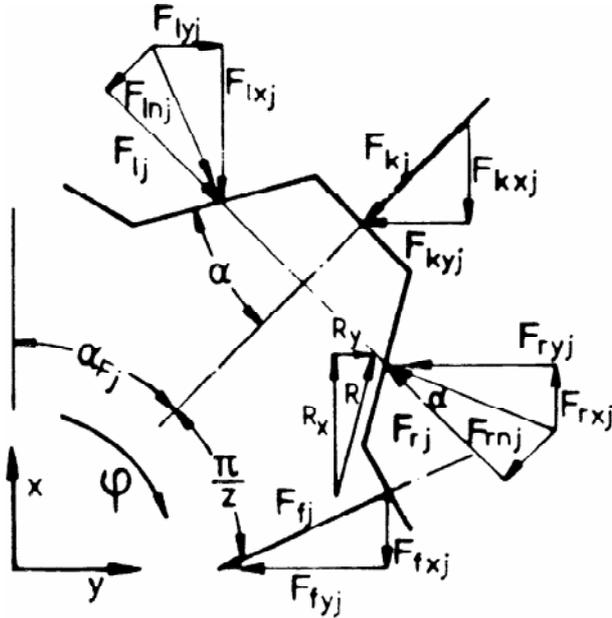


Bild 8: Zahnkraftkomponenten mit Reibung allgemein /4/

Allgemein können die in **Bild 8** in Komponenten dargestellten Zahnkräfte an den Zähnen einer reibungsbehafteten Zahnwellen-Verbindung wirken. Bei der für diese Untersuchungen betrachteten flankenzentrierten 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 Verbindungen mit Schiebesitz, d.h. mittleres Verdrehflankenspiel $j_{tm} > 0$, bei überwiegender Drehmomentbeanspruchung nur noch an der der Drehmomentenrichtung zugeordneten Flanke Zahnkräfte F_r auf. Im Realfall mit Reibung zwischen den Wellen- und Nabenflanken treten die über den Reibungskoeffizienten zugeordneten Reibungskräfte R an den drehmomentbelasteten Flanken auf. Die allgemeine Darstellung der Zahnkräfte, **Bild 8**, kann damit für die folgenden Betrachtungen auf die spezielle Form in **Bild 9** reduziert werden.

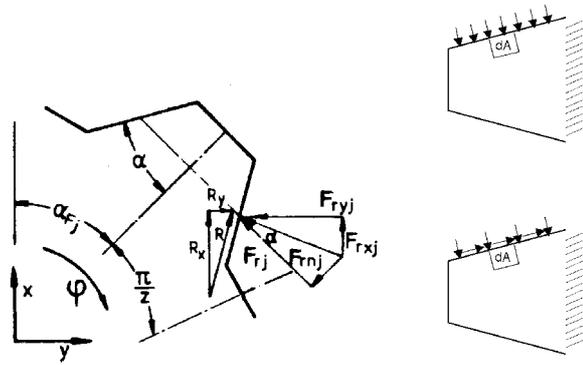


Bild 9: Zahnkraftkomponenten mit Reibung für flankenzentrierte Zahnwellen-Verbindungen unter Drehmomentbelastung

In Bezug auf den Flankenriss aus **Bild 7**, der direkt in der Flankenoberfläche liegt, soll ausgehend von den Flankennormal- und Reibbeanspruchungen der Spannungszustand in dem Flankenoberflächenelement dA , **Bild 9**, untersucht werden. Der in **Bild 7** vorliegende Prüfkörper wurde aus einer Verbindung entnommen, die ohne Axialbewegung gelaufen ist. Entsprechend wird ein ebener Spannungszustand in dem Flächenelement dA vorausgesetzt.

- Im ersten Schritt wird eine reine Flankennormalbeanspruchung angenommen, d.h. es treten keine Reibungskräfte an den Flanken auf, **Bild 9** 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.

In **Bild 10** ist das Element dA aus der Flanke herausgelöst und mit den entsprechenden Schnittreaktionen dargestellt.

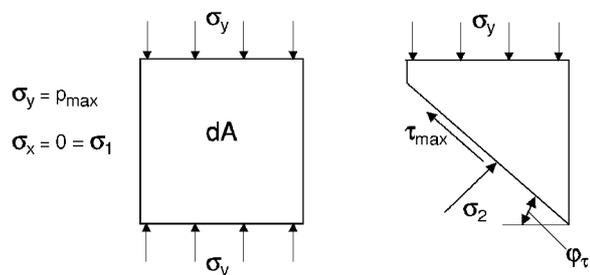


Bild 10: Schnittreaktionen am Flächenelement ohne Reibung

Durch die reine Flankennormalbeanspruchung treten ausschließlich Druckspannungen σ_y senkrecht zur Flankenoberfläche auf. Sie sind in der Größe

durch die maximale Flankenpressung festgelegt, $\sigma_y = p_{max}$. Voraussetzungsgemäß sind keine Reibkräfte vorhanden, sodaß weder an der Flankenoberfläche Schubspannungen noch an den übrigen Elementkanten zugeordnete Schubspannungen auftreten, $\tau_{yx} = \tau_{xy} = 0$.

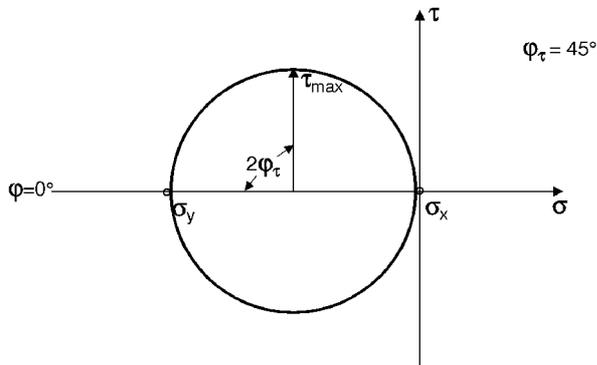


Bild 11: Mohr'scher Spannungskreis ohne Reibung

Der entsprechende Mohr'sche Spannungskreis ist in **Bild 11** dargestellt. Die maximale Schubspannung tritt unter einem Winkel von $\varphi_\tau = 45^\circ$ zur Flankenoberfläche auf. Dieser Winkel stellt den oberen Grenzwert für den schubspannungsfreien Fall dar. In **Bild 7** wird dieser Wert nicht erreicht, dies ist auf die von der idealen Verbindung abweichenden Bedingungen zurückzuführen.

- Im zweiten Schritt wird zur Erfassung dieser realen Bedingungen zusätzlich eine Flankenreibungskraft eingeführt, **Bild 9** unten. Unter den oben gemachten Voraussetzungen ohne Axialbewegung kann auch hier von einem ebenen Spannungszustand ausgegangen werden.

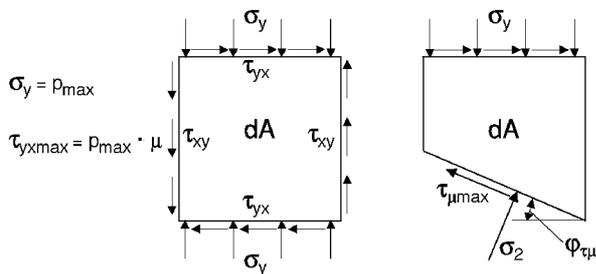


Bild 12: Schnittreaktionen am Flächenelement mit Reibung

Das Flächenelement dA , **Bild 12**, ist wiederum durch die Druckspannung $\sigma_y = p_{max}$ belastet. Zusätzlich tritt im Reibungsfall an der Flankenoberfläche die Schubspannung τ_{yx} auf, der über die Gleichgewichtsbedingungen am Flächenelement dA die Schubspannungen τ_{xy} und τ_{yx} an den übrigen drei Kanten zugeordnet sind. Die Schubspan-

nung τ_{yx} kann über die vorliegende Flächenpressung p_{max} und den Reibungskoeffizienten μ bestimmt werden, gemäß $\tau_{yxmax} = p_{max} \cdot \mu$. Diese Formel ist für die Betriebszustände I und II gültig. Im Betriebszustand III, $R_1 > R_{igrenz}$, 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 $\tau_{yxgrenz}$ ist im Betriebsbereich III durch die Querkraft Q begrenzt, gemäß:

$$\tau_{yxgrenz} = Q/A$$

Damit gilt für die am Flächenelement dA angreifende Schubspannung τ_{yx}

$$0 < \tau_{yx} \cdot \tau_{yxmax} = p_{max} \cdot \mu$$

mit der zusätzlichen theoretischen Begrenzung im Betriebsbereich III

$$\tau_{yx} \cdot \tau_{yxgrenz} = Q/A$$

In **Bild 13** ist ein entsprechender Mohr'scher Spannungskreis mit $\tau_{yx} \neq 0$ dargestellt. Die maximale Schubspannung tritt hier unter einem Winkel $0 < \varphi_{\tau\mu} < 45^\circ$, abhängig von der Oberflächen-Schubspannung, auf. Je größer die Oberflächen-Schubspannung ist, desto kleiner wird der Winkel $\varphi_{\tau\mu}$, d.h. desto flacher verläuft der Riß in der Flankenoberfläche.

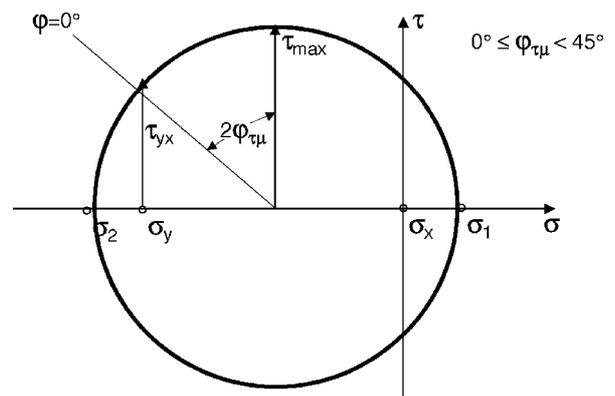


Bild 13: Mohr'scher Spannungskreis mit Reibung

Die theoretische Begrenzung der Schubspannung im Betriebsbereich III

$$\tau_{yx} \cdot \tau_{yxgrenz} = Q/A$$

geht von einer explizit von Außen an der Zahnwellen-Verbindung angreifenden Querkraft aus. Eine solche Querkraft ist unabhängig von dem zu übertragenden Drehmoment. Die real vorliegenden Ein-

satzfälle weichen von diesem theoretischen Fall speziell bei flankenzentrierten Zahnwellen-Verbindungen ab. Abhängig von der Höhe der Drehmomentbelastung wirkt die Flankenzentrierung zwischen Außen- und Innenverzahnung. Mit steigendem Drehmoment gleichen sich die beiden Verzahnungsachsen an. Problematisch sind in diesem Zusammenhang die Fluchtungsabweichungen der Achsen der beiden zu verbindenden Bauteile sowie die Abweichungen zwischen den Bauteilachsen und den zugehörigen Verzahnungsachsen. Mit steigendem Drehmoment erzwingen diese geometrischen Abweichungen größer werdende Rückstellquerkräfte in flankenzentrierten Verbindungen, d.h. die Querkräfte sind in den meisten realen Fällen abhängig von der Drehmomentbelastung. Als Fazit dieser Betrachtungen kann für technische Berechnungen die Empfehlung gegeben werden, die Begrenzung im Betriebsbereich III $\tau_{yx\text{grenz}}=Q/A$ zu vernachlässigen. Damit kann die Schubspannung für Dimensionierungen und Festigkeitsnachweise in allen drei Betriebsbereichen berechnet werden:

$$0 < \tau_{yx} \leq \tau_{yx\text{max}} = p_{\text{max}} \cdot \mu$$

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. /3/, dessen Reibkorrosionsuntersuchungen dem Flankenkontakt bei Zahnwellen-Verbindungen sehr ähnlich sind, hat 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. Die dicke PTFE-Folie führte über ihren geringen Reibungskoeffizienten in Verbindung mit ihrer lastausgleichenden Funktion zu den geringsten Schubbeanspruchungen und der höchsten Lebensdauer.

3 Belastungsermittlung

Für die Berechnung der Belastungen, die in den drei Betriebsbereichen auftreten, wurden in DIN 5466 grundlegende Berechnungsmethoden angegeben. Mit Hilfe dieser Formeln kann die maximale Flankenkraft und -pressung berechnet werden, unter Berücksichtigung der Belastungskombination

aus Drehmoment und Querkraft, sowie der Verzahnungsabweichungen und der Breitenlastverteilung. Ausgehend von der maximalen Flankenpressung und -kraft sind der vorgeschlagene Tragfähigkeitsnachweis und die Verschleißberechnung durchführbar. Offen bleibt in diesem Zusammenhang aber noch die Berechnung des Übergangspunktes von der Verschleißtieflage in den Endverschleiß. Aufgrund der elementaren Wichtigkeit der Kenntnis dieses Punktes für die Auslegung der Zahnwellen-Verbindungen wird im folgenden hierzu ein erweiterter Berechnungsansatz entwickelt.

Neben dem Adhäsions- und Abrasionsverschleiß tritt in der Endverschleißphase der Ermüdungsverschleiß als dominierender Verschleißmechanismus auf. Der Ermüdungsverschleiß kann rechnerisch mit den Mitteln der Betriebsfestigkeit bestimmt werden /5/. Den grundlegenden Fall stellt der Vergleich der Beanspruchungen mit der Beanspruchbarkeit nach den Wöhlerlinien der Welle-Nabe-Werkstoffe dar. Zu diesem Zweck müssen die Beanspruchungen getrennt nach Mittel- und Ausschlagspannung angegeben werden. Die in der DIN 5466 angegebene Berechnung der Maximalbeanspruchung, muß für die jeweiligen Betriebszustände, separat für die Mittel- und Ausschlagspannung entwickelt werden. Die bestehenden Grundlagen zur Lastverteilung in Umfangs- und Breitenrichtung bleiben gültig und werden genutzt.

Die Belastungszusammensetzung einer Zahnwellen-Verbindung ist durch äußere und innere Faktoren bestimmt. Zu den äußeren Faktoren zählen die Drehmoment- und Querkraftbelastung durch Spannkräfte an Riemenscheiben oder Zahnkräfte an Wechselrädern sowie z.B. die resultierenden Belastungen aus Fluchtungsfehlern der beiden zu verbindenden Wellen. Die inneren Faktoren beschreiben die Belastungen durch z.B. Teilungs- und Linienabweichungen, allgemein durch Verzahnungsabweichungen. Die Belastungen durch innere Faktoren sind im allgemeinen nur von der Einbaustellung /6/ der Welle in der Nabe abhängig, d.h. drehwinkelinvariant und erscheinen dadurch nur in der Mittelspannung.

In **Bild 14** ist der Einfluß solcher drehwinkelinvarianter Faktoren, z.B. Teilungsabweichungen, zu erkennen. Auf der Abszisse sind die einzelnen Zahnlasten einer Verbindung mit 44 Zähnen über dem Umfang abgewickelt dargestellt.

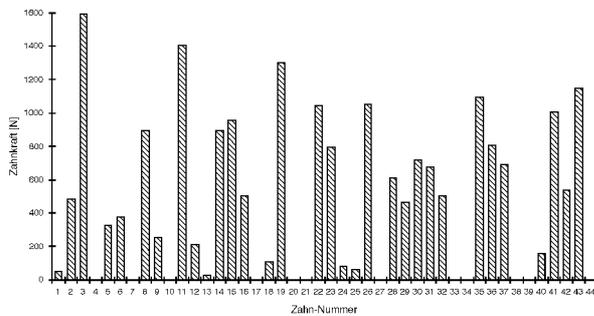


Bild 14: Zahnkräfte in einer Zahnwellen-Verbindung 113x2,5x30x44 DIN 5480 bei einer Verzahnungsqualität IT 8

Die Belastungen durch äußere Faktoren finden sowohl in der Mittelspannung als auch in der Ausschlagspannung ihren Eingang. Speziell die Querkraftbelastungen und die auf sie reduzierbaren Auswirkungen von z.B. Fluchtungsabweichungen erzeugen bei umlaufenden Verbindungen Ausschlagspannungen. Die äußere Belastung durch das zu übertragende Drehmoment ist, abhängig von der ihm eingprägten Dynamik, in vielen Fällen für die Auslegung als annähernd statisch in der Größe des Nennmomentes anzunehmen. Die Berücksichtigung mehrstufiger Belastungen ist in diesem Stand der Berechnungsentwicklung noch nicht enthalten. Eine Erweiterung der Berechnungsgrundlagen in dieser Richtung ist unter Beibehaltung der jetzigen Grundstruktur möglich. Unter den gemachten Voraussetzungen ergibt sich aus der äußeren Drehmomentbelastung ein Mittelspannungsanteil. Die bisher verbal zusammengestellten Belastungskomponenten können auch formelmäßig dargestellt werden. Die Formel für den Einfluß der Lastverteilung über dem Verbindungsumfang aus DIN 5466 kann getrennt für die Einflüsse aus Querkraft und Drehmoment mit den zugehörigen Verzahnungskenngrößen dargestellt werden als:

$$k_R = 1 + k_{RQ} + k_{RT}$$

mit

$$k_{RQ} = \frac{Y_a \cdot Q}{Q_{Bez}} \cdot \left(1 + \frac{Y_b \cdot j_{lm}}{p} \right)$$

und

$$k_{RT} = \frac{Y_c \cdot F_p}{p} \cdot \frac{1}{1 + \frac{Y_d \cdot T}{T_{Bez}}}$$

Der Mittellastanteil kann unabhängig von den drei Betriebszuständen berechnet werden nach:

$$F_a = \frac{T}{r_w \cdot Z} \cdot (1 + k_{RT})$$

Für die Ausschlaglastanteile muß in die drei bekannten Betriebsbereiche unterschieden werden:

Betriebszustand I:

$$F_a = \frac{T}{r_w \cdot Z} \cdot k_{RQ} + (1 - G) \cdot \frac{Q}{f_G \cdot Z} \cdot k_R$$

Betriebszustand II:

$$F_a = \frac{T}{r_w \cdot Z} \cdot k_{RQ} + (1 - \mu) \cdot \frac{Q}{f_G \cdot Z} \cdot k_R$$

Betriebszustand III:

$$F_a = \frac{T}{r_w \cdot Z} \cdot k_{RQ}$$

Aus den Mittel- und Ausschlag-Flankennormallastanteilen können die zugehörigen Flankenpressungen berechnet werden.

$$p_m = \frac{F_m \cdot \cos \alpha_w}{b \cdot h_w}$$

und

$$p_a = \frac{F_a \cdot \cos \alpha_w}{b \cdot h_w}$$

mit der gemeinsamen Zahnbreite b von Welle und Nabe und der wirksamen Flankenhöhe

$$h_w = \frac{d_{a1} - |d_{a2}|}{2}$$

4 Berechnungsbeispiel

In diesem Kapitel sollen die bisher aufgestellten Theorien anhand von Beispielrechnungen für die Zahnwellen-Verbindung 45x2x30x21 DIN 5480 angewendet und überprüft werden. Den Beispielrechnungen liegt eine einheitliche Flächenpressung von $p = 37 \text{ N/mm}^2$ nach DIN 5466E Ausgabe 1986 zugrunde. Mit den sechs gewählten Lastkombinationen wird der repräsentative Einsatzbereich mit den ideellen Radien $R_f = 0 \dots 500 \text{ mm}$ abgedeckt und zusätzlich der Grenzwert $R_f \rightarrow \infty$, sodaß alle drei Betriebsbereiche enthalten sind. Der Reibungskoeffizient wurde mit $\mu = 0,1$ für eine ideal ölgeschmierte und mit $\mu = 0,7$ für eine durchschnittliche fettgeschmierte oder trockene Verbindung angenommen.

Trägt man die charakteristischen Spannungswerte graphisch auf, so ergibt sich **Bild 15**.

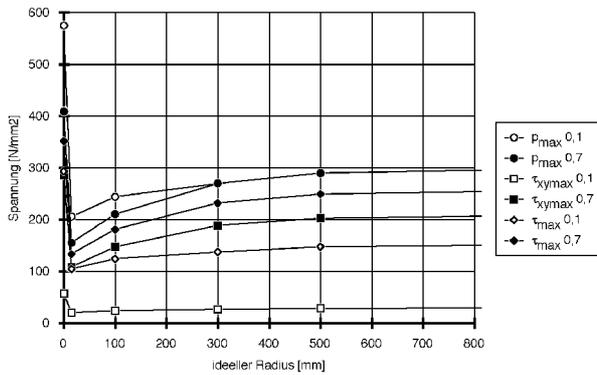


Bild 15: Flächenpressungen und Schubspannungen für die beiden Reibungskoeffizienten $\mu=0,1$ und $0,7$

Die beiden obersten Kurven stellen die maximalen Flächenpressungswerte für die beiden gewählten Reibungskoeffizienten dar. Der mit dem ideellen Radius asymptotisch ansteigende Verlauf ist aus Sicht des Verschleißverhaltens unkritisch, da das Produkt aus Reibweg und Flächenpressung bei größeren ideellen Radien abnimmt. Entsprechend reduzieren sich auch die abrasiven Verschleißanteile. Bemerkenswert ist im Vergleich zu den Schubspannungsverläufen, daß zu großen ideellen Radien hin kein Unterschied zwischen den Flächenpressungswerten für die beiden Reibungskoeffizienten besteht. Die Flächenpressung ist also in weiten Lastbereichen unabhängig vom Schmierzustand. Im Gegensatz dazu sind die auftretenden Schubspannungen deutlich von den vorliegenden Schmierbedingungen abhängig. Die maximale Schubspannung an der Flankenoberfläche liegt zwischen 29 N/mm^2 für $\mu=0,1$ und 203 N/mm^2 für $\mu=0,7$. Letztlich entscheidend für die Entstehung von Oberflächenanrissen ist die größte auftretende Schubspannung τ_{max} . Diese Risse sind die Ausgangspunkte für die Flankenausbrüche in der Endverschleißphase beim Betriebszustand III. Bei Belastungskombinationen in den Betriebszuständen I und II überwiegt der abrasive Verschleiß, sodaß das Rißwachstum langsamer fortschreitet als der abrasive Flankenabtrag. Der in diesem Betriebsbereich nur geringe Unterschied in den größten auftretenden Schubspannungen τ_{max} für $\mu=0,1$ und $\mu=0,7$ wirkt sich nicht aus. Verbindungen die im Betriebszustand III laufen und so die Grenzlastwechselzahl für Ermüdungsausbrüche erreichen, weisen deutliche Unterschiede (ca. Faktor 2) in den größten auftretenden Schubspannungen τ_{max} abhängig von den Reibungskoeffizienten auf. Vergleicht man diese Schubspannungen mit den von /2,3/ in Zugschwellversuchen ermittelten Reibdauerhaltbar-

keiten (**Bild 16**), so ergibt sich auch im Hinblick auf die Ermüdungsschädigung der Flanken der eindeutige Hinweis an den Konstrukteur auf möglichst reibungsarme Kontaktverhältnisse zu achten. Dieser Hinweis korrespondiert in idealer Weise mit den Versuchsergebnissen aus umfangreichen Untersuchungsreihen, die am IMW durchgeführt wurden. Eine Ölschmierung ist in allen Fällen, die es konstruktiv erlauben, anzustreben.

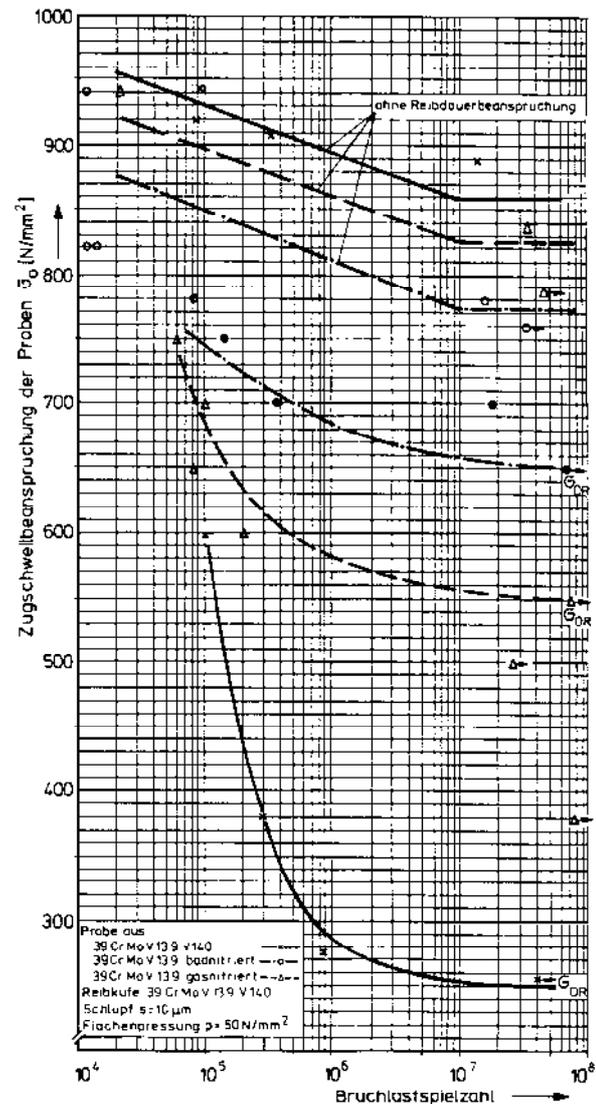


Bild 16: Reibdauerhaltbarkeit nach /2,3/

5 Literatur

- /1/ Schäfer, G.: Dissertation, TU Clausthal 1995
- /2/ Funk, W.: Dissertation, TH Darmstadt 1968
- /3/ Kreitner, L.: Dissertation, TH Darmstadt 1976
- /4/ Zapf, R.: Dissertation, TU Clausthal 1986
- /5/ Gudehus, H.; Zenner, H.: Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung, VDEh, 3. Auflage, Düsseldorf 1995
- /6/ Dietz, P.: Die Berechnung der Zahn- und Keilwellenverbindungen, Büttelborn 1978

Analyse der Beanspruchungen an Windentrommeln

Henschel, J.; Mupende, I.

In dem folgenden Beitrag werden die Arbeiten am Institut für Maschinenwesen zur Analyse der Beanspruchungen in Windentrommeln dargestellt. Ein Überblick der theoretischen Grundlagen und deren Verifikation durch Messungen am realen Bauteil, sowie Prüfstandsversuchen bilden die Basis der Darstellung.

In the article you will get an introduction in the calculation of stresses in winding drums. The theoretical basics, their improvement with measurements on real winding drums and test rigs are discussed.

1 Einleitung

Der vorliegende Artikel gibt eine Übersicht der am Institut für Maschinenwesen durchgeführten Arbeiten zur Optimierung und Gestaltung von Windentrommeln.

Ausgehend von charakteristischen Trommelparametern und charakteristischen Seilparametern ist es möglich, mit Hilfe der von Dietz /1/

entwickelten Theorie, eine Dimensionierung von Trommelkörpern durchzuführen. Hierbei wird das von /1/ entwickelte Trommeldimensionierungsprogramm STB verwendet.

Die Resultate einer Berechnung geben einen Überblick über die zu erwartenden Spannungen im Trommelkörper und den Bordscheiben.

Die so ermittelten Resultate dienen als Eingangsgrößen und Randbedingungen für eine Finite-Elementberechnung (**Bild 1**).

Am Institut für Maschinenwesen werden diese Berechnungen sowohl mit dem Programmsystem MARC/MENTAT sowie mit dem Finite-Elemente-System ProMechanica durchgeführt.

Die so berechnete Übersicht der Beanspruchungsverteilung im Trommelkörper stellt die Grundlage zur Festlegung von Meßstellen am Bauteil dar. Zur Überprüfung der Berechnungen wurden am Institut für Maschinenwesen eine Reihe von DMS-Messungen am realen Bauteil durchgeführt. Verwendet wird hierbei eine 32/4-kanal-gemultiplexte Telemetrieanlage /2/.

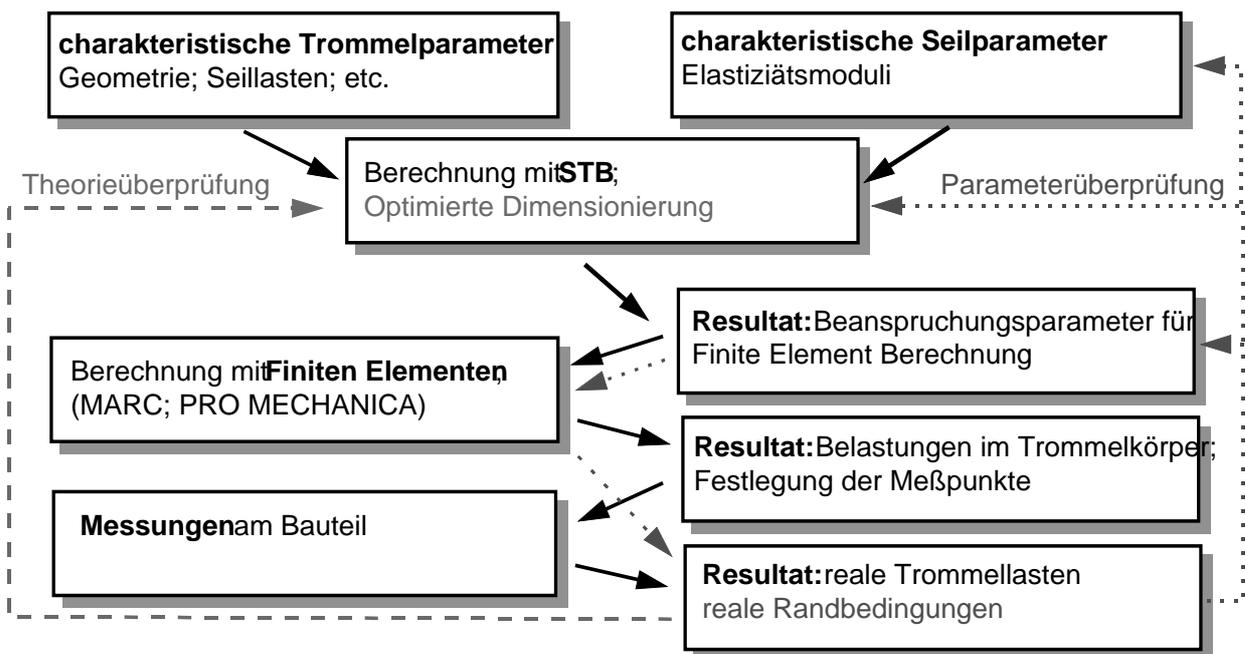


Bild 1: Vorgehensweise der Trommeloptimierung

Das heißt an 32, auf der Basis des ersten Berechnungsdurchlaufs ausgewählten Meßstellen, werden die Dehnungen am Bauteil gemessen.

In einem weiteren Schritt werden die durch die DMS-Messungen ermittelten Dehnungen mit den Resultaten der Finite-Elemente Berechnungen verglichen.

Die durch die Messung ermittelten 32 Fixpunkte bilden die Kontrollpunkte für eine Variation der Last- und Randbedingungsparameter von weiteren Finite-Elemente Berechnungen. Ziel der Analysen ist eine optimale Konvergenz zwischen Messung und Berechnung.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß eine Überprüfung der charakteristischen Seilparameter und eine Analyse der Theorie notwendig erscheinen. Insbesondere im Hinblick auf die verwendeten Seilparameter sei auf den Artikel „Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 1)“ verwiesen. In **Bild 1** wird die in der Einleitung vorgestellte Vorgehensweise in Form einer Übersicht dargestellt.

2 Messungen am realen Bauteil

Bild 2 zeigt die im Rahmen des Forschungsvorhabens „Konstruktion und Optimierung von Leichtbauwindentrommeln“ der Stiftung Industrieforschung untersuchten Trommelkörper. Die gezeigten Trommelwinden werden mit 23 Windungen bis zu fünf Lagen bewickelt (**Bild 2**). Ziel der dargestellten Untersuchung war die Ermittlung des Einflusses der Seilmachart auf die Beanspruchungen im Trommelkörper. Zu diesem Zweck wurden unterschiedliche Seilmacharten unter gleichen Randbedingungen untersucht.



Bild 2: Trommelprüfstand

Folgende Seile wurden verwendet:

- CASAR Stratoplast
- CASAR Quadrolift
- CASAR Turboplast
- CASAR Eurolift
- DRAKO 175 L
- DRAKO 8 x 19 Seale
- DRAKO 6 x 36 WS

Die o.g. Drahtseile wurden teilweise in Gleich- und Kreuzschlagvarianten gefahren. Alle untersuchten Drahtseile haben einen Nenndurchmesser von $D_{\text{nenn}} = 14 \text{ mm}$. Die Nennfestigkeiten der Einzeldrähte variiert von 1770 N/mm^2 bis 2160 N/mm^2 .

Die Stranglasten wurden während der Messungen über die gesamte Spulungslänge konstant gehalten. Die gefahrenen Stranglasten betragen 10 kN und 20 kN.

Es wurde festgestellt, daß sich in Abhängigkeit von der Seilmachart ein Belastungsspektrum im Trommelkörper mit folgenden charakteristischen Eckwerten einstellt:

$$119,5 \% > \sigma_{\text{max.,tang.}} > 100 \%$$

$$151,9 \% > \sigma_{\text{max.,ax.}} > 100 \%$$

Diese vergleichsweise große Varianz in den Beanspruchungen führte zu der Forderung, die charakteristischen Seilparameter näher zu untersuchen.



Bild 3: Meßtechnik

Der hierzu konstruierte und gebaute Prüfstand wird in dem o.g. Artikel detailliert beschrieben

Die Resultate der derzeit noch laufenden Untersuchungen werden 1999 vorgestellt /3/. Ziel ist die Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur Bestimmung der genannten charakteristischen Seilparameter.

3 Theoretische Grundlagen

Die Resultate sind die Basis einer weitergehenden Untersuchung der von /1/ entwickelten Theorie.

Die Modellbildung, der Darstellung einer Windentrommel als biegesteife Kreiszyinderschale, erscheint günstig. Diese geschlossene analytische Beschreibung des Bauteils führt jedoch auf die folgenden Probleme:

- a) Die Interdependenzen zwischen Bordscheibe und Trommelkörper können nur eingeschränkt dargestellt werden.
- b) Die Bewicklungsart (glatte Trommel, Rille, Sonderbewicklung) und deren Einfluß auf die Trommellasten ist nicht darstellbar.
- c) Die vorliegenden charakteristischen Parameter, welche zur Dimensionierung von Trommelkörpern benötigt werden erscheinen nicht mehr zeitgemäß.

Zu den Punkten a) und b) ist anzumerken, daß die Durchführung von Finite-Element Berechnungen diese Informationslücken schließen können.

Mit dem Programmsystem ProMechanica ist es möglich, auf der Basis von CAD Daten eine voll modellierte (Rillung, Seilschloß, etc.) dreidimensional dargestellte Windentrommel zu berechnen.

Die Grundlage der Berechnung mit Finiten-Elementen stellt aber nach wie vor das bereits erwähnte Programm STB dar. In den Vergleichen mit den Resultaten der Messungen fiel jedoch auf, daß die bisher verwendeten charakteristischen Parameter nicht mehr der heutigen Technik entsprechen. Insbesondere die Entwicklung neuer Verseilungstechnologien führte zu bemerkenswerten Veränderungen hinsichtlich des Steifigkeitsverhaltens von Drahtseilen.

Vergleicht man ein herkömmliches Drahtseil (bspw. 6x36 WS) mit einem Drahtseil moderner Machart (bspw. Eurolift), so ergibt sich eine Differenz in der Seilquerelastizität in der Größenordnung des Fak-

tors zwei. Das Elastizitätsverhalten eines Drahtseils 90° zur Zugrichtung ist von primärer Bedeutung für die Beanspruchungen des Trommelkörpers.

Der nahezu lineare Zusammenhang zwischen der Querelastizität eines Drahtseiles und den Trommellasten bei gleicher Stranglast zeigt, daß die durch einen Seilwechsel induzierten Laststeigerungen im Trommelkörper keinesfalls zu vernachlässigen sind.

Somit kommt der Analyse der Berechnungsparameter besondere Bedeutung zu. Die Untersuchungen hierzu werden derzeit durchgeführt.

Desweiteren werden die auftretenden Axiallasten im Trommelkörper näher untersucht. Eine Überarbeitung der Theorie erscheint in diesem Bereich erforderlich, da die ausschließliche Einleitung von Axiallasten über die Bordscheiben in den Trommelkörper als nicht zutreffend erscheint. Die Untersuchungen hierzu sind ebenfalls noch nicht abgeschlossen und werden 1999 präsentiert /4/.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens „Konstruktion und Optimierung von Leichtbauwindentrommeln“ der Stiftung Industrieforschung durchgeführten Arbeiten am Institut für Maschinenwesen führen zu einer Überprüfung der Theorie der Berechnung von Windentrommeln.

Die Analyse der charakteristischen Parameter zur Berechnung von Seiltrommeln führte zu der Untersuchung neuer Seilmacharten. Hierbei wurde festgestellt, daß durch die Entwicklung hochfester Drahtseile die Beanspruchungen im Trommelkörper bei gleicher Stranglast steigen. Im Hinblick auf die sicherheitskritischen Anwendungen von Trommelkörpern erscheint eine kritische Analyse der Berechnungsgrundlagen erforderlich.

Ziel der Arbeiten ist die Entwicklung einer überarbeiteten Dimensionierungsrichtlinie für Windentrommeln, sowie eine standardisierte Prüfvorschrift für Drahtseile im Hinblick auf das Elastizitätsverhalten in Querrichtung.

5 Literatur

- /1/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln. Dissertation, TH Darmstadt, 1971

- /2/ Henschel, J.: Institutsmitteilung Nr. 20, IMW Clausthal 1995
- /3/ Henschel, J.: Teilbericht 2 zum Forschungsvorhaben „Gestaltung und Dimensionierung von Windentrommeln“, IMW Clausthal 1998
- /4/ Henschel, J.: Teilbericht 3 zum Forschungsvorhaben „Gestaltung und Dimensionierung von Windentrommeln“, IMW Clausthal 1998

TWINTORS® - Membrankupplung für Turbomaschinen

Birkholz, H.; Garzke, M.; Mupende, I.

Für die drehstarre Übertragung von sehr hohen Drehmomenten und Drehzahlen bei gleichzeitigem Ausgleich von axialem, radialem und winkligem Versatz der zu verbindenden Wellenenden bieten sich Membrankupplungen hervorragende Einsatzmöglichkeiten. Der Artikel beschreibt Aufbau und Eigenschaften dieser Kupplungsbauart.

For the transmission of high torques and revolutions accompanied by simultaneous axial, radial and angular variations of the shaft ends to be connected, a membrane clutch is an excellent solution. This paper describes the structure and the characteristics of this clutch.

1 Einleitung

Kupplungen sind grundlegende Elemente der Antriebstechnik, sie lassen sich in schaltbare und nicht schaltbare Kupplungen unterteilen. Neben der eigentlichen Aufgabe der Drehmomentübertragung müssen sie z.T. weitere Funktionen erfüllen, z.B.:

- Minderung von stoßartigen Belastungen oder Schwingungen (elastische Kupplungen)
- Sicherung gegen Überlasten (Überlastkupplungen)
- Verbinden oder Trennen der Wellenenden (Schaltkupplungen, Fliehkraftkupplungen)
- Ausgleich von Wellenverlagerungen (Ausgleichskupplungen)

Speziell für den Ausgleich von Wellenverlagerungen sind zahlreiche Konstruktionsformen herausgearbeitet worden, die je nach Bauart axiale, radiale und/oder winklige Wellenverlagerungen ausgleichen. Ursachen für Wellenverlagerungen sind im wesentlichen Ausricht- oder Montageungenauigkeiten, Wärmedehnungen, elastische Verformungen, Fundamentversatz oder konstruktive Gründe /1/.

Als Bauarten drehstarrer Ausgleichskupplungen können genannt werden:

- Klauenkupplungen, Parallelkurbelkupplungen
- Kreuzschlitzkupplungen
- Kreuzgelenkwelle (Kardangelen)
- Zahnkupplung

- Federlaschenkupplung
- Metallbalgkupplung
- Membrankupplung

Wesentliches Unterscheidungsmerkmal dieser Kupplungen ist die Realisierung der Ausgleichsfunktion über Führungen und Gelenke oder über metallelastische Elemente, sog. Metallfedern /2/. Aufgrund des mehrteiligen Kupplungsaufbaus ist die formschlüssige Übertragung des Drehmomentes (z.B. Zahnkupplungen, Kreuzschlitzkupplung) mit Verschleißproblemen verbunden, eine Schmierung der Kontaktstellen ist unumgänglich. Dadurch wird dem Einsatz durch eine maximal zulässige Temperatur eine Grenze gesetzt. Gleiches gilt für die Ausführung als wartungsfreie, trockenlaufende Zahnkupplung, bei der die innenverzahnte Hülse aus Kunststoff (Polyamid) hergestellt ist und die Verwendung bis zu einer maximalen Temperatur von etwa 80°C erfolgen kann.

Dagegen übertragen Membrankupplungen die Drehmomente absolut spielfrei, wodurch sich das dynamische Verhalten des Antriebsstranges gerade im Reversierbetrieb oder beim Auswuchten entscheidend verbessert. Außerdem ist kein Schmierstoffeinsatz notwendig, der Betrieb kann bei Temperaturen bis 250°C und höher erfolgen. Auf weitere wesentliche Charakteristiken von Membrankupplungen soll im folgenden eingegangen werden.

2 Konstruktive Gestaltung von Membrankupplungen

Unter Membranen sind technisch gesehen dünne biegeeweiche Bleche zu verstehen. Diese Membranen können in Vollscheiben- oder Segmentstruktur ausgebildet sein und besitzen somit unterschiedliche Eigenschaften. Alle Membrankupplungen bestehen aus zwei Naben, den Membranteilen und den Verbindungselementen. Mögliche Anordnungsformen sind in den **Bildern 1, 2 und 3** dargestellt /3/.

Die Ablenkwinkel sind bei der Einfachanordnung des Ausgleichselementes „Membrane“ verhältnismäßig klein, so daß die Ausführung in der Doppelanordnung zweckmäßiger ist.

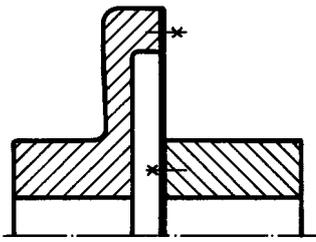
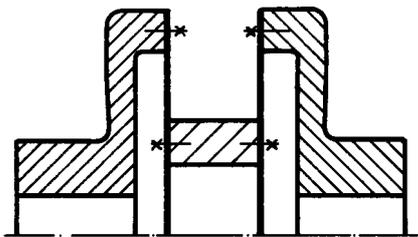
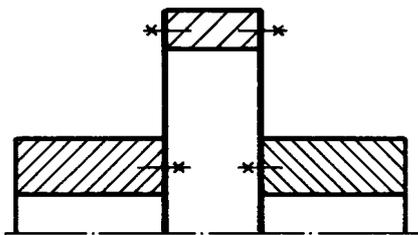


Bild 1: Membrankupplung in Einfachanordnung



Mittelstück
innen



Mittelstück
außen

Bild 2: Membrankupplung in Doppelanordnung

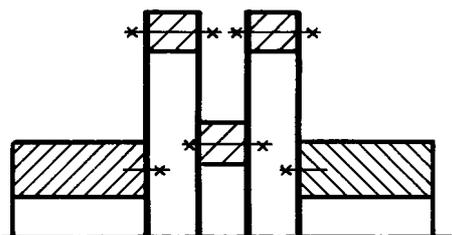
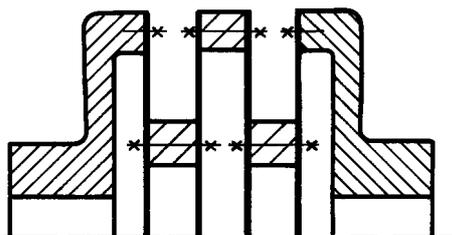


Bild 3: Membrankupplung in 4-fach-Anordnung

Die Hintereinanderschaltung von zwei Doppelkupplungen führt zu der gebräuchlichen Form der 4-fach-Kupplung, wodurch sich der zulässige Winkel- und Axialversatz proportional zur Anzahl der Membranen erhöht.

Spezielle Vorteile von Membrankupplungen sind:

- kostengünstige Gestaltung hinsichtlich der Symmetrie der Flächen und Gleichheit der Bauteile
- einfache kraftschlüssige Verbindung von Naben und Membranteilen

3 TWINTORS®-Membrankupplungen

Die gezielte Weiterentwicklung bestehender Membrankupplungskonstruktionen sowie die geschickte Kombination der o.g. Vorteile führte in Kooperation zwischen der Fa. BHS-Cincinnati Getriebetechnik Sonthofen und dem Institut für Maschinenwesen zu der in den **Bildern 4** und **5** dargestellten TWINTORS®-Membrankupplung mit optimierten Eigenschaften /4/:

- Integration der Verbindungsstücke (Mittelstücke) in die Vollmembranscheiben
- Übertragung hoher Drehmomente bei höchsten Drehzahlen, abhängig von der Baugröße $T \bullet 500000 \text{ Nm}$, $n \bullet 25000 \text{ min}^{-1}$
- hohe Laufpräzision, kleine Massen und Massenträgheitsmomente



Bild 4: Zwei TWINTORS®-Membrankupplungen mit Zwischenhülse (BHS-Cincinnati)

Bei einer dauerfesten Auslegung der Kupplung ergibt sich eine unbegrenzte Lebensdauer, da ein verschleißfreier Betrieb gewährleistet ist. Durch den Austausch der Schraubverbindung zwischen Membrane und Mittelstück durch eine Schweißverbindung entstehen geringere Ventilationsverluste, außerdem wird durch die glatten Außenflächen der Membranscheiben die Geräusch- und Wärmeent-

wicklung auf ein Minimum reduziert. Diese herausragenden Eigenschaften prädestinieren den Einsatz der Kupplungen u.a. in Gas- und Dampfturbinenanlagen und bei Zentrifugalpumpen.

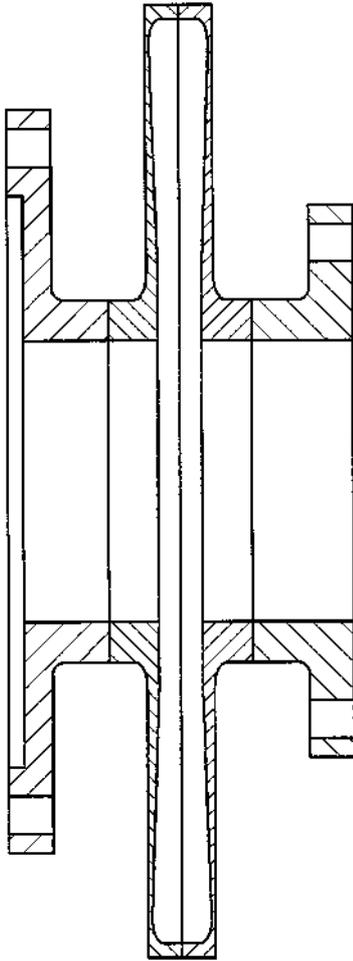


Bild 5: TWINTORS®-Membrankupplung

4 Beanspruchungsverhalten der Membrankupplungen

Zur Gewährleistung des Kupplungseinsatzes nach dem Safe-Life-Prinzip sind zahlreiche numerische und experimentelle Untersuchungen des Beanspruchungs- und Deformationsverhalten unter Drehmoment-, Biegemoment- und Axialkraftbelastung durchgeführt worden. **Bild 6** veranschaulicht das Verformungsverhalten der TWINTORS®-Membrankupplung unter Biegebelastung. Deutlich ist an der mit Pkt.1 gekennzeichneten radialen Außenposition der Membrane die Stelle der höchsten Beanspruchung bei Biegemomentbelastung zu erkennen, der geringe Abstand der Linien gleicher Radialspannungen weist auf einen hohen Spannungsgradienten hin. Die Position der maximalen Schubbeanspruchung bei einwirkendem Drehmoment befindet sich in der Nähe des Übergangsbe-

reiches zum Anschlußflansch und ist mit Pkt.2 bezeichnet.

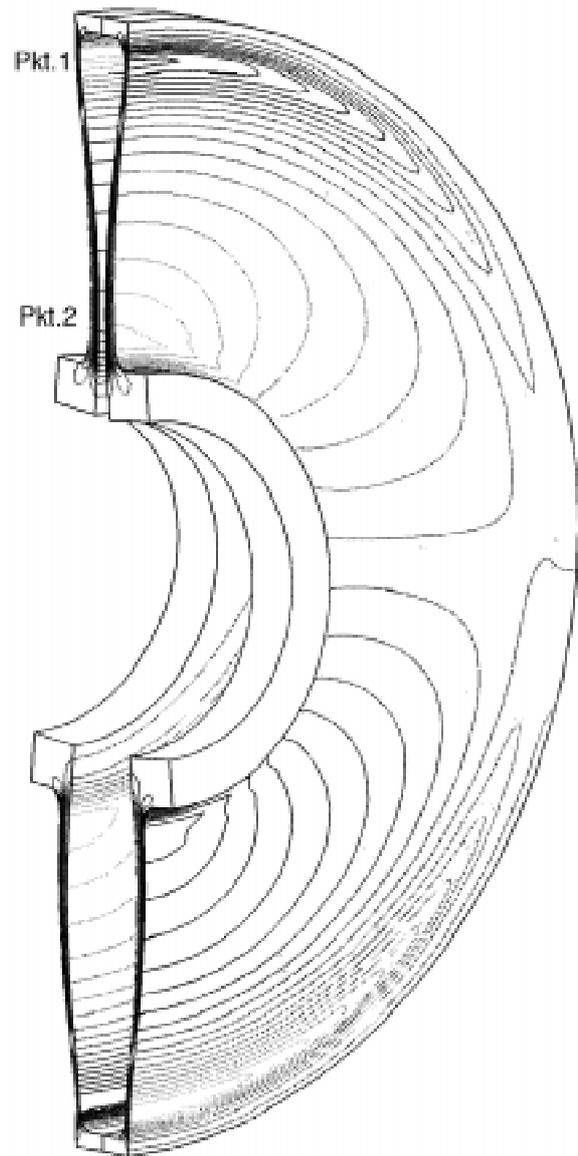


Bild 6: Membrankupplung unter Biegebelastung; Linien gleicher Radialspannungen

Die Federkennlinien der Membrankupplungen unter Drehmoment- und Biegemomentbelastung sind in den **Bildern 7** und **8** dargestellt. Das Steifigkeitsverhalten der Kupplung unter Biegemomentbelastung ist erst bei sehr großen Ablenkwinkeln, die über den zulässigen Prospektangaben der Fa. BHS-Cincinnati liegen, durch einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Last und Deformation mit einem progressiven Federcharakter geprägt. In dem für den Einsatz maßgebenden Bereich zeigt die Konstruktion ein lineares Steifigkeitsverhalten, wodurch sich das schwingfähige System „Antriebsstrang“ besonders bei hohen Drehzahlen besser dynamisch beherrschen läßt. Zum Vergleich ist in **Bild 8** eine lineare Federkennlinie eingezeichnet.

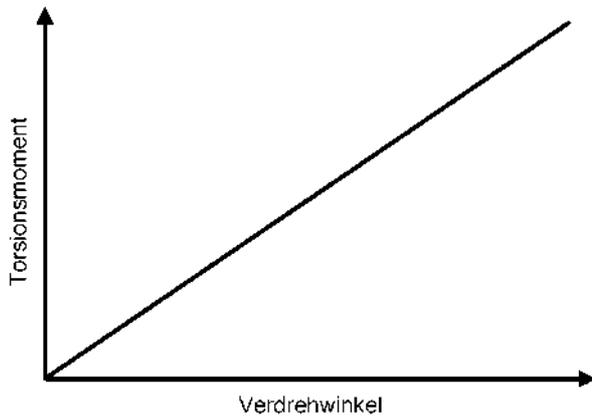


Bild 7: Steifigkeitsverhalten einer Membrankupplung unter Torsionsbelastung

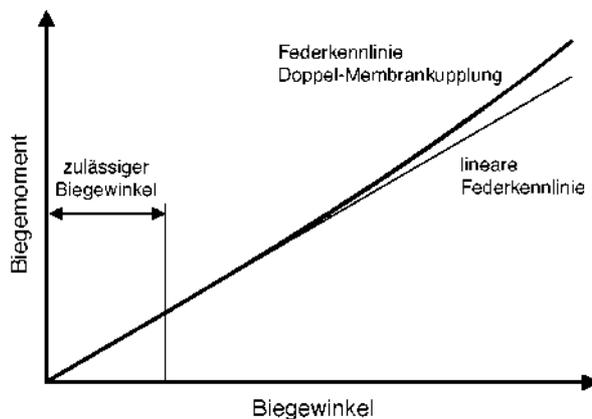


Bild 8: Steifigkeitsverhalten einer Membrankupplung unter Biegebelastung

5 Experimentelle Untersuchungen

Zur Ermittlung der Beanspruchbarkeitsgrenzen der TWINTORS®-Membrankupplungen sind auf verschiedenen Prüfständen im IMW /5, 6/ umfangreiche Versuche durchgeführt worden:

- statische Torsion und Wechselbiegung mit bis zum doppelten des zulässigen Biege winkels
- schwellendes Torsionsmoment
- statische Torsion zur Bestimmung des Abschermomentes

Bild 10 zeigt exemplarisch eine im Einstufenversuch mit unzulässig hohem Biegeablenkwinkel gebrochene Kupplung. Der Bruchort korreliert sehr gut mit den im Kap.4 beschriebenen hochbeanspruchten Bereichen des Bauteils. Aufgrund der deutlich auseinanderliegenden Bruchlagen bei Torsion, Biegung und Axiallast ist bei möglichen Schadensfällen eine Identifikation der Versagensursache leicht möglich.



Bild 10: Dauerbruch einer Membrankupplung im Versuchsbetrieb infolge zu hoher Umlaufbiegebelastung

Die Versuchsergebnisse bestätigen eindrucksvoll, daß es sich aufgrund der herausragenden Festigkeitseigenschaften der TWINTORS®-Membrankupplungen um eine ausgewogene und leistungsfähige Konstruktion handelt. Das Optimierungspotential wird jedoch sowohl durch die Fa. BHS-Cincinnati Getriebetechnik als auch durch das IMW als noch nicht erschöpft angesehen. Derzeit laufen weitere Untersuchungen, um die Tragfähigkeit der Membrankupplungen weiter zu erhöhen.

6 Literatur

- /1/ Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag, 19. Auflage, 1997
- /2/ Peeken, H.; Troeder, C.: Elastische Kupplungen, Konstruktionsbücher Band 33, Springer-Verlag, 1986
- /3/ Ehrlenspiel, K.; Henkel, G.: Membrankupplungen als drehstarre, biegenachgiebige Ganzmetallkupplungen, VDI-Berichte 299, VDI-Verlag, 1977
- /4/ Rohbeck, N.: Doppel-Membrankupplung – Neuentwicklung mit verbesserten Eigenschaften, Antriebstechnik 30 (1991), Nr.2
- /5/ Garzke, M.; Henschel, J.; Schäfer, G.: Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 1), Institutsmitteilung Nr. 23, 1998
- /6/ Birkholz, H.; Heider, G.: Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 2), Institutsmitteilung Nr. 23, 1998

Die Kurbelschleife als Bauelement zur Bewegungsumwandlung in Verbrennungsmotoren

Otto, St.

Der Kurbelschlaufenmechanismus ist als Bauelement zur Transformation einer Linearbewegung in eine rotatorische Bewegung seit langer Zeit bekannt. Ursprünglich wurde dieser Mechanismus ausschließlich in langsam laufenden Maschinen, wie Wasserpumpen, eingesetzt, weil die Schmierung der Linearlager große Probleme bereitete.

Dieser Artikel gibt einen kurzen Überblick über die Möglichkeit, den Kurbelschlaufenmechanismus in Verbrennungsmotoren einzusetzen und beschreibt den Aufbau und die Eigenschaften derartiger Kurbelschlaufenmotoren.

The Scotch Yoke mechanism which transforms a linear reciprocating motion into a circular rotation or vice versa has been known for a long time. It was only used in slow speed water pumps or similar machinery because of the insufficient lubrication of the linear slider bearing.

This article briefly shows the possibility to apply the Scotch Yoke mechanism in combustion engines and describes the structure and characteristics of Scotch Yoke engines.

1 Einleitung

Am Institut für Maschinenwesen wurde eine Studienarbeit betreut, die in Zusammenarbeit mit der Collins Motor Corporation Pty. Ltd. (CMC) in Melbourne durchgeführt wurde und sich mit Untersuchungen an Kurbelschlaufenmotoren befaßte. Der vorliegende Artikel gibt einen kurzen Einblick in den Aufbau und die Funktionsweise der dort entwickelten Kurbelschlaufenmotoren.

2 Aufbau des Kurbelschlaufenmotors

2.1 Allgemeine Vorbemerkung

Die CMC-Kurbelschlaufenmotoren (**Bild 1**) sind durch eine horizontale Zylinderanordnung – ähnlich einem Boxermotor – charakterisiert und besitzen ebenso wie dieser ein geteiltes Kurbelgehäuse. Die Steuerung des Gaswechsels erfolgt durch zwei oben liegende Nockenwellen. Die neusten Versionen der CMC-Kurbelschlaufenmotoren besitzen ein

schaltbares Saugrohr. Der im folgenden beschriebene Kurbelmechanismus ist der wesentliche Unterschied zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren.

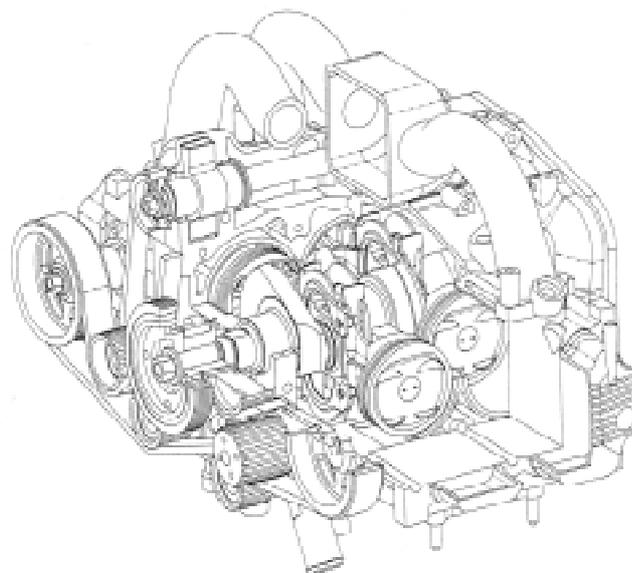


Bild 1: Schnittdarstellung eines 4-Zylinder-Kurbelschlaufenmotors /1/

2.2 Kurbelschlaufenmechanismus

Der Kurbelschlaufenmechanismus (**Bild 2**) besteht aus einem geteilten Gleitblock (1), der mit einem Gleitlager auf dem Kurbelzapfen (2) einer konventionell gestalteten Pleuellende angeordnet ist. Der Gleitblock wird seitlich von den parallelen Pleuellenden (3) geführt. Diese beiden Linearlager sind das Kernstück des Kurbelschlaufenmechanismus. Sie verhinderten in der Vergangenheit den Einsatz dieser Technik in schnelllaufenden Motoren, weil die Schmierung der Gleitflächen für hohe und wechselnde Lasten nicht ausreichend war. Das in den CMC-Kurbelschlaufenmotoren angewendete, patentierte Schmierungssystem hat in Prüfstandsversuchen und Prototypenmotoren jedoch bewiesen, daß eine vollständige Trennung der Kontaktflächen auch unter den oben genannten Betriebsbedingungen gesichert ist. Dabei wird das Öl über den Kurbelzapfen und das Gleitlager dem Linearlager in definierten Zeitintervallen zugeführt.

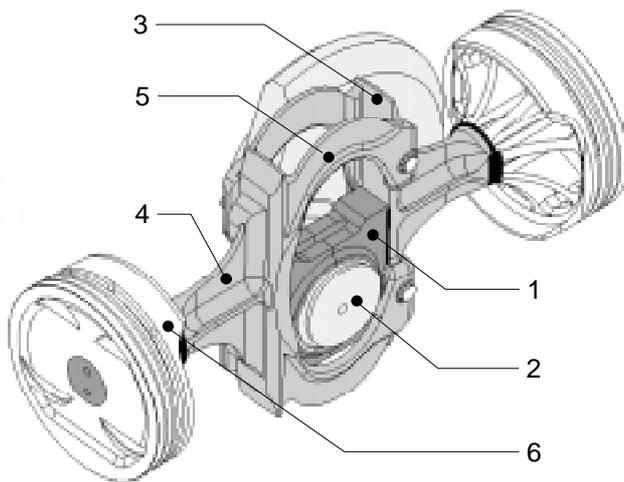


Bild 2: Aufbau des Kurbelschlaufenmechanismus /2/

Die beiden gegenüberliegenden Pleuel (4) sind mit Hilfe der sogenannten C-Plates (5) starr miteinander verbunden. Im Gegensatz zu früheren Designversionen, in denen die C-Plates als separate Bauteile ausgeführt waren, sind diese im jetzigen Konstruktionsstadium fest mit dem Pleuel verbunden. Diese konstruktive Ausführung garantiert einen verformungssteifen Aufbau der Kurbelschleife, der für eine störungsfreie Gleitbewegung Grundvoraussetzung ist.

Die aus Aluminium gefertigten Kolben (6) sind fest mit den Pleuel verschraubt. Dadurch ist in Verbindung mit den zahlreichen Rippen an der Kolbenunterseite eine sehr gute Abfuhr der Wärme vom Kolbenboden möglich.

3 Funktionsweise

Bild 3 zeigt den prinzipiellen Ablauf eines Taktzyklus in einem Kurbelschlaufenmotor. Dabei wurde die Darstellung so gewählt, daß sowohl die zwei Totpunktpositionen als auch die Stellungen bei halbem Hub deutlich werden.

Der Gleitblock bewegt sich mit dem Kurbelzapfen auf einer kreisförmigen Bahn um die Achse der Kurbelwelle (angedeutet durch den strichpunktieren Kreis). Die starr miteinander verbundenen Pleuel bewegen sich ausschließlich in Richtung der Zylinderachse; es treten keine Bewegungsanteile senkrecht zur Zylinderachse auf. Die Zündzeitpunkte der gegenüberliegend angeordneten Kolben folgen 180° KW versetzt zueinander.

Aus den Darstellungen wird deutlich, daß die Wegkomponente, die der Gleitblock in Richtung der Zylinderachse verfährt, genau der Verschiebung des Kolbens entspricht. Im Gegensatz zu konventio-

nellen Kurbelmechanismen bewegen sich demnach die Kolben beim Kurbelschlaufenmotor in einer exakt sinusförmigen Bewegung. Dies bewirkt, daß der Kurbelschlaufenmotor mit minimalem Aufwand vollständig ausbalanciert werden kann.

Während des Arbeitstaktes befindet sich der Gleitblock nahezu in der Mittelposition innerhalb der Kurbelschleife. Die Gaskraft wird direkt am Ort ihrer Einleitung (Kolbenboden) aufgenommen und auf kürzestem Wege zum Gleitblock geleitet. Die Kurbelschleife ist in dieser Position durch ein sehr starres Verhalten (kurzer Kraftfluß) charakterisiert. Daraus abgeleitet kann weiterhin festgestellt werden, daß die geringen Biegemomente durch niedrige Kolbenseitenkräfte abgestützt werden können. Hierdurch reduzieren sich nicht nur der Verschleiß zwischen Kolben und Zylinderwand, sondern auch die Kolbengeräusche.

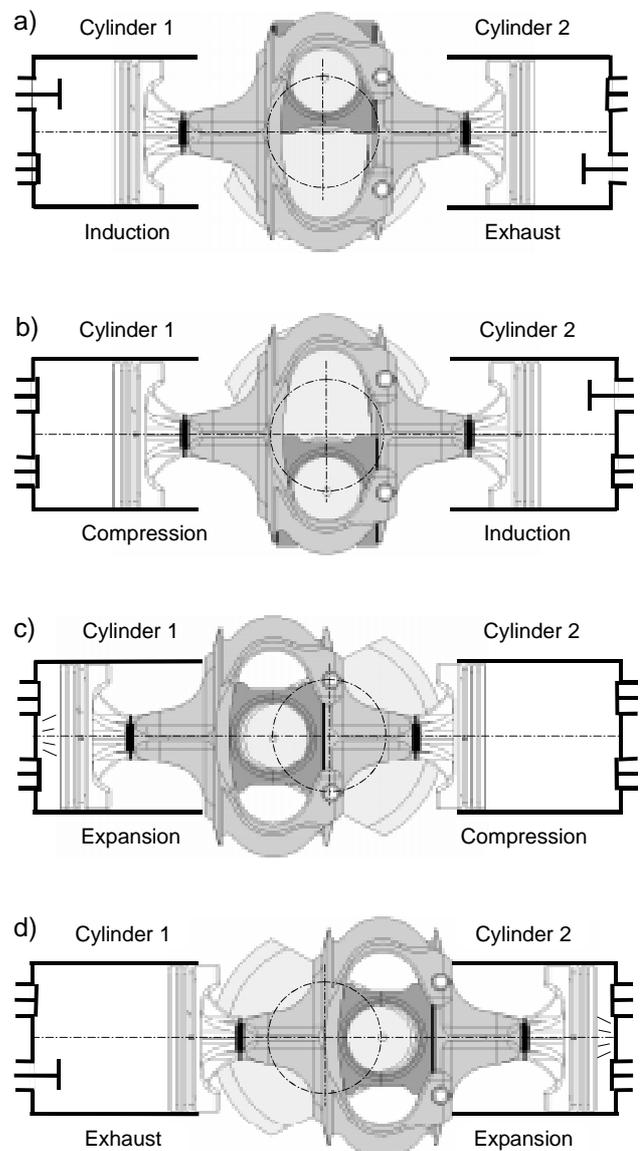


Bild 3: Arbeitszyklus /2/; a) 90° KW, b) 270° KW, c) 360° KW, d) 540° KW

Im folgenden Kapitel werden die charakteristischen Eigenschaften des Kurbelschlaufenmotors ausführlich dargestellt.

4 Eigenschaften

4.1 Schmierung des Linearlagers

Die Schmierung des Linearlagers erfolgt durch eine Kombination von hydrodynamischem und hydrostatischem Schmierfilmaufbau. Die höchsten Gleitgeschwindigkeiten im Linearlager – somit auch die höchste Tragfähigkeit des Schmierfilms – fallen mit dem Auftreten der größten Verbrennungsdrücke und Massenkräfte zusammen (**Bild 4**). Durch die Anordnung der bewegten Massen erfolgt eine teilweise Kompensation der Gaskräfte durch die Trägheitskräfte (Massen von 2 Pleuel, 2 Kolben und einem Gleitblock), so daß die resultierende Lagerbelastung verringert wird. Basierend auf diesen Effekten ist es möglich, das Linearlager im Verbrennungsmotor einzusetzen. Dauerlaufversuche haben gezeigt, daß die Schmierung des Linearlagers unter den hohen, alternierenden Lasten in Verbrennungsmotoren keine Probleme bereitet.

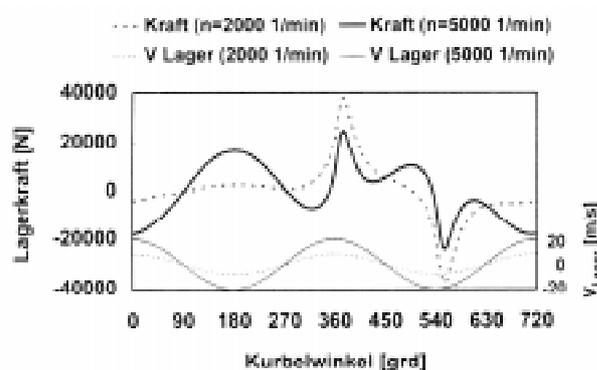


Bild 4: Kraft- und Gleitgeschwindigkeitsverhältnisse im Kurbelschlaufenmechanismus /1/

4.2 Motorschwingungen und Lärm

Auf Grund der exakt sinusförmigen Bewegung der Pleuel treten bei Kurbelschlaufenmotoren mit mehr als zwei Zylindern lediglich Giermomente um die Hochachse des Motors auf. Diese können mit **einer** Ausgleichswelle, die mit Kurbelwellendrehzahl umläuft, kompensiert werden.

Konventionelle Motoren, bei denen die Pleuel eine Bewegungskomponente senkrecht zur Pleuelrichtung besitzen, sind durch Momente höherer Ordnung charakterisiert, von denen in der Regel die Momente zweiter Ordnung ausgeglichen werden.

Dazu sind zwei, mit doppelter Kurbelwellendrehzahl umlaufende, Ausgleichswellen notwendig. Dies bedeutet nicht nur höhere mechanische Verluste im Vergleich zum Kurbelschlaufenmotor, sondern ist auch mit einem höheren konstruktiven Aufwand verbunden.

Der schwingungsarme Lauf, die geringen Pleuellagergeräusche (vgl. Kap. 3) und der kompakte, steife Aufbau der Pleuel sind die Ursachen für die äußerst niedrigen Geräuschemissionswerte des Motors. Vergleichsmessungen einer unabhängigen Institution zeigen den Vorteil der Pleuelmotoren gegenüber herkömmlichen 4-Zylinder-Motoren (**Bild 5**).

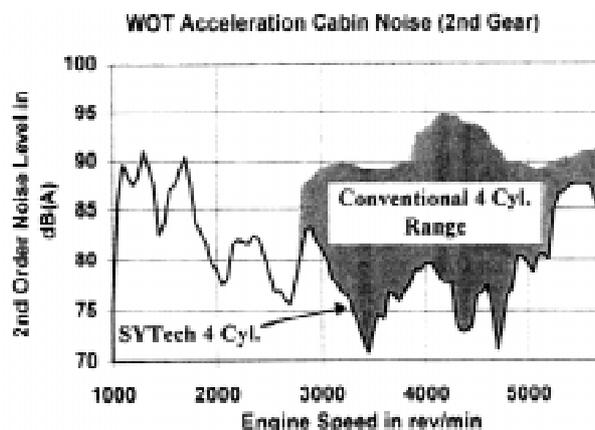


Bild 5: Vergleich der Innenraumgeräusche zwischen dem Pleuelmotor und konventionellen Motoren /3/

4.3 Drehmomentcharakteristik

Ein 4-Takt-Motor führt innerhalb von zwei Pleuellagerumdrehungen nur einen Arbeitstakt aus. Unter Beachtung der Zündreihenfolge entsteht somit eine oszillierende Drehmomentabgabe, die durch den Einsatz eines Schwungrades geglättet wird. Dabei gilt der Zusammenhang, daß mit höherer Schwungradmasse die Gleichförmigkeit des abgegebenen Drehmomentes zunimmt.

Pleuelmotoren zeigen bezüglich der Gleichförmigkeit der Drehmomentabgabe Vorzüge gegenüber konventionellen Verbrennungsmotoren. Ein bei CMC durchgeführter Vergleich zwischen einem Boxermotor und einem Pleuelmotor ergab, daß in nahezu allen Arbeitsbereichen die Drehmomentabgabe des Pleuelmotors gleichförmiger ist (**Bild 6**). Dadurch ist es möglich, eine kleinere Schwungradmasse einzusetzen. Letzteres wirkt sich positiv auf das Beschleunigungsverhalten des Motors aus; aufgrund der ge-

ringeren Massenträgheit können Drehzahländerungen schneller ausgeführt werden als bei vergleichbaren konventionellen Motoren.

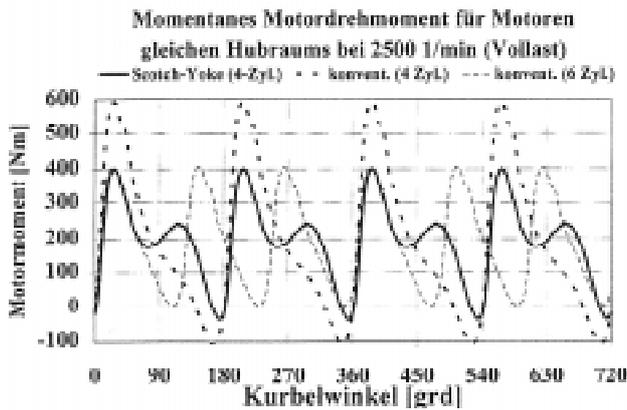


Bild 6: Vergleich der Drehmomentschwankungen /1/

4.4 Motorbaugröße

Der Einsatz einer Kurbelschleife – als Bauelement zur Transformation der linearen Kolbenbewegung in eine Rotation der Kurbelwelle – beeinflusst entscheidend die äußeren Abmessungen des Motors. Da die Pleuel keine Bewegung senkrecht zur Zylinderachse ausführen, können sie sehr kurz gestaltet werden. Die Pleuellänge wird nur begrenzt durch den minimal erforderlichen Abstand zwischen der unteren Pleuelkontur und der Zylinderlaufbuchse (im oberen Totpunkt) und dem erforderlichen Abstand zwischen dem Ölabbreifering und dem Rand der Laufbuchse (im unteren Totpunkt). Die Verkürzung der Pleuel wirkt sich direkt auf die Breite des Motors – den Abstand zwischen den gegenüberliegenden Zylinderköpfen – aus.

Neben der Verringerung der Motorbreite ergibt sich durch den Kurbelschleifenmechanismus auch eine geringere Motorlänge. Bei konventionellen Motoren ist jedem Zylinder ein Pleuellager zugeordnet. Im Kurbelschleifenmotor arbeiten jedoch zwei Kolben auf einem Kurbelzapfen; einem Kolbenpaar ist ein Pleuellager zugeordnet. Durch den Wegfall des Versatzes für die Pleuellager verringert sich nicht nur die Länge des Motors; die Einsparung von zwei Kurbelwellenlagern, zwei Pleuellagern und vier Kolbenbolzen sowie die verringerten Kolbenseitenkräfte (vgl. Kap. 3) führen außerdem zu einer Reduzierung der mechanischen Verluste.

Bild 7 zeigt die 1,0 l –Version eines Kurbelschleifenmotors in einem Kleinwagen. Der Motor besitzt folgende äußere Abmessungen in mm:

580x315x300 (Breite x Höhe x Länge).

Die Kompaktheit des Kurbelschleifenmotors könnte beispielsweise in Hybridfahrzeugen genutzt werden, bei denen neben dem Verbrennungsmotor auch der elektrische Antrieb Platz finden muß.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es hat in der Vergangenheit viele Ansätze gegeben, das bestehende Motorenkonzept grundsätzlich zu verändern. Alle Lösungen scheiterten, weil sie konstruktiv zu aufwendig und zu teuer waren oder keine deutlichen Vorteile besaßen.

Mit dem Kurbelschleifenmotor existiert jedoch ein alternativer Antrieb, der gegenüber konventionellen Motoren deutliche Vorteile bezüglich Motorbaugröße, -schwingungen, Geräuschemissionen und mechanischem Wirkungsgrad besitzt. Dauerlaufversuche im Labor und unter realen Betriebsbedingungen (Einsatz in einem Prototypfahrzeug) haben gezeigt, daß dieser Kurbelmechanismus trotz der Linearlager für die Anwendung in Verbrennungsmotoren geeignet ist.

Es bleibt abzuwarten, inwieweit die Kurbelschleifenmotoren bei namhaften Automobilfirmen auf Interesse stoßen und ob der Motor die harten Testkriterien dieser Unternehmen bestehen kann.



Bild 7: 1,0 l –Version eines Kurbelschleifenmotors in einem Kleinwagen /4/

6 Literatur

- /1/ Rosenkranz, H.-G.: Kurbelschleifenmotor als kompakter und laufruhiger Pkw-Antrieb, MTZ Nr. 58, GWV Verlagsgesellschaft mbH, Vieweg Verlag, 1997
- /2/ Otto, St.: Influence of Stroke to Bore Ratio on a Scotch Yoke Engine, Studienarbeit IMW TU Clausthal, 1998
- /3/ Newsletter of CMC Nr. 1/98
- /4/ Newsletter of CMC Nr. 2/98

Thermisches Spritzen in der Luftfahrtindustrie

Grünendick, T.

Thermische Spritzschichten sind heute bei der Gestaltung, Fertigung und Reparatur von Flugtriebwerken unverzichtbar. Sie erfüllen die ökologischen und ökonomischen Anforderungen bei gleichzeitiger hoher Zuverlässigkeit. Der Artikel gibt einen Überblick über die in der Luftfahrtindustrie angewendeten thermischen Spritzverfahren.

Thermal-spray coatings are indispensable in the design, manufacture and repair of numerous components of aero-engines. In most cases they meet the demands regarding economical and ecological requirements as well as for operational dependability. This article gives a general prospect of the most frequently used applications of thermally sprayed coatings in the aircraft industry.

1 Einführung

Die Grundidee des thermischen Spritzens ist auf die Beobachtung von M. Schoop um die Jahrhundertwende zurückzuführen. Beim Schießen mit Bleikugeln prallten mehrere Geschosse gegen eine Mauer und blieben als plattgedrückte Bleimassen haften. Teilweise schlugen die Kugeln dicht nebeneinander auf und bildeten Vereinigungen, die einer Verschweissung glichen.

Auf der Grundlage dieser Beobachtungen entwickelte der Schweizer Ingenieur Schoop eine Metallspritzpistole (1913), welcher der Hauptverdienst an dem Erreichen des heutigen hohen Standes und an den Erfolgen des Metallspritzverfahrens zugeschrieben wird /1/.

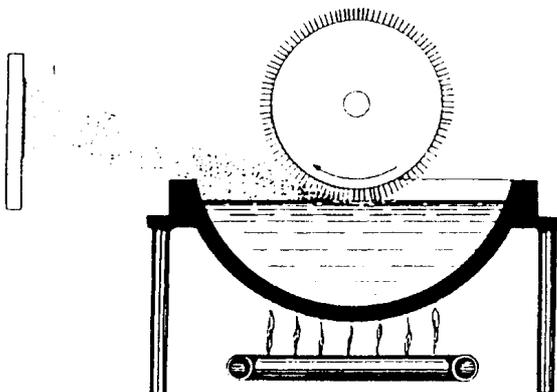


Bild 1: Schematische Darstellung einer Vorrichtung zum Aufschleudern geschmolzenen Metalls durch eine am Umfang mit Nadeln besetzte rotierende Scheibe /2/

Mit der Einführung der Strahltriebwerke in den 60iger Jahren und der Weiterentwicklung der Spritzverfahren wurden thermische Schutzschichten in der Luftfahrt industriell eingesetzt. Der Erfolg der thermischen Spritzschichten war in keiner anderen Branche während der Markteinführung so groß wie hier.

2 Thermische Spritzverfahren

Das thermische Spritzen ist ein Beschichtungsverfahren, bei dem der Spritzzusatz (Pulver oder Draht; Metall oder Keramik) kontinuierlich geschmolzen und mit entsprechender Geschwindigkeit auf die Werkstoffoberfläche geschleudert wird.

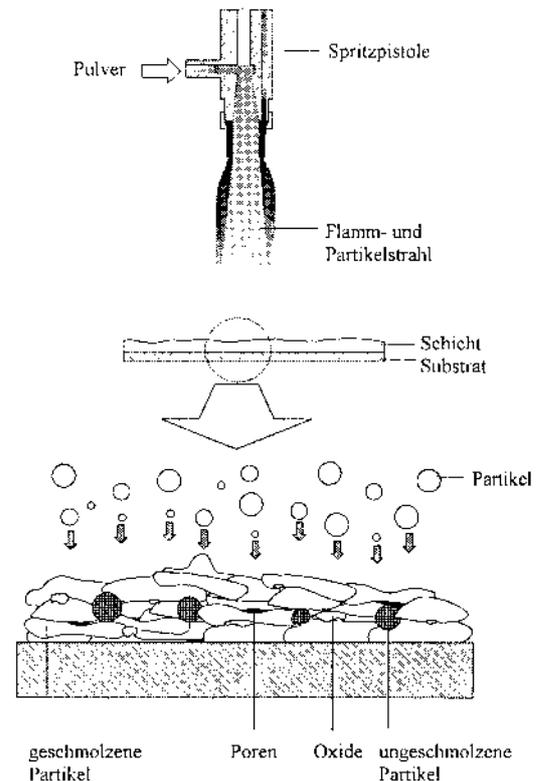


Bild 2: Prozessprinzip /3/

Die dabei entstehende Spritzschicht wird durch nebeneinander und aufeinanderliegende Lagen gebildet, die aus einer Anhäufung von abgeflachten und lamellenförmigen Tröpfchen bestehen (**Bild 2**). Die Spritzschichten sind daher meistens härter, spröder und poröser als der Ausgangswerkstoff.

In der Luftfahrtindustrie werden überwiegend die Verfahren Flamspritzen, Hochgeschwindigkeitsflamspritzen und Plasmaspritzen im Vakuum oder an der Atmosphäre angewendet.

2.1 Flamspritzen

Das Flamspritzen wird zur Oberflächenbeschichtung metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe verwendet. Das Spritzgut, Draht oder Pulver, wird durch eine Acetylen-Sauerstoff-Flamme auf- bzw. angeschmolzen und durch die Ausdehnung des Brenngases in Verbindung mit dem Trägergas auf die Werkstückoberfläche geschleudert (Partikelgeschwindigkeit 50m/Sek). Das Spritzgut ist durch den Drahtvorschub oder die Treibgasmenge dosierbar und wird bestimmt durch die gewünschte Auftragsleistung sowie den Aufschmelzgrad. Das Werkstück wird von der Flamme nicht erfasst und bleibt relativ kalt. Ein typischer Anwendungsfall dieses Beschichtungsverfahrens stellen die Einlaufbeläge im Triebwerksbau dar.

2.2 Hochgeschwindigkeitsflamspritzen

Die Verbrennung beim Hochgeschwindigkeitsflamspritzen erfolgt kontinuierlich in einer Brennkammer (Acetylen, Propan, aber auch flüssige

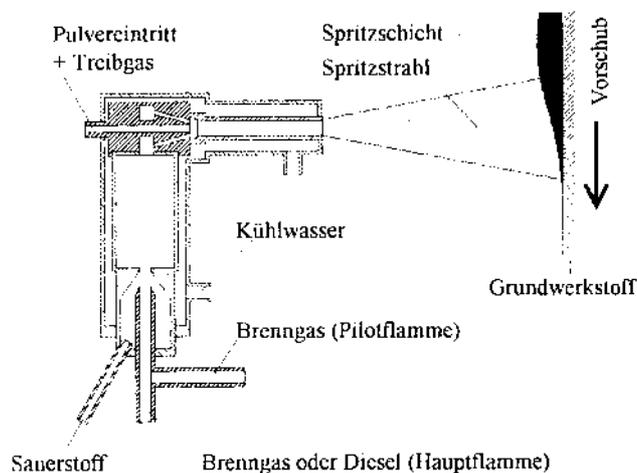


Bild 3: Hochgeschwindigkeitsflamspritzen /1/

Brennstoffe wie Diesel oder Kerosin). Die in der Brennkammer erzeugten Brenngasdrücke von 3-7 bar in Verbindung mit einer nachgeordneten Expansionsdüse bewirken eine besonders hohe Strömungsgeschwindigkeit im Gasstrahl (**Bild 3**). Der pulverförmige Spritzzusatz wird in den Gasstrahl mittig eingeführt, beschleunigt und mit sehr hoher Geschwindigkeit auf das Bauteil geschleudert (550 m/Sek) /4/.

Die hohe kinetische Energie und die begrenzte thermische Belastung des Spritzpulvers ermöglicht bei diesem Verfahren sehr porenarme Schichten und vermindert beispielsweise bei Verschleisschutzschichten die Umwandlung von Karbiden in Mischkarbide (WC/Co und $Cr_3C_2/NiCr$).

2.3 Plasmaspritzen

Das Plasmaspritzen, atmosphärisch oder in Vakuumkammern, ist ein Beschichtungsverfahren, bei dem der pulverförmige Spritzzusatz in oder außerhalb der Spritzpistole durch die Plasmaflamme auf- bzw. angeschmolzen und auf die Werkstoffoberfläche geschleudert wird (Partikelgeschwindigkeit 450m/Sek). Das Plasma wird durch einen Lichtbogen erzeugt, der zwischen einer stabförmigen,

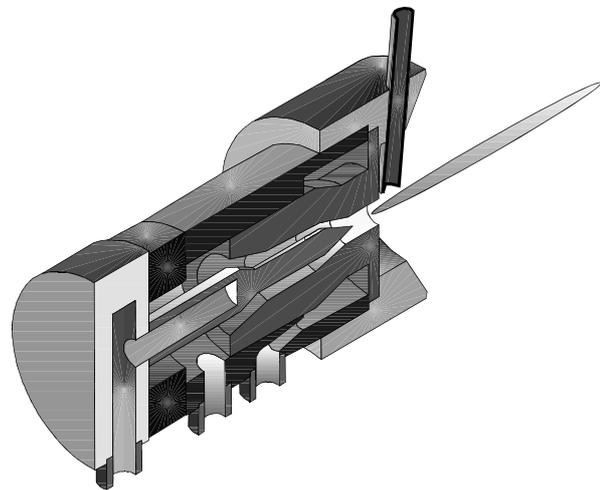


Bild 4: Schematische Darstellung eines Plasmaabrenners /5/

zentrisch angeordneten Wolframkathode, einer ringförmigen, wassergekühlten Kupferanode und von den Plasmagasen (Ar, He, H oder N), gewöhnlich Argon mit einem Zusatz Wasserstoff, umströmt wird (**Bild 4**). Dieser Lichtbogen gibt einen Großteil seiner Wärmeenergie an das Plasmagas ab, das dadurch ionisiert und in den Plasmazustand überführt wird. Bei der Rekombination wird die aufgenommene Wärmeenergie wieder abgegeben, ein elektrisch neutraler Plasmastrahl verlässt die Brenndüse mit hoher Temperatur (bis 20 000 K). Das durch ein Treibgas angesaugte Pulver wird meist verfahrensbedingt in oder außerhalb der Spritzpistole der Plasmaflamme zugeführt und je nach Verweildauer in der Flamme an- oder/und aufgeschmolzen. Das Werkstück wird von der

Flamme nicht direkt erfasst und zusätzlich intensiv gekühlt, /6/. Die Bauteiltemperatur liegt zwischen 100 und 350°C. Plasmaschichten zeichnen sich durch eine hohe Haft-Zugfestigkeit (20-70 MPa) und durch eine gezielt einstellbare Porosität von 1-20% aus.

Ein typischer Anwendungsfall dieses Beschichtungsverfahrens stellen die Wärmedämmschichten, Haftsichten, Heißgaskorrosionsschutzschichten und Verschleisschutzschichten im Triebwerksbau dar.



Bild 5: Maskiertes Bauteil während des Plasmaspritzvorganges /7/

Das Plasmaspritzen wird an der Atmosphäre oder in Vakuumkammern durchgeführt, hierbei hat sich der Betrieb im Vakuum für sehr reaktive Materialien bestens bewährt. Eine weitere Variante des Plasmaspritzens ist es, den Spritzprozess in Kammern mit einer inerten oder druckkontrollierten Atmosphäre ablaufen zu lassen. Keine oder wenige Oxide in der Spritzschicht sowie sehr reine Spritzschichten sind hier zu erwarten /4/.

3 Der Spritzablauf

Bevor die zu beschichtenden Bereiche den thermischen Spritzprozess durchlaufen, müssen die betroffenen Stellen von möglichen Verunreinigungen gesäubert, maskiert und entsprechend oberflächenbehandelt werden. Die Maskierung von Bauteilzonen dient zur Abgrenzung von Schichtflächen und Bereichen, die vom Spritzstrahl nicht erfasst

werden sollen. Auch beim Vorbereiten der Bauteiloberfläche durch Strahlen mit Al_2O_3 benutzt man Abdeckungen, die aus Klebebändern oder metallischen Abdeckungen bestehen.

Für das thermische Spritzen kommen Auflagemasken zur Anwendung, die aus Klebebändern, Silikonmassen und Silikonringen bestehen oder metallische Schattenmasken, die konturgerecht dem Bauteil angepasst sind und durch Abstandszonen ein Anhaften der Schicht mit der Maskierung verhindern sowie die nicht zu beschichtenden Bereiche schützen (**Bild 5**).

Beim thermischen Spritzen ist das Vorbehandeln der Oberfläche der wichtigste Arbeitsgang. Durch eine gute Präparation der Oberfläche lässt sich die Haft-Zugfestigkeit und die Güte der Schicht deutlich steigern. Zu einer guten Vorbehandlung zählen fettfreie und metallisch saubere Oberflächen, aber auch solche, die mit scharfkantigem, sauberem

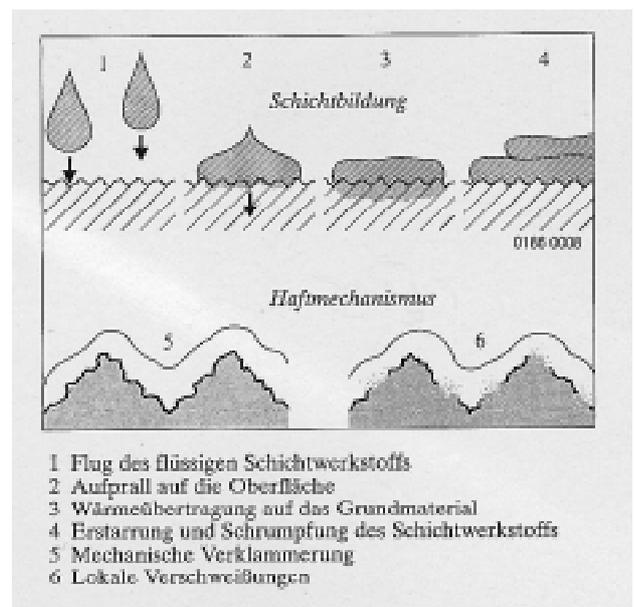


Bild 6: Haftmechanismus /8/

Strahlgut gestrahlt eine optimale Rauigkeit sowie große Haftungsoberflächen gewährleisten.

Um die Haft-Zugfestigkeit durch Oxidation oder andere Umwelteinflüsse nicht zu vermindern, muss das frisch gestrahlte Bauteil verzugslos mit einem thermischen Spritzverfahren beschichtet werden. Die hochaktive Kraterlandschaft, die eine frisch gestrahlte Oberfläche aufweist, begünstigt Diffusionsvorgänge, Mikroschweißungen und mechanische Verklammerungen (**Bild 6**).

Hat das zu beschichtende Bauteil die gewünschte, mit einer Rauigkeitsmessung überprüfte Oberflächenbeschaffenheit, wird das Werkstück maskiert, gegebenenfalls vorgewärmt (max. 150°C), in der Spritzkabine auf dem Handhabungssystem befe-



Bild 7: Roboter mit Handlingsystem beim Plasmaspritzen einer Triebwerksbrennkammer /5/

stigt und dem Spritzprozess zugeführt. Das Handhabungssystem ermöglicht das Abfahren der Bauteilkontur unter Einhaltung des vorgegebenen Spritzabstandes. Dieses Handlingsystem ist meist ein integriertes System, bei dem der Roboter mit externen Achsen und einer Verfahreinheit mit der Spritzanlagensteuerung komplett verknüpft ist. Damit wird es möglich, über die Spritzanlagensteuerung einen vollautomatischen Spritzprozess, nebst Zündung der Brenner, durchzuführen. Die speziellen Werkstückaufnahmen fördern die Reproduzierbarkeit und unterstützen die Automatisierung.

Die Spritzanlage sollte in einer Schallschutzkabine untergebracht sein, die gleichzeitig über die Filtereinheit eine wirksame Entsorgung der Spritzstäube -gemäß den gesetzlichen Bestimmungen- gewährleistet.

Nach der Bestückung der Spritzkabine erfolgt der festgelegte Arbeitsablauf vollautomatisch gemäß den Vorgabedaten: Spritzverfahren, Spritzwerkstoff, Spritzpistole, Anlagenparameter (Gase, Abstände, Durchsatz), Bewegungsabläufe und Anzahl der Spritzlagen.

Die Eigenschaften von Spritzschichten ergeben sich aus dem Spritzverfahren, dem Spritzzusatz und den Spritzbedingungen. Ebenso ist es die große Anzahl von Faktoren, die auf die flüssigen Spritzteilchen einwirken und die Art und Weise, wie

sich die Spritzschicht lagenweise aufbaut, die den Charakter und die Eigenschaften der Schicht bestimmen.

Allen Spritzverfahren ist gemeinsam, dass schmelzflüssige Metallteilchen im hocherhitzten Zustand einen Weg zurücklegen, auf dem sie verschiedenen Gasen und der sie umgebenden Atmosphäre ausgesetzt sind. Den größten Einfluss auf die schmelzflüssigen Teilchen hat dabei der Sauerstoff, zu dem die meisten Metalle eine hohe Affinität besitzen. Deshalb sind die Spritzteilchen fast ausnahmslos mit einem Oxidfilm umgeben. Dieser noch weiche oder flüssige Oxidfilm ist einerseits eine Komponente des komplizierten Haftmechanismus und andererseits ein Härtebildner, der für die stets größere Mikrohärtigkeit der Spritzschichten von Bedeutung ist.

Beim thermischen Spritzen ist das intensive Anschmelzen nur dann gewährleistet, wenn Wärmeenergie, Korngröße und die Aufenthaltszeit der Pulverkörner in der Flamme aufeinander abgestimmt sind. Enge Korn-

größenbereiche, gleichmäßige Förderleistung und genau definierte Pulverkornformen sowie Gasmenngen (im gasförmigen Zustand) sind daher wichtige Voraussetzungen.

Neben den aufgeführten Einflussgrößen für den Aufbau der Spritzschicht ist die Geschwindigkeit, mit der die Spritzteilchen aufschlagen, von Bedeutung. Je höher diese kinetische Energie ist, desto stärker werden die Tropfen in der Kraterlandschaft der vorbereiteten Oberfläche und in die bereits aufgebaute Schicht hineingeschossen. Die Tropfen

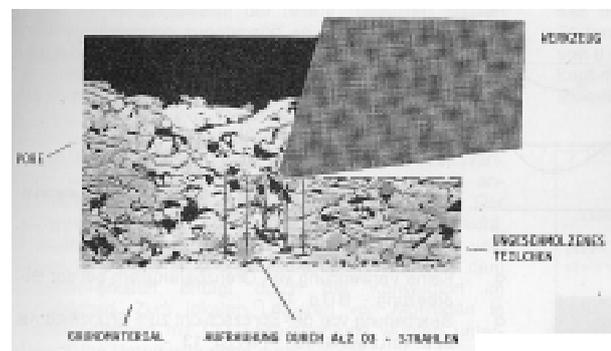


Bild 8: Bearbeitung einer Spritzschicht /9/

verflachen und gehen mit anderen Teilchen Verbindungen ein, die mit Diffundieren, lokalem Verschweißen, Verkralen, Zersprätzen und Versintern erklärt werden (**Bild 6**).

In den meisten Anwendungsfällen werden die Spritzschichten mit einer Zugabe gespritzt, die durch mechanische Nachbehandlung auf Maß gebracht werden muss. Spritzschichten können durch Drehen, Hobeln, Fräsen und Schleifen bearbeitet werden. Um ein Zerstören der Schicht zu vermeiden, muss die Belastung beim mechanischen Bearbeiten minimiert werden. Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe und vor allem die Vorschübe sind gering zu halten. Zusätzlich muss der Drehmeißel, der durch Oxideinschlüsse und teilweise Aufhärtung der Spritzteilchen stärker beansprucht wird, entsprechend angepasst werden (**Bild 8**). Beim Schleifen wird die Spritzschicht insgesamt weniger belastet /9/.

Die Prozessqualität wird durch Proben, die überwiegend bauteilrepräsentativ sind, sichergestellt. Es werden je nach Schichttyp metallographische Prüfungen (Gefüge, Schichtdicke, Verunreinigung) und /oder mechanische Prüfungen (Härte, Haftzugfestigkeit, Biegeprüfung) durchgeführt /10/.

4 Anwendungen aus der Triebwerkstechnik

Durch den gezielten Einsatz hochwertiger Metall- und Keramikbeschichtungen mittels thermischer Spritzverfahren werden hochbeanspruchte Funktionsflächen von Triebwerkskomponenten geschützt und die Wiederverwendbarkeit abgenutzter Triebwerksteile ermöglicht sowie deren Standzeit wesentlich erhöht.

Die Eigenschaften dieser Spritzschichten werden jedoch nicht nur durch die Werkstoffzusammensetzung bestimmt, sondern hängen ganz wesentlich von der Schichtstruktur ab, die durch unterschiedliche Spritzparameter erheblich variiert werden kann. So wird zum Beispiel eine Ni5Al-Schicht plasmagespritzt als Maßkorrekturschicht verwendet und flammgespritzt als Einlaufbelag eingesetzt.

Es kommen folgende Schichttypen zur Anwendung:

- Anstreichschichten (Einlauf- und Anlaufschichten)
- Verschleisschutzschichten
- Heißgaskorrosionsschutzschichten
- Wärmedämmschichten
- Maßkorrekturschichten

4.1 Anstreichschichten (Einlauf- und Anlaufschichten)

Um bei Flugtriebwerken einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erzielen, müssen die Spaltverluste (Gasleckage) zwischen den stehenden (Statoren) und den rotierenden (Rotoren) Triebwerksbauteilen sehr klein gehalten werden. Der Spalt ist dann am geringsten, wenn er durch Einschleifen der Komponenten erst im Betrieb entsteht und dabei möglichst nur das statische Teil abgetragen wird (**Bild 10**).

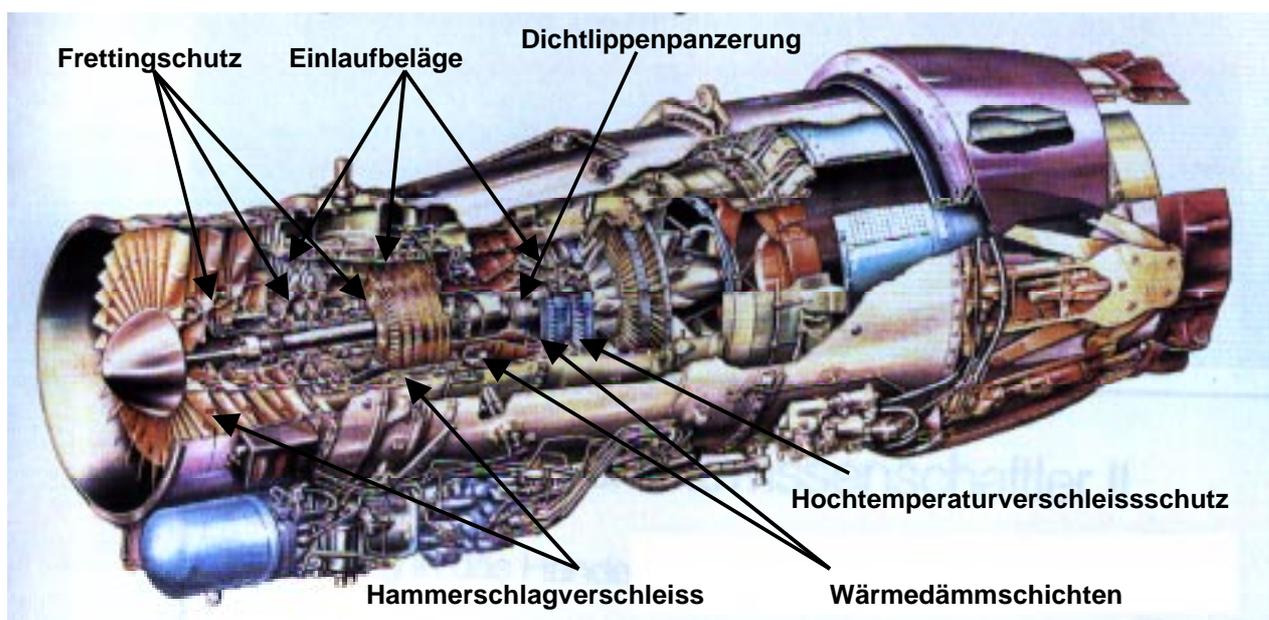


Bild 9: Funktionsteile mit thermisch gespritzten Schichten

Auf dem Stator wird daher eine leicht abreibbare Schicht aufgespritzt, der sog. Einlaufbelag. Hier werden neben den flammgespritzten Nickel/Graphit-Schichten, die eine hohe Porosität und gute Trockenschmierstoffeigenschaften aufweisen, auch plasmagespritzte Aluminium/Polyester-Schichten eingesetzt. Aluminium/Polyester-Schichten zeichnen sich durch eine sehr gute Erosionsbeständigkeit aus (Bild 11).

Die Kontaktfläche des rotierenden Bauteils wird mit einer verschleissbeständigen, abrasiv wirkenden Anlaufschicht gepanzert, da ansonsten durch den Materialabtrag eine erhebliche Unwucht des Bauteils entstehen würde. Die Gegenpartner der Ein-

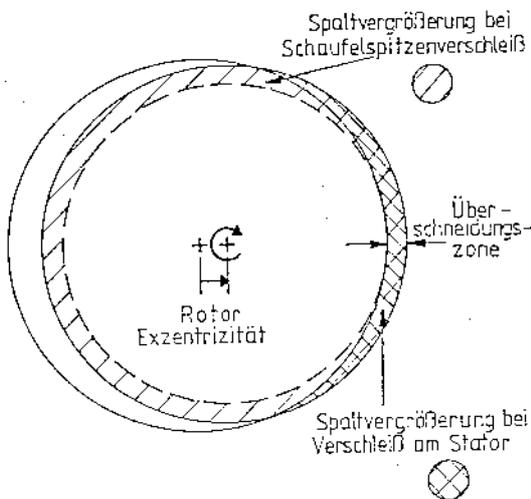


Bild 10: Verkleinerung des Spaltes durch Einlaufbeläge am Stator-Gehäuse /11/

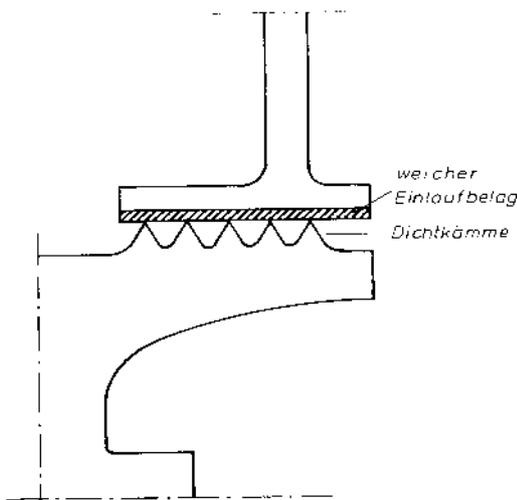


Bild 11: Prinzip einer einfachen Labyrinthdichtung zwischen Scheibe und Dichtungsträger /11/

laufbeläge werden mit harten plasmagespritzten Keramiksichten (Al_2O_3 , $3TiO_2$) unter Verwendung ei-

ner geeigneten metallischen Haftschrift (NiAl, NiCr) beschichtet.

4.2 Verschleisschutzschichten

Für die Herstellung von Verschleiss-Schutzschichten wird meist eine hohe Haftfestigkeit gefordert, die mit den Verfahren Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HGFS), Niederdruck- (NDPS) und atmospharisches Plasmaspritzen (APS) gewährleistet wird. Typische Verschleisschutzschichten werden zum Schutz gegen Hammer-schlagverschleiss, Fretting, Erosion und Material-

Verschleissart	Schichtwerkstoff	Verfahren	Bemerkungen
Hammerschlagverschleiss	WC/Co, $Cr_3C_2/NiCr$	HGFS	Schwingungsbedingtes Anstoßen von Schaufeln gegeneinander
Fretting	CuNiIn	APS	Verschleiss der Schaufelfüße durch Eigenschwingung der Schaufel
Erosion	WC/Co, $Cr_3C_2/NiCr$	HGFS	Furchender Verschleiss durch streifende Partikel im Gasstrom
Materialabtrag bei form- und kraftschlüssigen Verbindungen	WC/Co, $Cr_3C_2/NiCr$	APS	Materialabtrag bei Passungen, Flanschen und Lagersitzen

Tabelle 1: Thermisch gespritzte Verschleisschutzschichten.

abtrag bei form- und kraftschlüssigen Verbindungen aufgetragen /11/. **Tabelle 1** zeigt die üblicherweise verwendeten Werkstoffe und Verfahren.



Bild 12: Verschleisschutzschicht aus Chromkarbid-Nickelaluminium an einer Turbinenleit-schaufel /7/

4.3 Heißgaskorrosionsschutzschichten

Zur Reduzierung des Gewichtes und Erhöhung der Betriebstemperaturen werden moderne Superlegierungen im Heißbereich eines Triebwerkes eingesetzt. Diese Werkstoffe sind dennoch nicht in der Lage, gleichzeitig die beschleunigte Korrosions-/Oxidationsneigung und die Abnahme der Festigkeit



Bild 13: Heißgaskorrosions - Oxidationsschutzschicht, MCrAlY-Schicht /7/

bei hoher Temperatur zu verhindern. Durch Aufbringen von speziellen oxidationsbeständigen Legierungen vom Typ MCrAlY (M = Co, Ni) mittels NDPS oder Plasmaspritzen in kontrollierter Atmo-

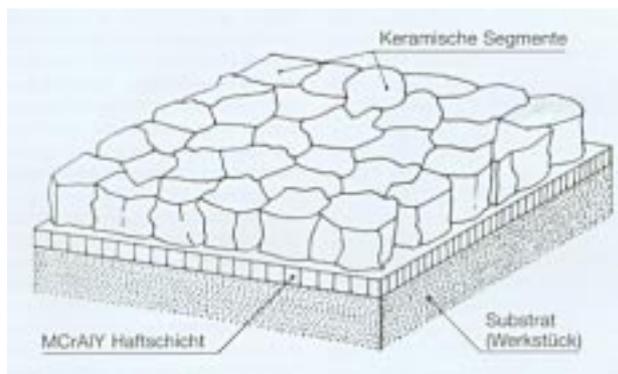


Bild 14: Segmentierte Wärmedämmschicht /12/

sphäre können diese Funktionsflächen geschützt werden (**Bild 13**). Oft dient diese Schicht als oxidationsbeständige Grundsicht, auf der anschließend eine thermisch isolierende keramische Deckschicht aufgespritzt wird (**Bild 14**).

4.4 Wärmedämmschichten

Durch das zusätzliche Auftragen von wärmedämmenden Keramiksichten auf korrosionsbeständi-



Bild 15: Mit Zirkoniumoxid beschichtete Brennkammer /5/

gen Haftsichten kann, allerdings nur in Verbindung mit Kühlung von innen, die Bauteilwerkstofftemperatur erniedrigt und damit die Festigkeit erhalten werden. Als keramischer Werkstoff wird meist ZrO_2 mit verschiedenen Stabilisatoren (Y_2O_3 , früher CaO , MgO) verwendet. /12/

Erwünscht sind bei den Wärmedämmschichten vertikale Risse (**Bild 14**), die sich jedoch beim Einsatz unter höchsten Temperaturen als negativ herausstellen. Flüssige Phasen (Sand aus Verdichtertluft), die sich auf der Oberfläche ablagern, setzen die Risse zu und verhindern ihr Schließen bei Abkühlung. **Bild 15** zeigt eine typische Anwendung einer Wärmedämmschicht.

4.5 Maßkorrekturschichten

Maßliche Abweichungen von teuren Triebwerksbauteilen, bedingt durch Konstruktionsänderungen oder Fertigungsfehler, können mittels Rekonditionierung korrigiert werden (**Bild 16**). Die Spritzschichten müssen dabei vergleichbare mechanische, thermische und fertigungstechnische Eigenschaften wie das Substrat (Werkstück) aufweisen. Zur Anwendung kommen die Werkstoffe NiAl, NiCr und Tribaloy.

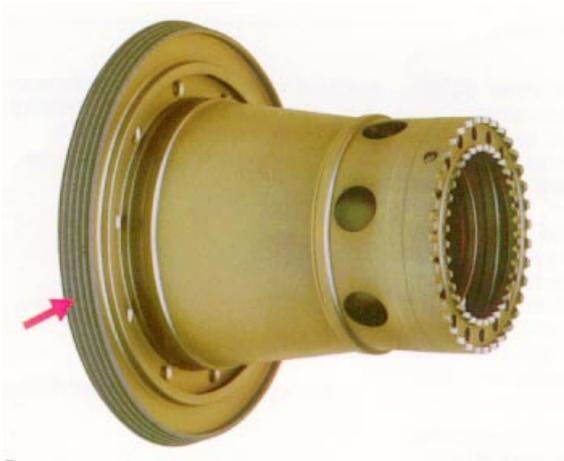


Bild 16: Maßkorrekturschicht aus Aluminimoxid und Titanoxid an den Dichtstegen einer Verdichterwelle /7/

Große Schichtdicken, aber nur geringe Festigkeit und Haftung, werden mit dem Flammgespritzverfahren realisiert. Werden mittlere Haftfestigkeiten und nur mit speziellen Spritzwerkstoffen ausreichende Schichtdicken gefordert, so empfiehlt sich das atmosphärische Plasmaspritzen. Mit dem Hochgeschwindigkeitsspritzen, das in jüngster Zeit zunehmend zum Einsatz kommt, lassen sich häufig artgleiche Spritzwerkstoffe verwenden und große Schichtdicken wegen guter Haftung, bedingt durch Druckeigenstressungen, erzielen /11/.

5 Zusammenfassung

Der Hauptschwerpunkt thermisch gespritzter Schichten liegt nach wie vor in der Luftfahrtindustrie (48%). Aber auch in anderen Industriezweigen gewinnt dieses Beschichtungsverfahren an Bedeutung, z.B. Kraftfahrzeug (5%), Chemie (10%) und Metallverarbeitung (21%). Dies begründet sich in den ökonomischen und technischen Vorteilen, die von thermisch gespritzten Schichten ausgehen. Sie ermöglichen neben einer hohen Wertschöpfung auch neue Produktinnovationen. Weitere intensive Forschungen, z.B. thermische Spritzschichten auf Magnesium, werden der Industrie auch in der Zukunft neue Anwendungsbereiche eröffnen.

6 Literatur

/1/ Steffens, H.-D., Gramlich M.; Entwicklung und technische Nutzung thermischer Spritzverfahren, Jahrbuch Schweißtechnik '97, Düsseldorf 1996

- /2/ Schoop, M. U.: Handbuch der Metallspritz-Technik, Rascher & Cie, AG Verlag, Zürich 1935
- /3/ Voggenreiter, H.: Haftmechanismen beim thermischen Spritzen, SLV München, München 1996
- /4/ Thermisches Spritzen, DIN EN 657, Juni 1994
- /5/ Müller, N.: Grundlagen des Plasmaspritzens, SLV München, München 1996
- /6/ Heinrich, P.: Thermisches Spritzen, Fakten und Stand der Technik, Sonderdruck 10/92, Linde AG, Höllriegelskreuth 1992
- /7/ Thermisches Spritzen, MTU München, München 1983
- /8/ Funktionelle Beschichtungen durch Plasmaspritzens, Plasma Technik AG, Wohlen 1972
- /9/ Hibler, A.: Mechanisches Bearbeiten von thermischen Spritzschichten, DVS Berichte 175, Düsseldorf 1996
- /10/ Thermisch gespritzte Bauteile, DIN 65144, April 1986
- /11/ Schweitzer, K.: Oberflächenbeanspruchung und geeignete Spritzwerkstoffe bei Fluggas-turbinen, SLV München, München 1996
- /12/ Adam, P.: Wärmedämmschichten in Luft-triebswerken, MTU Focus, München 1989

Stahlauswahl für Konstrukteure im Internet

Große, A.

Ziel des Projektes "Rechnergestützte Stahlauswahlmethodik für Konstrukteure" ist die Entwicklung eines Systems zur Stahlauswahl im Internet. Damit soll der Konstrukteur in Abhängigkeit von seiner aktuellen Aufgabe zum optimalen Werkstoff geführt werden. Nach einem Überblick über technische Möglichkeiten zur Integration von Datenbanken und Web-Technologie wird das erarbeitete Stahlauswahlkonzept vorgestellt. Dabei werden erforderliche Komponenten und die Vorgehensweise bei der Stahlauswahl sowie der Stand der Arbeiten beschrieben. Abschließend wird ein kurzer Ausblick auf die zukünftigen Aufgaben gegeben.

The aim of the research project "Computer-Aided Methodology for Steel Selection for the Designer" is the development of a system for the steel selection using the internet. With it, the designer shall be lead to the optimal material for his actual task. After an overview about the technical potentialities for the integration of databases and web technology is given, the worked out concept for the steel selection is presented. Required components and the approach to get the best steel as well as the state of the work are described. The article ends with a short outlook for the tasks of the future.

1 Einführung

Die Werkstoffauswahl stellt eine wesentliche Aufgabe für den Konstrukteur dar, denn sie bestimmt die Tragfähigkeit und Lebensdauer der Produkte ebenso wie deren wirtschaftliche Herstellung. Bei der Werkstoffauswahl erfährt der Konstrukteur keine nennenswerte methodische Unterstützung, hinzu kommen Informationsdefizite, die sich erheblich auf die Entscheidungssicherheit auswirken.

Um dem Konstrukteur ein Werkzeug an die Hand zu geben mit dem er für die entsprechende Konstruktionsaufgabe zum optimalen Werkstoff geführt wird und sämtliche relevanten Werkstoffinformationen binnen kürzester Zeit zur Verfügung hat wird im Rahmen des Projektes "Rechnergestützte Stahlauswahlmethodik für Konstrukteure" am Institut für Maschinenwesen eine Methodik und ein System zur Stahlauswahl entwickelt. Das Projekt wird von der Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. in

Düsseldorf gefördert und von mehreren industriellen Projektpartnern und Verbänden begleitet.

2 Stahlauswahl im Internet

Die Umsetzung der erarbeiteten Methodik zur Stahlauswahl erfolgt im Internet. Die Internet- oder Web-Technologie weist gegenüber konventionellen Anwendungen einige Vorteile auf:

- Stahlauswahl wird einer großen Anzahl von Nutzern zugänglich gemacht
- Plattformunabhängigkeit auf der Seite des Anwenders
- keine Programminstallation durch den Anwender notwendig, lediglich ein Browser wie z.B. Netscape oder Internet Explorer muß vorhanden sein
- Stahlauswahl funktioniert sowohl im Internet als auch im (firmeneigenen) Intranet
- mehrere Werkstoffdatenbanken können auf einfache Weise eingebunden werden und ergeben eine hohe Informationsdichte
- Unternehmen müssen keine Werkstoffdatenbanken kaufen, sondern bezahlen pro Zugriff (dies wirkt sich besonders kostensparend bei geringerer Nutzung der Stahlauswahl aus)

Auf dem Markt der Web-Technologie ist derzeit eine äußerst rasante Entwicklung zu verzeichnen. Um bei der Implementierung der Stahlauswahl im Internet auch für die weitere Zukunft gerüstet zu sein, erfolgte zunächst eine eingehende Analyse der webtechnischen Möglichkeiten und grundsätzlicher Architekturen. In den folgenden Kapiteln sollen generelle Konzepte zur Integration von Datenbanken und Internettechnologie sowie konkret das für die Stahlauswahl gewählte Konzept beschrieben werden.

2.1 Konzepte zur Integration von Datenbanken und Web-Technik

Die einfachste Lösung zur Integration von Datenbank und Web-Technik ist die Verwendung eines CGI-Skriptes (Common Gateway Interface), das

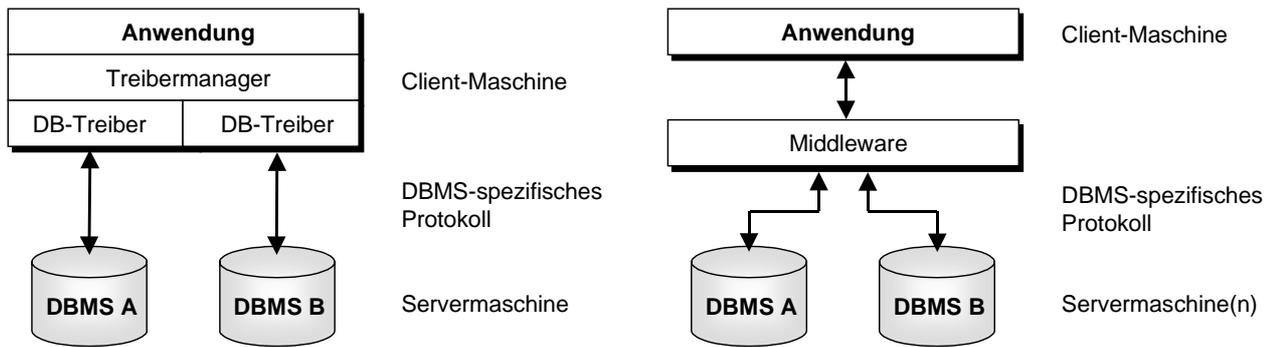


Bild 1: Zwei- und Drei-Schichten-Modell zur Integration von Datenbanken und Web-Technik /2/

meist in einer Skript-Sprache wie PERL programmiert wird. Dabei werden Inhalte aus einer Datenbank zum WWW-Frontend - dem Web Browser - transportiert. Über das CGI startet der Benutzer ein Programm auf dem Web Server. Dessen Output, etwa das Ergebnis einer Datenbankabfrage oder auch eine Fehlermeldung, kommt als formatiertes HTML (**H**yper**T**ext **M**arkup **L**anguage) an den Browser zurück. Als nachteilig ist dabei anzusehen, daß jeder CGI-Aufruf einen separaten Prozeß benötigt. Jedesmal, wenn der Anwender eine Anfrage startet, macht das CGI-Skript eine Datenbankverbindung auf und veranlaßt das angesprochene System, den Request zu beantworten. Für große Anwendungen ist diese Technik daher nur sehr begrenzt zu empfehlen. Ferner muß für jede anzusprechende Datenbank ein eigenes, angepaßtes CGI-Skript geschrieben werden /1/.

Eine weitaus bessere Lösung stellt die Integration von Werkstoffdatenbanken und Web-Technologie mit Hilfe von JAVA dar. Dabei muß sich der Entwickler erst einmal von der Zwei-Schichten-Architektur, d.h. Browser mit direktem Zugriff auf eine Datenbank, lösen und mindestens einen dritten Software-Layer, der üblicherweise als Middleware bezeichnet wird, einführen. Damit die Anwendungen möglichst unabhängig vom Frontend, den eingesetzten Betriebssystemen und den Datenquellen werden, muß jede einzelne Schicht sauberlich von der anderen getrennt sein und über Standardschnittstellen kommunizieren.

In **Bild 1** ist eine Gegenüberstellung des Zwei-Schichten- und des Drei-Schichten-Modells vorgenommen.

Auf der linken Seite ist das Zwei-Schichten-Modell dargestellt. Dieses Modell hat eine Reihe von

Nachteilen. Beispielsweise muß der Client für alle Datenbankserver auf die er zugreifen soll Treiber enthalten. Bei einer festen Zuordnung eines Datenbankmanagementsystems DBMS (wie z.B. Oracle) ist das auch kein Problem. Will man sich jedoch nicht an einen bestimmten Hersteller binden und soll die Anwendung mit verschiedenen DBMS zusammenarbeiten können, ist der Entwickler gefordert, seine Anwendungen unabhängig vom gerade genutzten DBMS zu erstellen. In diesem Fall muß er für jedes benutzte DBMS einen Treiber einbinden oder dafür sorgen, daß der nötige Treiber dynamisch geladen wird.

Dagegen führt das Drei-Schichten-Modell zwischen Client und Server eine weitere Schicht (Middleware) ein, die den Client vom DBMS unabhängig macht und die oben genannten Probleme vermeidet. Die Middleware unterhält sich mit dem Client per ODBC (**O**pen **D**ata**B**ase **C**onnectivity) und unterstützt nach unten hin verschiedene Datenbankserver. Alle drei Schichten sind unabhängig voneinander und können prinzipiell auf unterschiedlichen Rechnern laufen.

ODBC ist eine von Microsoft standardisierte Schnittstelle für Datenbanken. Sie ermöglicht über eine einheitliche Schnittstelle den Zugriff auf Datenbanken, die ihrerseits über einen ODBC-Treiber verfügen. Dazu gehören mittlerweile alle wichtigen am Markt vertretenen Datenbanken wie beispielsweise dBase, Oracle, SQL-Server (**S**tructured **Q**uery **L**anguage), FoxPro oder MS Access.

Analog zu ODBC bietet JAVA JDBC (**J**ava **D**ata**B**ase **C**onnectivity) an. Der JDBC-Treibermanager verwaltet die verschiedenen jeweils eingesetzten DBMS-Treiber, **Bild 2**.

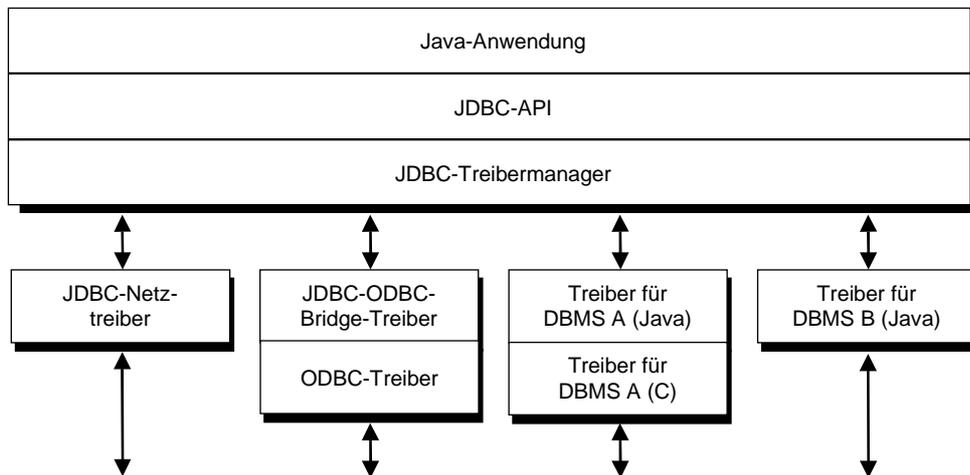


Bild 2: Vier Kommunikationsmöglichkeiten des JDBC-Treibermanagers mit DBMS /2/

Im ersten Fall ist der JAVA-Netztreiber komplett in JAVA geschrieben und kommuniziert über ein standardisiertes Protokoll mit dem DBMS. Da ein solches Protokoll gegenwärtig nicht existiert, sind Treiber dieses Typs noch nicht verfügbar.

Eine einfache Möglichkeit, um alle relevanten Datenbanksysteme sofort unter JAVA zugänglich zu machen, ist der JDBC-ODBC-Bridge-Treiber. Er bildet eine Brücke zwischen JAVA-Programm und einem bestehenden ODBC-Treiber und greift auf dessen Fähigkeiten zurück.

Die dritte Variante setzt auf einem bestehenden DBMS-spezifischen Treiber auf und bietet nach oben hin das JDBC-API (Application Programming Interface). Wie die JDBC-ODBC-Bridge ist dies eine schnell zu implementierende Lösung, da sie vorhandene Treiber nutzt. Sie ist aber nicht plattformunabhängig.

Die letzte Möglichkeit erfordert eine Neuimplementierung des DBMS-Treibers durch den Hersteller. JAVA soll dabei für die Plattformunabhängigkeit des Treibers sorgen.

Im Hinblick auf die Nutzung unterschiedlicher Werkstoffdatenbanken und einer eventuellen späteren Erweiterung des Stahlauswahlsystems durch Hinzunahme weiterer Werkstoffdatenbanken wurde für die Arbeiten das flexiblere Drei-Schicht-Konzept gewählt. Für den Treibermanager wurde die JDBC-ODBC-Bridge-Variante aufgrund ihrer einfachen Implementierung angewendet. Dies ist ohne Probleme möglich, da die Werkstoffdatenbanken üblicherweise auf PC-/Windows-Basis sind und in der Regel auch über eine ODBC-Schnittstelle verfügen.

2.2 Konzept zur Stahlauswahl

Es gibt eine Reihe kommerzieller, herstellerunabhängiger Werkstoffdatenbanken, deren Dateninhalte meist recht unterschiedlicher Art sind. Die Datenbanken haben beispielsweise Wärmebehandlungsangaben oder dynamische Festigkeitseigenschaften als Schwerpunkt. Sie sind häufig auch nicht vollständig. Daher bietet eine einzelne Datenbank längst nicht alle für den Konstrukteur relevanten Werkstoffinformationen.

Um eine möglichst große Bandbreite an Werkstoffinformationen zu vereinen, sollten also mehrere Werkstoffdatenbanken herangezogen werden.

Für die Integration verschiedener Datenbanken ist die Web-Technologie geradezu prädestiniert, denn mit JAVA, JDBC und ODBC kann die Problematik der verschiedenen Plattformen, Datenformate usw. einfach gelöst werden. Neben diesen Implementierungsvorteilen existieren die eingangs schon erwähnten Vorteile der Stahlauswahl im Internet.

In **Bild 3** ist das Internetkonzept für die Stahlauswahl mit den erforderlichen Komponenten zu sehen.

Am Konstruktionsarbeitsplatz gibt der Konstrukteur über einen Web Browser seine Anforderungen an den Werkstoff zur aktuellen Konstruktionsaufgabe in einem vorbereiteten HTML-Formular vor. Diese Angaben werden an den Web Server geschickt und an den Web Application Server weitergeleitet. Dieser sitzt zwischen Web Server und Datenbank Server und stellt spezielle Dienste für den Web Server bereit. Er erledigt beispielsweise den Zugriff auf die verschiedenen Datenquellen.

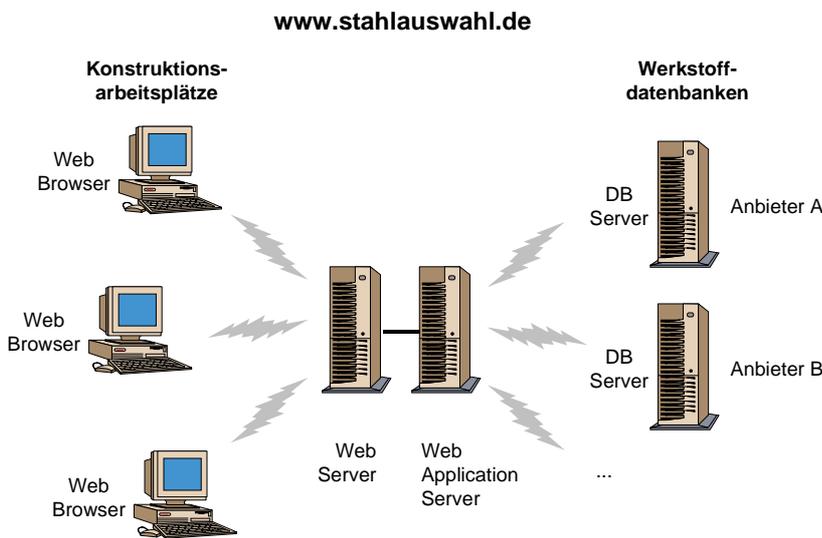


Bild 3: Konzept zur Stahlauswahl im Internet

Den Kern des Stahlauswahlsystems stellt das auf dem Web Application Server laufende Servlet dar. Ein Servlet ist eine JAVA Anwendung, die auf dem Web Server läuft und damit eine Installation von Komponenten auf der Anwenderseite vermeidet. Dieses verarbeitet die vom Konstrukteur vorgegebenen Werkstoffanforderungen, generiert daraus die Datenbankabfragen und bereitet die Abfrageergebnisse zur Darstellung auf dem Web Browser als HTML-Formular auf. Als ein weiteres Modul des Systems wurde eine Meta-Datenbank eingeführt, die zum einen die Leistungsinhalte der verfügbaren Werkstoffdatenbanken verwaltet und zum anderen die Steuerung für den Zugriff auf die einzelne Werkstoffdatenbank beinhaltet, da diese häufig modular aufgebaut sind. Durch Änderung der Datenfelder dieser zusätzlich eingeführten Datenbank ist es leicht möglich auf Modifizierungen zu reagieren und damit den administrativen Aufwand erheblich zu reduzieren. Auch die Integration neuer Werkstoffdatenbanken in das bestehende Konzept ist damit auf einfache Weise durchführbar.

3 Stahlauswahlmethodik

Mit Hilfe der Methodik zur Stahlauswahl sollen relevante Informationen bereitgestellt und damit eine verbesserte Entscheidungsgrundlage für den Konstrukteur geschaffen werden.

Bei der konventionellen Arbeit mit Werkstoffdatenbanken formuliert der Anwender üblicherweise eine Abfrage mit den gewünschten Werkstoffeigenschaften und gelangt auf diese Weise zu dem geeigneten Werkstoff. Diese Vorgehensweise setzt

aber umfangreiches Werkstoffwissen des Anwenders voraus. Eine Vorgabe von Eigenschaften wie Zugfestigkeit stellt in der Regel auch kein Problem dar, schwieriger wird es aber schon bei Kennwerten zur Beschreibung der Verarbeitungseignung für verschiedene Fertigungsverfahren. Diese Kennwerte sind häufig nicht direkt in den Werkstoffdatenbanken enthalten und müssen durch vorhandene Werkstoffeigenschaften ausgedrückt werden.

Die Vorgehensweise der Stahlauswahlmethodik bei der Vorgabe eines Fertigungsverfahrens soll anhand des Schweißens vorgestellt werden. Am einfachsten wäre die Beurteilung der Schweißignung eines Werkstoffes durch eine Bewertung wie beispielsweise "sehr gut schweißbar", ..., "bedingt schweißbar". Leider sind die Informationen selten in dieser Form in einer Werkstoffdatenbank gespeichert. Bei einigen Datenbanken sind diese Angaben in einem Bemerkungsfeld vorhanden. Eine Abfrage gestaltet sich aber trotzdem schwierig, da zwar nach dem Text "schweißbar" gesucht werden kann, aber umfangreiche Fallunterscheidungen vorgenommen werden müssen. Die Wörter vor "schweißbar" wie z.B. "sehr gut" oder "nicht" müßten alle erfaßt sein um zu einer korrekten Aussage zu gelangen.

Eine bessere Methode ist die Beurteilung der Schweißignung mittels chemischer Zusammensetzung, die in jeder Werkstoffdatenbank enthalten ist. Die Schweißignung eines Stahls wird wesentlich vom Kohlenstoffgehalt gekennzeichnet. Ist dieser unterhalb von 0,25% läßt sich der Werkstoff im allgemeinen problemlos schweißen. Kohlenstoffgehalte darüber erfordern meist Zusatzmaßnahmen wie Vorwärmen. Diese Stähle sind also nur bedingt schweißbar. Bei niedrig- oder hochlegierten Stählen wird das Kohlenstoffäquivalent, das die Einflüsse der einzelnen Legierungselemente berücksichtigt, zur Schweißignungsbeurteilung herangezogen. Auch bei anderen Fertigungsverfahren wie beispielsweise Drehen wird wieder eine Rückführung auf die Grundgrößen "Legierungsanteile" vorgenommen /3, 4/.

Wichtig ist eine Unterstützung aller Phasen der Produktentstehung durch die Methodik, da sich Werkstoffauswahl und Produktgestaltung gegenseitig beeinflussen und nur so ein technisch und wirtschaftlich ausgewogenes Produkt entstehen kann. Mit der Auswahlmethodik ist es möglich anhand der gestellten Werkstoffanforderungen zu jedem Zeitpunkt des Konstruktionsprozesses die denkbaren Werkstoffgruppen oder Werkstoffe zu erfragen und anzeigen zu lassen. Im Laufe des Entwicklungsprozesses werden die gestellten Anforderungen an den Werkstoff immer detaillierter und dadurch die Anzahl möglicher Werkstoffe herabgesetzt.

Desweiteren besteht jederzeit die Möglichkeit mit Hilfe von Bewertungskriterien aus den geeigneten Werkstoffen den technisch-wirtschaftlich besten Werkstoff herauszufinden. Die Bewertungskriterien wie beispielsweise Verarbeitungseigenschaften oder Relativkosten sind in vorgefertigten Bewertungsprofilen gespeichert. Der Anwender kann sich ein geeignetes Profil aussuchen und damit die gewünschte Bewertung durchführen.

Ein weiterer Bestandteil der Auswahlmethodik ist die Berücksichtigung von Vorzugswerkstoffen. In vielen Unternehmen wird aus wirtschaftlichen und logistischen Gründen versucht die Anzahl der verwendeten Werkstoffe zu minimieren. Diese Vorzugswerkstoffe können in eine Datenbank eingegeben werden. Bei jeder Anfrage wird zunächst die Eignung dieser Werkstoffe für die vorliegende Konstruktionsaufgabe überprüft. Ein Vergleich mit den möglichen Stählen aus den Werkstoffdatenbanken kann ebenfalls angestellt werden.

Neben dem eigentlichen Stahlauswahlprogramm wird ein Informationssystem entwickelt, das relevante Werkstoffinformationen in Abhängigkeit des Fortschritts im Auswahlprozeß bereitstellt. Hiermit sollen wichtige Informationen bereitgestellt und die Entscheidungswege transparent gemacht werden. Dadurch soll gleichzeitig die Akzeptanz der rechnerunterstützten Werkstoffauswahl bei den Konstrukteuren gesteigert werden.

4 Stand der Arbeiten

Zur Zeit wird an der Implementierung der erarbeiteten Auswahlmethodik und des Informationssystems gearbeitet. Dabei erfolgt eine Umsetzung der Methodik zum einen mit einem CGI-Skript in Verbindung mit einer eigenen Werkstoffdatenbank und

zum anderen mit JAVA und der Demo-Version der Werkstoffdatenbank WIAM von der Institut für Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH in Dresden. Die Programmierarbeiten mit dem CGI-Skript sollen die generelle Funktionalität der entwickelten Auswahlmethodik demonstrieren, die kompliziertere JAVA-Variante mit der WIAM-Datenbank stellt dann den späteren Endzustand dar. Hier sind die Zugriffe detaillierter, beispielsweise wird die Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom Halbzeug, vom Wärmebehandlungszustand und dem Nennmaß abgefragt.

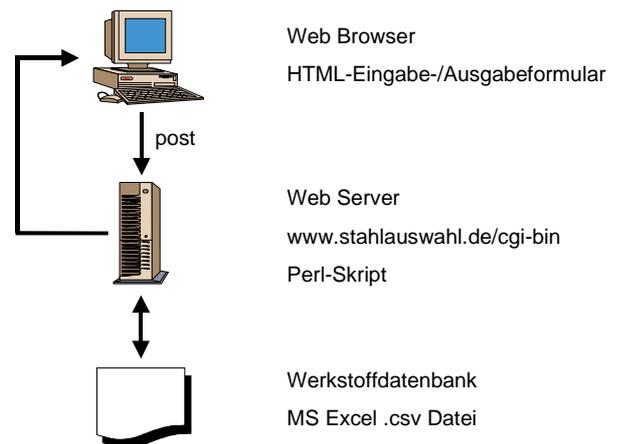


Bild 4: Datenbankzugriff mittels CGI-Skript

In **Bild 4** ist der Weg einer Datenbankanfrage mit einem CGI-Skript dargestellt. Über das HTML-Eingabeformular werden die Angaben zur Konstruktionsaufgabe gemacht, die durch den Befehl »*post*« an den Web Server gesendet werden. Dort muß ein Verzeichnis mit dem Namen "*cgi-bin*" eingerichtet sein, wo auch PERL installiert sein muß. In dem PERL-Skript sind die Datenbankabfragen formuliert, die mit den eingegebenen Werten an die Werkstoffdatenbank gerichtet werden. Bei der Datenbank handelt es sich um eine MS Excel Datei im csv-Format - eine durch Trennzeichen getrennte Datei - auf die mit einem CGI-Skript einfach zugegriffen werden kann. Die csv-Datei enthält die gängigsten Stähle und ihre chemische Zusammensetzung, wichtige mechanische Eigenschaften sowie Spalten für die Beurteilung der Dreh-, Schweiß- und Tiefziehbarkeit. Die Ergebnisse der Datenbankanfrage werden wieder an den Web Browser gesendet und im HTML-Format dargestellt. **Bild 5** zeigt einen Auszug aus dem PERL-Skript mit kurzen Erläuterungen, der für die Ermittlung der Schweißseignung zuständig ist.

```

if ($Wert eq "Schweissen") {
    if ((&DatendateiAuslesen($werkstoff, $SpalteKohlenstoff, "") eq "") ||
        (&DatendateiAuslesen($werkstoff, $SpalteKupfer, "") eq "") ||
        (&DatendateiAuslesen($werkstoff, $SpalteSchwefel, "") eq "") ||
        (&DatendateiAuslesen($werkstoff, $SpaltePhosphor, "") eq "") ||
        (&DatendateiAuslesen($werkstoff, $SpalteSilizium, "") eq "")) {
        push(@gefunden, "$werkstoff <font color=red>*</font>");
    }
    elsif (&DatendateiAuslesen($werkstoff,$SpalteSchweissbar,"") eq "ja") {
        push(@gefunden, $werkstoff);
    }
    elsif (&DatendateiAuslesen($werkstoff,$SpalteSchweissbar,"") eq "nein") {
    }
    elsif (
        ((0.00 <= $minC) &&
         (0.25 >= &DatendateiAuslesen($werkstoff, $SpalteKohlenstoff, "max")) ||
         (&DatendateiAuslesen($werkstoff, $SpalteKohlenstoff, "") eq ""))
        &&
        ((0.00 <= &DatendateiAuslesen($werkstoff, $SpalteKupfer,"min")) &&
         (0.26 >= &DatendateiAuslesen($werkstoff, $SpalteKupfer,"max")) ||
         (&DatendateiAuslesen($werkstoff, $SpalteKupfer,"") eq ""))
    )
    &&
    ...
}

```

Fertigungsverfahren Schweißen angeben

*Feld(er) nicht ausgefüllt
-> Werkstoffe werden
mit rotem *
gekennzeichnet*

*Falls "ja" in Spalte
>schweißbar<
-> Werkstoff
gefunden*

*Falls keine Angaben
zu >schweißbar<
-> Prüfen der
einzelnen
Legierungsanteile*

...

Bild 5: Auszug aus dem PERL-Skript

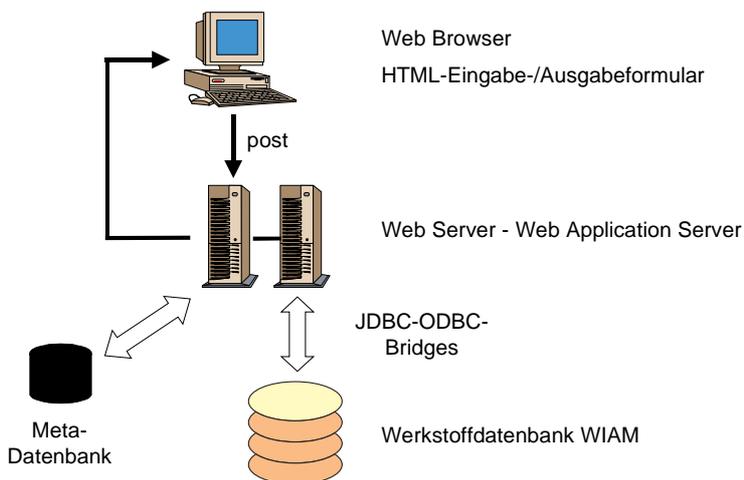


Bild 6: Zugriff auf WIAM-Datenbank mit JAVA

Bild 6 zeigt die Vorgehensweise beim Zugriff auf die WIAM-Demo-Datenbank mittels JAVA. Wie beim CGI-Skript werden die Angaben aus dem HTML-Eingabeformular an den Web Server bzw. den Web Application Server gepostet. Auf dem Web Application Server läuft ein Servlet, das zunächst über die JDBC-ODBC-Bridge die Meta-Datenbank anspricht und von dort die genauen Zugriffe auf die Werkstoffdatenbank(en) übermittelt bekommt. Danach wird konkret die modular aufgebaute Werkstoffdatenbank WIAM abgefragt. Die Datenbankzugriffe werden alle über die standardisierte Abfragesprache SQL realisiert, die von JDBC unterstützt wird. Die Abfrageergebnisse werden wieder an den Browser übergeben und angezeigt.

Zu beachten ist, daß der Web Server eine Servlet-Unterstützung bereitstellt, d.h. es muß dort ein Servlet Development Kit o.ä. installiert sein.

Bild 7 zeigt die Oberfläche, die sich dem Konstrukteur bei der Stahlauswahl z.Zt. präsentiert. Dabei handelt es sich um die Erfassungsseite für die Werkstoffangaben, die für beide Programmvarianten (CGI und JAVA) verwendet werden kann.

Auf der linken Seite sind die einzelnen Menüpunkte zu sehen. Mit »*Dateneingabe*« können gewünschte Werkstoffeigenschaften direkt vorgegeben oder Angaben zu den vorhandenen Beanspruchungen sowie zur Fertigung gemacht werden. Die

Werkstoffeigenschaften beinhalten u.a. Eigenschaften mechanischer, physikalischer oder geometrischer Art. Zu den Beanspruchungen gehören neben den mechanischen auch die chemischen und thermischen Beanspruchungen. Bei den Fertigungsangaben werden die gängigsten Fertigungsverfahren angeboten, die bei Anwendung vom Konstrukteur im Pull-down-Menü angeklickt werden können und dann von der Auswahlmethodik berücksichtigt werden.

Bevor eine Abfrage an die Werkstoffdatenbanken gestartet wird, soll der Konstrukteur über die erforderlichen Zugriffe und die voraussichtlichen Kosten informiert werden.

Der Menüpunkt »Datenbank Info« gibt Auskunft über die unterstützten Werkstoffdatenbanken und deren Leistungsumfang. Es können hier auch Datenbanken, z.B. eines Herstellers, angegeben werden, auf die bevorzugt zugegriffen werden soll.

Zum Informationssystem gelangt der Anwender direkt über die Auswahl »Informationssystem« oder durch gezieltes Anklicken der entsprechenden i-Buttons auf der rechten Seite (Bild 7).

Bild 8 zeigt die Einstiegsseite des Informationssystems für die Fertigungsverfahren und die Blechumformung.

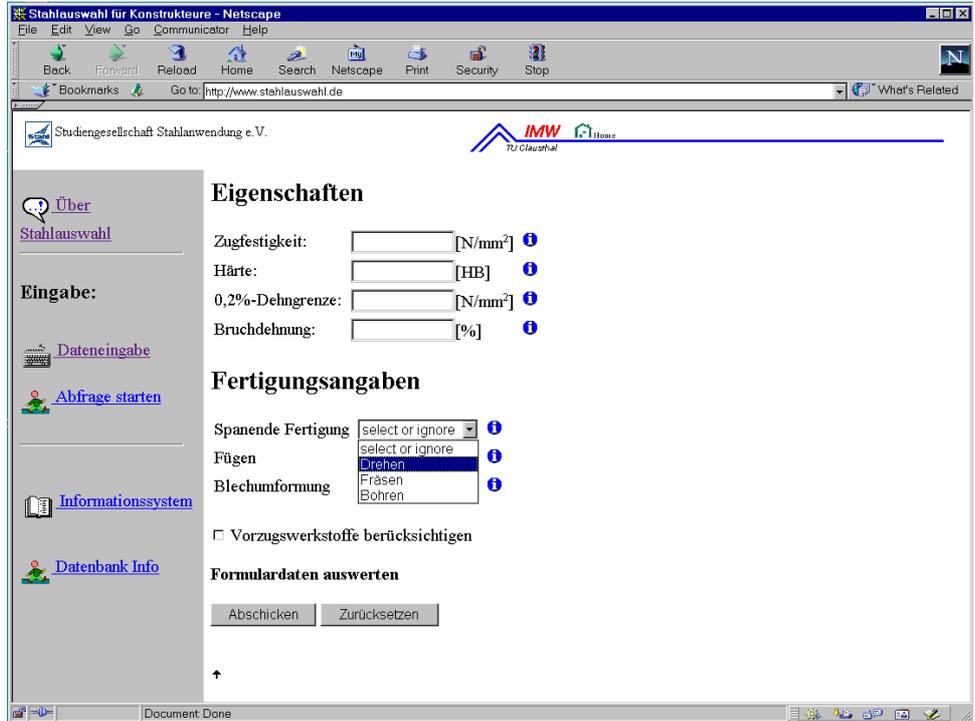


Bild 7: Eingabebformular für die Stahlauswahl im Internet

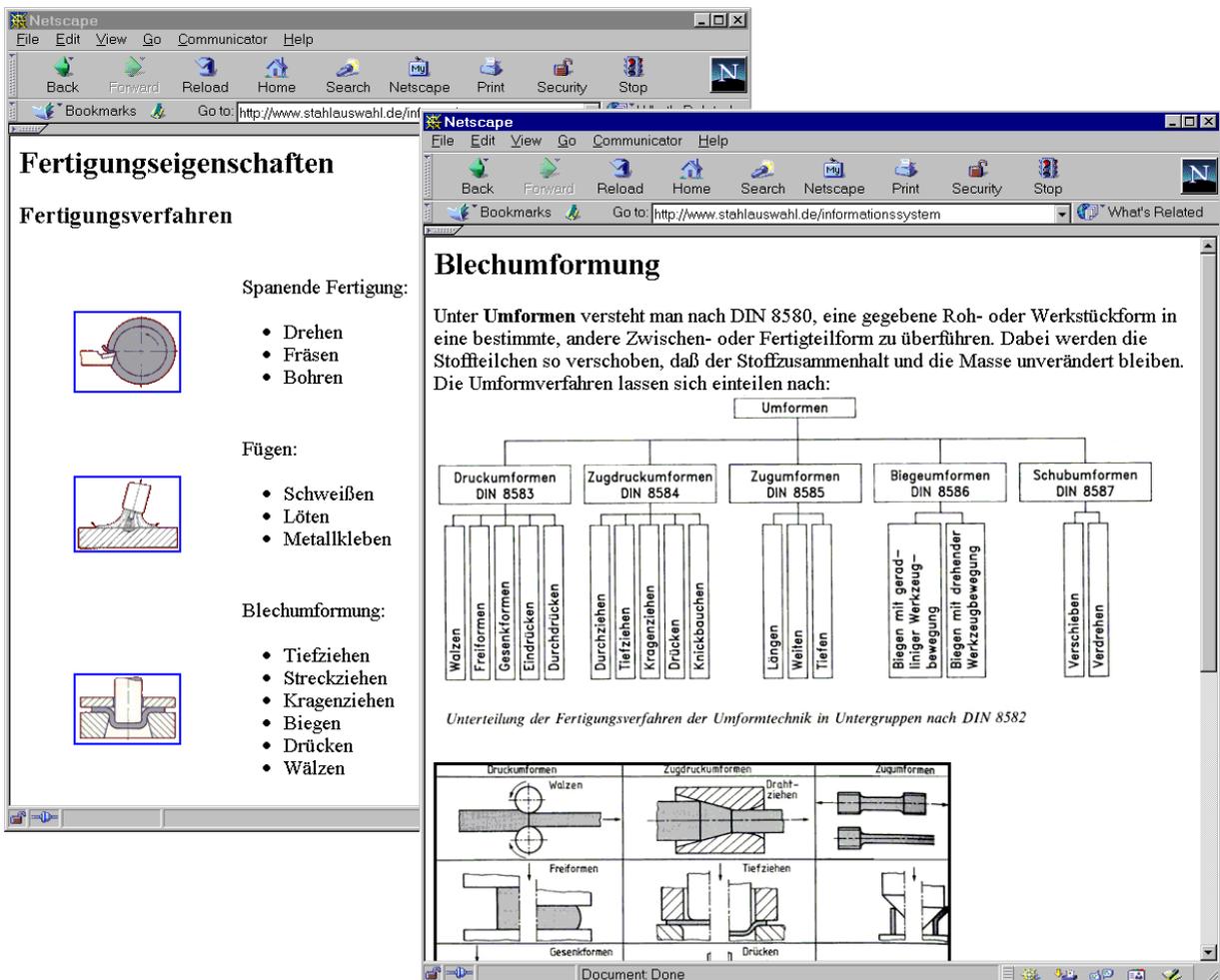


Bild 8: Informationssystem: Fertigungsverfahren und Blechumformung

Für beide genannten Varianten ist mittlerweile die Stahlauswahlmethodik technisch umgesetzt. Bei der CGI-Skript-Version sind die Zugriffe für die wichtigsten mechanischen Eigenschaften, für die Fertigungsverfahren und die Berücksichtigung von Vorzugswerkstoffen programmiert. Die JAVA-Version ermöglicht momentan den Zugriff auf die Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom gewünschten Halbzeug, Wärmebehandlungszustand und Nennmaß sowie die Abfrage der chemischen Zusammensetzung für die Beurteilung der Verarbeitungseignung.

Für die Stahlauswahl ist die URL

<http://www.stahlauswahl.de>

gesichert worden. Unter dieser Adresse sind die Ergebnisse der Projektarbeiten zu finden. Später soll hier das Stahlauswahlssystem für die Nutzer bereitgestellt werden.

5 Ausblick

Nachdem die Zugriffe auf die Werkstoffdatenbanken vollständig umgesetzt sind, soll eine Bereitstellung von Bewertungsprofilen und eine Überarbeitung der graphischen Oberfläche vorgenommen werden. Desweiteren soll der Sicherheitsaspekt, der bei Internetanwendungen eine bedeutende Rolle spielt, in das Stahlauswahlssystem integriert werden.

Um aus der Menge möglicher Werkstoffe den optimalen Werkstoff herauszufinden soll eine Bewertung mit Hilfe von vorgefertigten Bewertungsprofilen vorgenommen werden können. Häufig wünscht sich der Anwender eine Gewichtung der Eigenschaften mit den Kategorien "sehr wichtig", "wichtig", ..., "unwichtig". Auch die Eigenschaften selbst können linguistischer Art wie beispielsweise "sehr gut schweißbar", ...) sein. Für die Verarbeitung solcher qualitativer Aussagen eignet sich die Fuzzy Set Theorie besonders gut /5/. Sie soll daher für die Werkstoffbewertung zum Einsatz kommen.

Die Sicherheitsprobleme bei der Stahlauswahl im Internet erstrecken sich zum einen auf die Möglichkeit des Zugriffes auf die lokalen Rechnernetze der Werkstoffdatenbankanbieter und zum anderen auf die Übertragung von Daten. Die Werkstoffdatenbank WIAM, die auf der Datenbank FoxPro basiert, liefert bei einem Zugriff über ODBC keinerlei Schutzmechanismen. Abhilfe kann in diesem Fall mit sog. Firewalls geschaffen werden. Ein "Abhören" von Datenübertragung oder Paßwörtern, letztere sollen eine Zugangsberechtigung zu den

Werkstoffdatenbanken ermöglichen, kann durch Verwendung kryptographischer Protokolle vermieden werden /6/.

Zur Zeit wird mit frei verfügbarer Software (z.B. der Web Server) gearbeitet, die größtenteils nur eine begrenzte Zeitdauer genutzt werden kann. Für die letztendliche Bereitstellung der Stahlauswahl im Internet sollte dann professionelle Software gekauft und verwendet werden. Diese weisen in der Regel auch höhere Performance auf.

6 Zusammenfassung

In diesem Artikel sind die Arbeiten des Projektes "Rechnergestützte Stahlauswahlmethodik für Konstrukteure" vorgestellt worden. Einführend sind die Vorteile einer Werkstoff- bzw. Stahlauswahl im Internet und die Grundlagen zur Integration von Datenbanken und Web-Technik genannt worden. Danach ist das technische Konzept zur Stahlauswahl und die zugrundegelegte Auswahlmethodik beschrieben worden. Abschließend ist der Stand der Arbeiten geschildert und ein kurzer Ausblick auf zukünftige Aufgaben gegeben worden.

7 Literatur

- /1/ Diercks, J.: Systemcocktail - Integration: Datenbanken und Web-Technik; iX 10/1997
- /2/ Klute, R.: Dateneintopf - Zusammenspiel ODBC, JDBC und Treibersoftware; iX 6/1997
- /3/ Ruge, J.: Handbuch der Schweißtechnik, Band I: Werkstoffe; Springer-Verlag, 1980
- /4/ König, W.: Fertigungsverfahren, Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren; VDI-Verlag, 1990
- /5/ Liao, T. W.: A Fuzzy Multicriteria Decision-Making Method for Material Selection; Journal of Manufacturing Systems, Vol. 15, No. 1, 1996
- /6/ Fox, D.: Uneinsehbar - Schutzmechanismen fürs Internet; iX 5/1997

Die KOMB-Analyse am Beispiel einer Niedertemperaturentschwefelungsanlage

Bönig, S.; Heimannsfeld, K.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 180 befaßt sich das Teilprojekt A2 mit der wissenschaftlichen Fehler- und Störfallanalyse verfahrenstechnischer Maschinen. Im folgenden wird die Anwendung und die Rechnerunterstützung der am IMW entwickelten Analysemethode KOMB am Beispiel einer experimentellen Niedertemperaturentschwefelungsanlage vorgestellt.

The project A2 in the Sonderforschungsbereich 180 (Special Research Area) deals with knowledge based failure and hazard analysis. This paper presents the results of the developed analysis method KOMB applied to an experimental low temperature desulphurization plant.

1 Einleitung

Bei komplexen technischen Systemen, insbesondere bei verfahrenstechnischen Anlagen, deren Komponenten z.T. extremen thermischen, mechanischen und chemischen Belastungen ausgesetzt sind, ist eine Risikobegrenzung aufgrund der möglichen nachhaltigen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt erforderlich. Störungen des bestimmungsmäßigen Betriebes in solchen Anlagen können in Form von Bränden oder Explosionen zu Produktionsausfall, zur Zerstörung der Anlage mit Verletzten oder sogar Toten aber auch durch Stofffreisetzungen zu Umweltschäden und Verletzten außerhalb der Anlage führen.

Eine Unfallanalyse, bei der die Störfallursache ermittelt und ein erneutes Eintreten durch Einleiten entsprechender technischer und/oder organisatorischer Maßnahmen verhindert werden soll, ist notwendig und wichtig, reicht aber zur Risikobegrenzung allein nicht aus. Durch den Einsatz von prospektiven Analysemethoden, sog. Sicherheitsanalysen, sollen die Primärursachen möglicher Gefahrenquellen eines Systems im voraus identifiziert. Deren Auswirkungen sollen prognostiziert und gegebenenfalls Gegenmaßnahmen erarbeitet werden, um das verbleibende Restrisiko nochmals nachhaltig zu reduzieren.

Wie erfolgreich letztendlich eine Sicherheitsanalyse ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie z.B.:

- der Komplexität des zu untersuchenden Systems,
- dem Einsatzzeitpunkt der Analyse,
- dem Informationsgrad zum Zeitpunkt der Analyse,
- dem „Handling“ der Informationen innerhalb der Analyse,
- der Organisation des Betriebes,
- die Erfahrungen der Analysten
- und der Konsequenz der Maßnahmenverfolgung.

Die Anforderungen, die an die Analysemethoden gestellt werden, sind hoch. Sie umfassen neben allgemeinen Aspekten wie z.B. Verständlichkeit oder Erweiterbarkeit der Analyse auch die Anpassung an die jeweilige Entwicklungsphase der Anlage, die Berücksichtigung anlagenspezifischer Besonderheiten (z.B. Einsatzstoffe, Automatisierungsgrad) und die Erfüllung von gesetzlichen Vorschriften und Pflichten /1/.

Der Gesetzgeber regelt seit der Einführung der Störfall-Verordnung 1981 (12. BImSchV) und deren Novellierung 1991, für welche Anlagen das Anfertigen und Fortschreiben einer Sicherheitsanalyse zur Pflicht wird. Er schreibt dem Anlagenbetreiber zwar den Umfang, jedoch keine konkrete Methode vor, um diese sog. Spezialpflicht zu erfüllen.

Als Analysemethoden können HAZOP /2/, Fehlerbaumanalyse /3/, Ereignisablaufanalyse/4/, FMEA /5/, MORT /6/ aber auch Checklisten u.a. /7/ einzeln oder gemeinsam eingesetzt werden. Die jeweiligen Vor- und Nachteile der verschiedenen Vorgehensweisen der Methoden werden in /1/ ausführlich beschrieben werden.

In /8/, S. 55 ff, und /9/ wurde eine modifizierte Analyse vorgestellt, die sog. KOMB-Analyse, die die positiven Aspekte der HAZOP ausnutzt. Dies sind z.B. das Auffinden von Fehlern/Störungen mit Hilfe von Leitwörtern, systematisches Abarbeiten von sicherheitsrelevanten Komponenten. Folgende Punkte wurden ergänzt:

- Verdeutlichung der Zusammenhänge zwischen Störungsursachen, deren Auswirkungen und dem Ort der theoretischen Störung,
- systematische Hilfe bei der Erarbeitung von Gegenmaßnahmen und deren Einbindung in das System,
- Bewertung der Wirksamkeit der vorgeschlagenen Gegenmaßnahmen und
- einfache Handhabbarkeit der Analyse mit Hilfe von vier ergänzbaren Formblättern.

Die praktische Anwendbarkeit der KOMB-Analyse wird am Beispiel einer Pilotanlage zur Niedertemperaturentschwefelung (SFB180 Teilprojekt B11), die am Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik installiert ist, untersucht.

2 Beschreibung der Anlage

In der Versuchsanlage wird ein feuchtes, SO_2 -haltiges Abgas erzeugt. Dieses wird mit durch die Zugabe von basischen Feststoffen durch Chemisorption bei Temperaturen $< 100^\circ\text{C}$ entschwefelt. Der Feststoff wird anschließend kontinuierlich durch einen Abreinigungsfilter vom Abgas getrennt, siehe dazu auch /9/.

Eine sicherheitstechnische Analyse ist an dieser Entschwefelungsanlage besonders angebracht, da es während des Versuchsbetriebs in der Vergangenheit immer wieder zu Störungen gekommen ist, die einen längeren kontinuierlichen Versuchsbetrieb unmöglich machten.

Die Primärursachen dieser Störungen lagen beispielsweise in Komponentenausfällen aufgrund der starken Agglomerationsneigung des Sorbens, Materialverschleiß (z.B. Dichtungen), fehlerhafter Montage, organisatorischen Fehlern. Auch unzureichender Systemkenntnis bezüglich der Einflußfaktoren auf Temperatur, Druck und relative Feuchte im Reaktor war eine Störungsquelle. Die Auswirkungen

gen der Störungen waren Verzögerung des Versuchsbeginns, Versuchsabbruch, geringe Entschwefelungsleistung der Anlage, niedrige Calci-umausnutzungsgrade aber auch hoher Reinigungsaufwand der Anlage (Feststoffentfernung). Bevor der Entschwefelungskreisprozeß durch eine zusätzliche Aufbereitungs- und Rückführungsstufe geschlossen wird, kann zu diesem Zeitpunkt eine Sicherheitsanalyse wertvolle Informationen hinsichtlich:

- der Erhöhung der Verfügbarkeit der Komponenten,
- des Verhaltens der Anlagenkomponenten im Versuchsbetrieb,
- der Auswirkungen des Komponenteneinsatzes auf die Gesamtanlage und das Entschwefelungsergebnis liefern.

Insbesondere die vom Institut für Maschinenwesen entwickelten Komponenten Feststoffinjektor und Feststoffabscheider sollen systematisch untersucht werden.

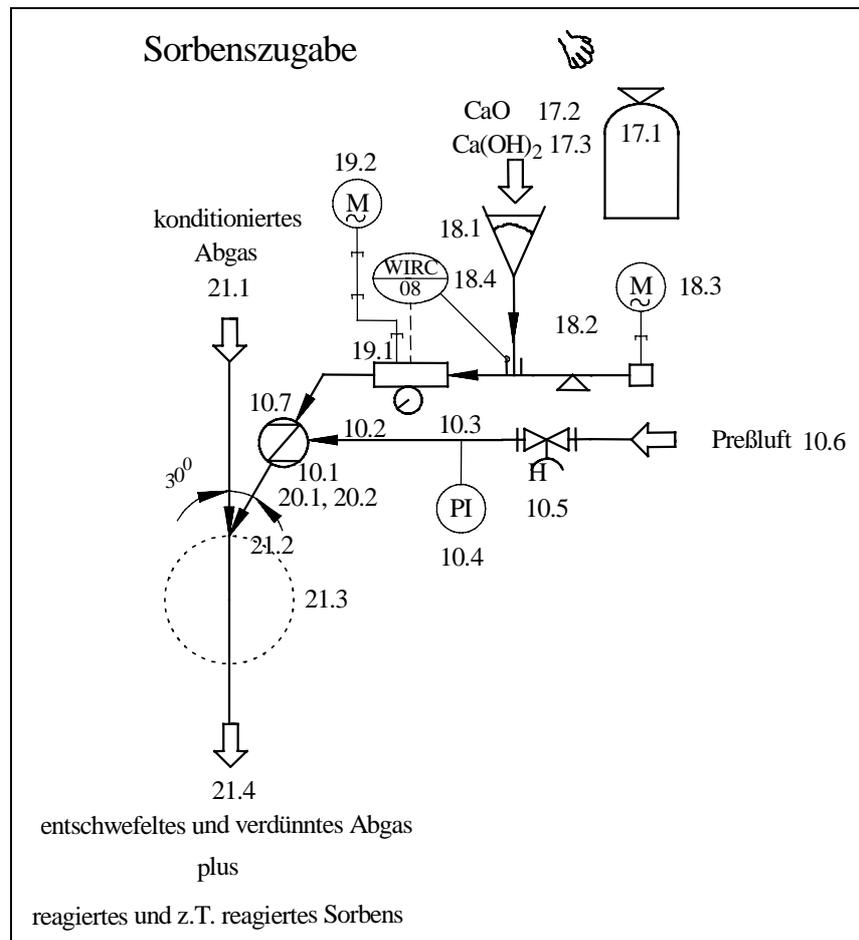


Bild 1: Fließbild des Teilsystems "Sorbenszugabe"

3 Vorgehen bei der KOMB-Analyse

Erstellung verfahrenstechnischer Fließbilder

In einem ersten Schritt wird das verfahrenstechnische Fließbild der Anlage dem aktuellen Stand der Entwicklung angepaßt (s. Bild 1). Insbesondere die Anfang des Jahres in Betrieb genommene Filterkammer inklusive der Abreinigungseinheit und die modifizierte Injektoreinheit werden in das Fließbild neu aufgenommen. In Zusammenarbeit mit dem Anlagenbediener werden Informationen über die Komponenten soweit wie möglich zusammengetragen, einschließlich Wartung und Bedienung beim An- und Abfahren der Anlage. (Zu diesem Zeitpunkt der Analyse ist bereits ein großes Informations- und Dokumentationsdefizit erkennbar.)

Unterteilung des Anlage in Teilsysteme

Die Anlage wird in die Teilsysteme Erdgasverbrennung, Abgaskonditionierung, Dampfzufuhr, SO₂-Zufuhr, Sorbenszugabe, Abgasaufbereitung und -analyse, Feststoffabscheidung und Abgasaustrag unterteilt. Diese Gliederung in selbständige Einheiten wurde vorgenommen, um die Durchschaubarkeit der Analyse während der Erstellung zu gewährleisten.

Numerierung der Anlagenkomponenten im Teilsystem

In Bild 1 ist das Teilsystem „Feststoffzufuhr“ mit seinen Komponenten K zu erkennen.

Die numerierten Komponenten sind hierbei Apparate, Maschinen oder Meßinstrumente. Darüber hinaus werden aber auch Einsatzstoffe, Hilfsstoffe oder Zustände des Produktes (Abgases) an bestimmten Orten der Anlage nummeriert, um diese bei der Analyse mit der entsprechenden Gewichtung berücksichtigen zu können. Komponente K 10.1 ist hier beispielsweise der Feststoffinjektor, K 10.2 die Druckluftleitung der Injektoreinheit, K 10.6 die zugeführte Preßluft und K 21.3 die Kontaktzone Abgas/Sorbens.

Die Höhe des Numerierungsgrades, d.h. inwieweit eine Komponente in Teilkomponenten untergliedert wird, ist allerdings neben der Sicherheitsrelevanz im System auch abhängig vom Informationsgrad und Verständnis der Komponenten. An dieser Stelle zeigt sich, daß das Wissen und die Erfahrung von Fachleuten unterschiedlicher technischer Disziplinen die Analyse von Beginn an entscheidend beeinflussen. Beim HAZOP-Verfahrens wird sogar die Zusammensetzung des Analysenteams in Ab-

hängigkeit des Einsatzzeitpunktes der Analyse vorgeschrieben.

Ermittlung der möglichen Störungen, deren Ursachen und Auswirkungen aller Komponenten K X:Y jedes Teilsystems

Für jede Komponenten K X.Y wird unter Berücksichtigung ihrer Funktion, d.h. ihrer Aufgabe im System, mit Hilfe der Leitworte des HAZOP-Verfahrens systematisch erarbeitet, welche Abweichungen, Störungen und Fehler während des Betriebs, aber auch beim An- und Abfahren sowie beim Warten der Anlage theoretisch auftreten könnten. In drei Punkten unterscheidet sich hierbei die KOMB- von der HAZOP-Analyse:

1. Die sieben Leitworte NEIN/NICHT, MEHR, WENIGER, SOWOHL ALS AUCH, TEILWEISE, UMKEHRUNG, ANDERS ALS dienen nur als Gedankenstütze beim Auffinden von Störungen und Fehlern. Abweichungen von der Funktion einer jeden Komponente werden wenn nötig detailliert z.B. durch Angabe des Temperatur- oder Druckbereiches, der Stellung eines Ventils o.ä., angegeben.
2. Auf das Definieren und anschließende (getrennte) Abarbeiten von "Sollfunktionen" im Sinn von HAZOP soll verzichtet werden, damit bei der Betrachtung des Systems sämtliche Betriebsphasen gleichwertig analysiert werden können. Änderungen der Anlage wie z.B. Ergänzungen und Wegfall von Komponenten sollen bei KOMB auf diese Weise leichter zu integrieren sein.
3. Die Analyse erfolgt komponentenweise und nicht, wie beim HAZOP-Verfahren, für jedes Teilsystem geordnet nach Leitworten.

Beispielsweise werden für den Feststoffinjektor K 10.1, der den Feststoff in vollständig dispergierter Form dem Reaktor kontinuierlich zuführen soll, als Störungen angegeben:

- S 10.1;1 vollständiges Aussetzen der Dispergierung
- S 10.1;2 Dispergierung unvollständig (nicht alle Agglomerate werden zerstört)
- S 10.1;3 Dispergierung, aber ungleichmäßiges Einbringen in den Reaktor

Für jede Störung S x.y;n werden mögliche Ursachen U x.y;n und deren Auswirkungen A X:Y;n ermittelt. Bei der Erarbeitung der Störungsauswirkungen sind sowohl Störungseinwirkungen auf die je-

1	2	3	4	5	6	7
Komponente	Funktion	Störungen	Ursachen	Auswirkungen	Maßnahmen	Störung beseitigt Ja/Nein
K 20.2 Injektor- halterung	Zentrale Positionierung und Fixierung des Injek- tors im Stutzen	S 20.2;1 Injektorhalte- rung mit feuchten Parti- keln verschmutzt	U 20.1;1	A 10.1;10 A 20.2;1		
			U 20.2;1	A 10.1;10 A 20.2;1		
K 20.3 Abreini- gung	Beseitigung der Fest- stoffansammlung im Stu- zen während des Anla- genbetriebes	S 20.2;2 Verschiebung des Injektors	U 20.2;2	A 10.1;12 A 10.1;10 A 10.1;13 A 10.1;3		
			U 20.1;1	A 10.1;14 A 10.1;10 A 10.1;3		
		S 20.3;1 Abreinigungs- ring stark mit Partikeln verschmutzt	U 20.1;1	A 10.1;14 A 10.1;10 A 10.1;13 A 10.1;3		
			U 20.1;2	A 10.1;14 A 10.1;10 A 10.1;13 A 10.1;3		

Tabelle 1: Auszug aus Formblatt 1 (Teilsystem "Sorbenszugabe")

weilige Komponenten, auf Funktion und Zustände der nachfolgende und angrenzende Komponenten, aber auch auf den Anlagenbetrieb und den Anlagenbediener zu berücksichtigen.

Z.B. kann die Störung S 13.4;1 Filterschlauch undicht (Partikeldurchtritt) die folgenden beiden Ursachen haben:

- U 13.4;1 Verschleiß durch zu häufiges und intensives Abreinigen,
- U 13.4;2 Beschädigung (von außen /von innen) bei Montage

Die Auswirkungen dieser Störung mit der Ursache U 13.4;1 sind beispielsweise:

- A 13.1,1 Partikel gelangen auf Reingasseite,
- A 13.4;1 keine vollständige Abscheidung des Feststoffs möglich,
- A 13.4;2 Verschmutzung nachfolgender Anlagenteile durch Feststoff,
- A 13.4;3 Ersatz für Filterschlauch erforderlich,
- A 13.4;4 keine automatische Auslösung der Abreinigung, da Abreinigungsdruck nicht erreicht wird.

Liegen gleiche Ursachen vor, so erhalten sie in der Analyse identische Nummern, gleiches gilt für die Auswirkungen. Durch „und“-Angaben bei der Beschreibung der Ursache lassen sich Störungen aufdecken und angeben, die nur durch ein gemeinsa-

mes Auftreten mehrerer Fehler, sog. Common-Mode-Fehler, hervorgerufen werden. Kommen andererseits mehrere Ursachen für eine Störung in betracht, so werden sie generell durch zwei unterschiedliche Nummern dokumentiert, für die die Auswirkungen anschließend getrennt ermittelt werden.

Der Detaillierungsgrad der Auswirkungen spielt bei der weiteren Analyse hinsichtlich Aussage und Aufwand eine wichtige Rolle. Einerseits bietet es sich aus Gründen der Übersichtlichkeit an, gleichzeitig auftretende Auswirkungen unter einer Nummer zusammenzufassen, um anschließend Ereignisabläufe anhand ihrer Reihenfolge sichtbar zu machen. Andererseits kann beim Zusammenfassen der Auswirkungen aufgrund der möglichen Kombinationsmöglichkeiten der Dokumentationsaufwand erheblich erhöht werden, was nachteilige Auswirkung auf die Nachvollziehbarkeit der Analyse mit sich bringt. Bis zur Lösung dieses Optimierungsproblems mit Hilfe von EDV werden nur die grundsätzlichen Auswirkungen einer Störung dokumentiert. (s. **Tabelle 1**)

Die bisher ermittelten Ergebnisse werden für jedes Teilsystem in einem Formblatt (Formblatt 1) in den Spalten 1 bis 5 dokumentiert.

Erarbeitung von Gegenmaßnahmen

Bevor sinnvolle Gegenmaßnahmen erarbeitet werden können, müssen sämtliche Ursachen und

Auswirkungen in einer Matrix, Formblatt 2, gegeneinander aufgetragen werden (siehe **Tabelle 2**).

Im System wird nun ersichtlich, welche Auswirkungen aufgrund einer einzelnen Störungsursache (In der Tabelle durch ein X gekennzeichnet) hervorgerufen werden können. Ursachen, die zu besonders schwerwiegenden unerwünschten Ereignissen führen, sind somit aufgrund der hohen Summe der horizontal angeordneten Kreuzen in der Matrix sofort ersichtlich. Gerade für diese Fälle ist es sinnvoll, einen Ereignisablauf von der Störungsursache über die Art und den Ort (durch die Nummer ersichtlich) der Störung bis hin zu den zeitlich geordneten Auswirkungen darstellen zu können. Beispielsweise führen die Ursachen U 18.2;1 (Feststoff ist feucht und schlecht förderbar) oder auch U 20.1;1 (Abreinigungsintervalle während Versuchsbetrieb zu groß) zu unerwünschten Ereignissen mit einer Vielzahl von negativen Auswirkungen auf das System.

Bei der Erarbeitung von Gegenmaßnahmen sind diese Ursachen primär zu beseitigen. Wenn dies nicht möglich ist, ist ihre Eintrittswahrscheinlichkeit zu reduzieren. Andererseits kann durch eine vertikale Betrachtungsweise der o.g. Matrix gezeigt werden, welches die Ursachen für eine bestimmte Auswirkung sein könnten (ODER-Verknüpfungen). Bei einer hohen Anzahl vertikaler Kreuze sind Maßnahmen zur Auswirkungsbeseitigung bzw. Beschränkung besonders notwendig.

Erstellung der Ursachen-Komponenten-Matrix

In einer Ursachen-Komponenten-Matrix (Formblatt 3) werden alle Ursachen gegen sämtliche Komponenten aufgetragen. Aufgrund der Anzahl von

Kreuzen in einer Spalte wird ersichtlich, welche Komponenten K im System besonders störanfällig sind. Hier kann dann unter Umständen eine Umkonstruktion oder eine redundante Auslegung notwendig werden. Außerdem kann das Aufzeigen der an einer Störungsursache beteiligten Komponenten Mithilfe beim Ausarbeiten der Maßnahmen bieten.

Ist es möglich, Maßnahmen zur Ursachenbekämpfung zu finden, die technischen aber auch organisatorischen Ursprungs sein können, so werden diese im Formblatt 1 (s. **Bild 1**) dokumentiert und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet. Dabei bedeutet:

VB: vollständige Beseitigung der Störungsursache durch Einleitung von Maßnahmen,

TB: teilweise Beseitigung der Störungsursache durch Einleitung von Maßnahmen,

NB: Maßnahmen werden vorgeschlagen, die Störungsursache läßt sich aber nicht beseitigen

Sicherlich ist die Maßnahmenbeurteilung z.T. objektiven Einflüssen ausgesetzt, bei Zweifeln sollte deshalb immer die nächst niedrigere Wirksamkeitsstufe gewählt werden. Nur so läßt sich verhindern, daß als „vollständig beseitigt“ gewerteten Ursachen bei der Anlage nicht mehr auftreten.

Überarbeitung der Ursachen-Auswirkungen-Matrix (Formblatt 2)

Alle Ursachen, die durch vorgeschlagene Maßnahmen vollständig beseitigt werden können, werden in der Ursachen-Auswirkungen-Matrix eliminiert, so daß deren Umfang sowohl in der Anzahl der Ursachen aber auch z.T. in der Anzahl der

Ursachen	Auswirkungen									
	A 10.1;1	A 10.1;2	A 10.1;3	A 10.1;4	A 10.1;5	A 10.1;6	A 10.1;7	A 10.1;8	A 10.1;9	A 10.1;10
U 10.1;1	X	X	X							
U 10.1;2	X	X	X	X						
U 10.1;3	X				X	X				
U 10.1;4	X				X	X	X			
U 10.1;5	X		XX		X			XX	X	
U 10.1;6	X	X	X							
U 10.1;7		XX							X	XX
U 10.1;8					X				X	
U 10.1;9			X						X	
U 10.1;10			X					X		X

Tabelle 2: Auszug aus der Ursachen-Auswirkungen-Matrix (Formblatt 2)

Auswirkungen reduziert werden kann.

Grundvoraussetzung für jede Überarbeitung der Formblätter ist jedoch, daß die vorgeschlagenen Maßnahmen nicht nur theoretisch möglich, sondern auch technisch, organisatorisch und finanziell umsetzbar sind und realisiert werden können.

Beispiel

Als eine mögliche Störung der Komponenten K 10.7 (Feststoffrohr) wird in S 10.7;2 angenommen, daß die Verbindungsstelle zwischen dem Feststoffrohr K 10.7 und dem Injektor(einsteckrohr) K 10.1 Undichtigkeiten aufweist. Diese Störung (S 10.7;2), die im Versuchsbetrieb bereits aufgetreten ist, hat unabhängig von der Ursache einen Partikelaustritt an der Verbindungsstelle zur Folge (A 10.7;2). Zwei mögliche Ursachen werden für diese Störung verantwortlich gemacht: ein Montagefehler des Feststoffrohres (U 10.7;3) oder ein undichtetes Gewinde (U 10.7;4). Beide Ursachen lassen sich mit Hilfe der Maßnahme (10.7;3 vor Einbau des Injektors, Überprüfung der Dichtigkeit, evtl. Teflonband verwenden) vollständig beseitigen, so daß letztendlich die Störung „undichte Verbindungsstelle“ nicht auftreten kann. Der Ereignisablauf ist somit bei diesem Beispiel bereits von Anfang an durch Eingreifen von Maßnahmen erfolgreich gestoppt worden.

Erstellung der Auswirkungen -Komponenten - Matrix (Formblatt 3):

Werden die Auswirkungen gegenüber den Komponenten aufgetragen, so wird erkennbar, welche Komponenten nach Störungseintritt an der Störungsursache durch Funktionsabweichungen beteiligt sind. Zusammenhänge bezüglich des Gesamtsystemverhaltens, wie z.B. die Notwendigkeit einer redundanten Auslegung oder zusätzlicher Kontrollorgane, können auf diese Weise sichtbar werden. Diese Informationen können in den Maßnahmen integriert werden.

Schlußfolgerungen hinsichtlich der Anlagensicherheit:

Mit Hilfe der KOMB-Analyse können zum jetzigen Entwicklungsstand der Anlage wichtige Detailinformationen hinsichtlich:

- Aufgabe und Verhalten der eingebauten Komponenten im System,
- Reaktionen der Gesamtanlage bei Abweichungen verschiedener Verfahrensparameter, bei Ausfall von einzelnen oder mehreren Kompo-

nenten z.B. durch Fehlbedienungen des Anlagenpersonals,

- potentieller Gefahrenquellen

mit ihren möglichen Ursachen und Auswirkungen aufgezeigt und dokumentiert werden, wobei das eigentliche Ziel der Analyse in der Ausarbeitung und Umsetzung der vorgeschlagenen Maßnahmen zu sehen ist.

Die erarbeiteten Maßnahmen differieren in Art, Aufwand, Durchführungszeitpunkt und Kosten. Sie lassen sich unterteilen in:

1. konstruktive Änderungen von Komponenten
 - M 13.1;5 für Um-/Neukonstruktion der Filterkammer: Nut für Dichtringe in Zwischenboden vorsehen
2. Zusatz von Komponenten (redundante Auslegung)
 - M 10.1;16 Fertigung und Einbau eines Ersatzinjektors, evtl. mit Halterung
 - M Notaus für Anlage auf Empore!
3. Wegfall von Komponenten
 - M 21.1;5 Zusatzheizungen in Betrieb nehmen, um Kondensat aus Anlage zu beseitigen
4. Wechsel des Wirkortes von Komponenten,
 - M 21.1;25 Thermoelement in Reaktor weiter nach oben versetzen
5. Isolierung von Komponenten
 - M 14.2;1 staub- und stoßgeschütztes Gehäuse für Motor, Versorgungsleitungen führen!
6. Überprüfung der Funktionsfähigkeit von Komponenten vor Inbetriebnahme,
 - M 13.1;6 beim Anfahren der Anlage Filterkammerheizung in Betrieb nehmen und Funktionsfähigkeit überprüfen.
7. Überwachung von Komponenten während Anlagenbetrieb
 - M 15.8;1 Kontrolle der Abreinigungswirkung (der Filterkammer) über Druckverlustverlauf
8. Hinweise, Vorschriften und Checklisten zum Bedienen und Warten von Komponenten
 - M 14.1;1 Betrieb der Zellschleuse erst nach ausreichender Trockenzeit des Feststoffs im Bunker (Erfahrungswert)
9. Checklisten zur Ursachenfindung bei Störungseintritten
 - M 10.1;13 nach Bemerkungen, SO₂-Zufuhr stoppen, Ursache nach Checkliste 1 prüfen und beheben ⇒ Versuch wiederaufnehmen
10. Maßnahmen zum Gewährleisten eines sicheren Anlagenbetriebes
 - M 21.1;17 erreicht Anlagendruck Umgebungsdruck, Alarm in Warte und sofortige Unterbrechung der SO₂-Zufuhr und Feststoffzufuhr

11. Maßnahmen zum Beheben von eingetretenen Störungen

M 10.1;14 Injektor mit Preßluft kurz durchpusten => Versuch wiederaufnehmen

12. Maßnahmen zur Begrenzung der Störungs- auswirkungen

M 21.3;2 Bei Bemerkungen, sofort Dampfzufuhr unterbrechen und evtl. bis zum Beheben der Störung Bypass vollständig öffnen zur Erhöhung der Abgastemperatur

13. Maßnahmen zur Erhöhung der Arbeitssicherheit

M X.Y;m beim Reinigen feststoffverschmutzter Komponenten Schutzhandschuhe verwenden

14. organisatorische Maßnahmen

M 18.2;4 sämtliche Versuchsdaten für einen Versuchstag für Anlagenbediener schriftlich festhalten

4 Handhabbarkeit der Analyse

Das Ausfüllen des Formblatts 1 bleibt selbst bei einer hohen Anzahl an Komponenten übersichtlich und leicht ergänzbar. Auf einen Blick kann das Ergebnis der Analyse nachvollzogen werden. Als Nachteil wurde allerdings erkannt, daß bei einer

ausführlichen und umfassenden Analyse die resultierenden Formblätter 2 (Ursachen-Auswirkungen Matrix) und 3 (Auswirkungen-Komponenten Matrix) schnell unübersichtlich und zu groß werden. Wird die KOMB Methode manuell durchgeführt, so werden die Daten schnell inkonsistent und kaum nachvollziehbar. Da alle wesentlichen Informationen bereits in Formblatt 1 vorhanden sind, wurde eine Softwarelösung zur Durchführung der KOMB-Analyse implementiert. **Bild 2** zeigt die Benutzerschnittstelle der KOMB Software. Im *KOMB Browser* werden alle Informationen aus Formblatt 1 dargestellt. Dazu werden die Komponenten, die Sollfunktionen, die Störungen, die Auswirkungen sowie die Gegenmaßnahmen in einer hierarchischen Struktur dargestellt.

Die Formblätter 2, 3 und 4 (siehe /1,8,9/) werden automatisch aus den im KOMB Browser vorhandenen Informationen generiert. Das untere Fenster in **Bild 2** stellt die Ursachen-Auswirkungen Matrix dar. Derzeit wird eine bidirektionale Kopplung aller Formblätter getestet. Damit kann der Benutzer Änderungen nicht nur im KOMB Browser durchführen, sondern kann auch in den Formblättern 2, 3 und 4

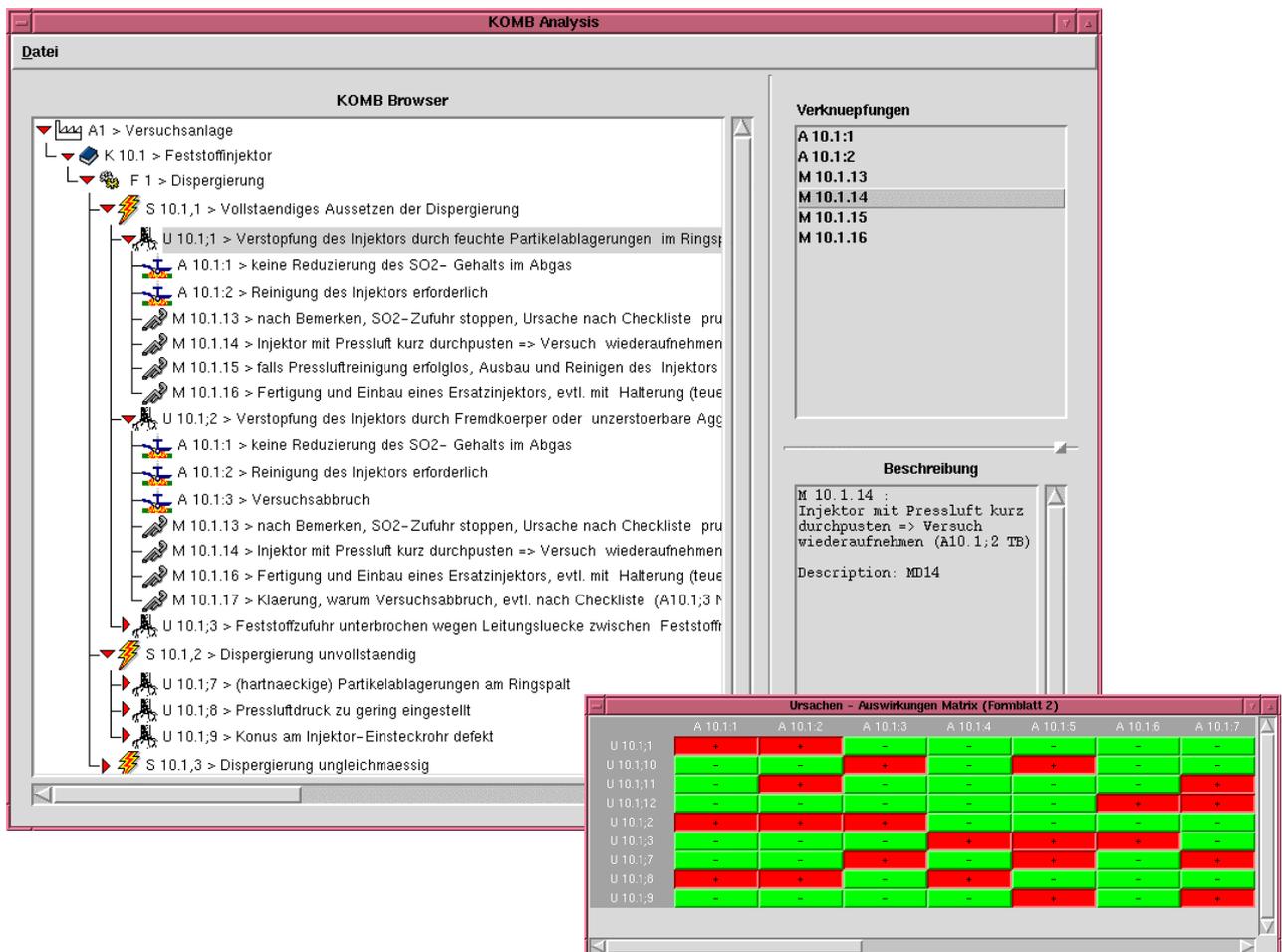


Bild 2: Softwareimplementierung zur KOMB Analyse

Eingaben und Änderungen direkt vornehmen. Neben der einfacheren Handhabung bieten sich mit der realisierten Rechnerunterstützung auch weitergehende Funktionen, wie beispielsweise eine automatische Clusteranalyse der Formblätter 2, 3 und 4, an.

Das Programm befindet sich derzeit in der ersten Phase der Entwicklung und soll zukünftig in vielen Bereichen erweitert werden. Vorgesehen ist insbesondere die Integration einer Datenbank, so daß der Benutzer auf bereits vorhandene Komponenten, Funktionen und damit verbundene Störungen und Maßnahmen zurückgreifen können. Die Realisierung und Integration einer wissensbasierten Beratungskomponente wird ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt des nächsten Jahres sein.

5 Zusammenfassung

Die hier vorgestellte Anwendung der KOMB Analyse und deren Ergebnisse, die in Teilaspekten beispielhaft erläutert wurden, hat gezeigt, wie wichtig präventive Fehleranalysen gerade in der Entwicklung neuer innovativer Maschinen für die Verfahrenstechnik sind. Da sich die Pilotanlage schon seit geraumer Zeit in der Erprobung befindet, wurden reale Störfälle und vorhergesagte Störfälle verglichen. Eine übergreifendes Bild kann schwer ermittelt werden, da nur einzelne Teilsysteme untersucht wurden. Es kann aber festgehalten werden, daß die meisten in der Prozeßentwicklung aufgetretenen Probleme durch die Anwendung der KOMB Analyse erkannt, systematisiert und dokumentiert wurden. Damit bieten sich präventive Störfallanalysen wie z.B. die KOMB Analyse auch als effizientes Werkzeug zur systematischen Lösungsfindung bei der Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen an.

6 Literatur

/1/ Bönig, S.: Konzeption einer Methode zur sicherheitsgerechten Planung und Kontruktion verfahrenstechnischer Anlagen, Diplomarbeit, TU Clausthal, 1994

/2/ Bartels, K.; Hoffmann, H.; Rossinelli, L.: Risikobegrenzung in der Chemie, PAAG-Verfahren (HAZOP), Internationale Sektion der IVSS für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie, Heidelberg 1990

/3/ DIN 25424 Teil 1: Fehlerbaumanalyse- Methode und Bildzeichen, Beuth Verlag GmbH, Berlin 1985

/4/ DIN 25419 Ereignisablaufanalyse- Verfahren, graphische Symbole und Auswertung, Beuth Verlag GmbH, Berlin 1985

/5/ DIN 25448 Ausfalleffektanalyse- (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluß-Analyse), Beuth Verlag GmbH, Berlin 1990

/6/ Frei, R.: MORT Ein Sicherheitskonzept, Frei (Selbstverlag), Winterthur 1979

/7/ Mattke, U.; Scheil, M.: Gefährdungsanalyse, Katastrophenschutz in Arbeitsstätten, Vogelbusch 60. Erg.-Lfg. 11/95

/8/ Bönig, S.; Heimannsfeld, K.: KOMB-A new approach to hazard analysis in plant design, Institutsmittteilung Nr. 22 (1997)

/9/ Bönig, S.; Heimannsfeld, K.: A comparison of hazard analysis methods in plant design, 1st Internet Conference on Process Safety, <http://www.prosicht.com/conference>, 1998

/10/ Bönig, S.; Klemp, E.; Roman, M.: SIMDES - Verfahrenstechnische Behandlung des Sorbens in einer Niedertemperaturrauchgasentschwefelungsanlage, Institutsmittteilung Nr. 22 (1997)

Untersuchung der Rückfederung tiefgezogener Bleche

Heinen, F.; Tawil, M.

Das Tiefziehen zählt zu den am häufigsten angewendeten Blechverarbeitungsverfahren. In den letzten Jahren sind die Anforderungen an die Genauigkeit von Blechteilen dramatisch gestiegen. Verbesserungen bzgl. dieser Anforderungen können nur durch eine höhere Transparenz des Tiefziehprozesses erreicht werden. Besonders die Vorhersage der Rückfederung an tiefgezogenen Teilen ist immer noch sehr komplex und in vielen Fällen nicht möglich. Aus diesem Grund wurde im SFB 362 eine Methode zur Vorherbestimmung der Rückfederung an tiefgezogenen Blechteilen entwickelt.

Deep drawing counts to the most used sheet metal treatment processes. Within the last years the demands concerning accuracy of sheet metal parts are dramatically increased. Improvements to these demands can only be reached by a better transparency of the deep drawing process. Especially the forecast of the spring-back of transformed parts is still very complex and in most cases impossible. For that reason the special research scheme SFB 362 includes a project which develops a method to calculate the spring-back of deep drawing parts in advance.

1 Einführung

Das Tiefziehen zählt zu den am häufigsten angewendeten Umformverfahren bei der Blechverarbeitung. Bei genauer Betrachtung des Tiefziehens stellt man fest, daß bis heute nicht alle Fragestellungen dieses Verfahrens gelöst sind. Insbesondere die Konstruktion von Werkzeugen bereitet immer noch Probleme. Die Ursache hierfür liegt im elastischen Verhalten der Bleche, welches an tiefgezogenen Werkstücken Rückfederung hervorruft. Die Rückfederung ist von einer sehr großen Anzahl an Einflußgrößen (Geometrie, Werkstoff, Niederhaltdruck, Werkzeug/Maschine, Reibungsverhältnisse, etc.) abhängig, so daß der Konstrukteur im wesentlichen auf Erfahrungswissen angewiesen ist. Außerdem ist der Prozeß des Tiefziehens ein instationärer Umformvorgang, d.h. auftretende Spannungen, Formänderungen sowie Reibungsverhältnisse und damit die Veränderung der Oberflächenbe-

schaffenheit sind während des Tiefziehvorgangs zeitlich und örtlich verschieden und aus diesem Grund nur sehr schwer zu erfassen. Bis heute existieren nur vereinzelt Ansätze zur Lösung dieser Problematik, von denen sich nur wenige durchgesetzt haben. Hauptgründe hierfür sind, daß die bei diesen Ansätzen getroffenen Annahmen die tiefziehtechnische Realität entweder nicht hinreichend praxisnah beschreiben oder versuchstechnische Vereinfachungen außerhalb des Labors nicht umsetzbar sind.

Aus den o.g. Gründen wurde eine Methode zur Vorherbestimmung der Rückfederung an Tiefziehteilen entwickelt, die in der Konstruktion und der Fertigung eingesetzt werden kann. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methodik ist die implizite Verarbeitung von Störgrößen und unbekanntem Parametern bei der Vorhersage der Tiefziehergebnisse. Eine Vernachlässigung dieser Größen setzt die Aussagekraft der Ergebnisse herab und macht sie für einen praxisnahen Einsatz ungeeignet. **Bild 1** zeigt die vier Hauptschritte, die zwecks Rückfederungsvorhersage durchlaufen werden müssen.

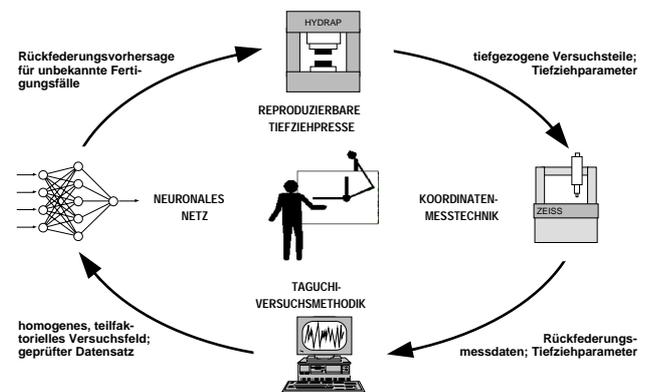


Bild 1: Szenario zur Rückfederungsvorhersage von Tiefziehteilen

Zunächst werden auf einer Tiefziehpresse Blechteile unter Variation der einzustellenden Tiefziehparameter hergestellt. Der zweite Schritt beinhaltet die Vermessung der so hergestellten Blechteile bzgl. ihrer Rückfederungswerte. Schließlich erfolgt die Auswertung nach der sogenannten Taguchi-Versuchsmethodik, die gleichzeitig das für den er-

sten Schritt notwendige Versuchsschema vorgibt. Mit diesen Daten wird dann im letzten Schritt ein künstliches neuronales Netz entwickelt, angepaßt und trainiert, so daß hierauf basierend Vorhersagen für Blechteile ähnlicher Geometrie bzgl. ihrer Rückfederungen geliefert werden können

2 Versuchseinrichtungen

In mehreren Versuchsreihen wurden unter Nutzung der am Institut für Umformtechnik (IFUM) der Universität Hannover befindlichen Ziehpresse (einfach wirkende hydraulische Doppleständer Stanz- und Ziehpresse der Firma Hydrap) fast 400 rechteckige Näpfe gezogen. Innerhalb der Versuchsreihen wurden Tiefziehparameter und Werkstoffe nach vorheriger Festlegung durch die Taguchi-Versuchsmethodik variiert.

Für die durchgeführten Versuche wurden nach DIN 1623 Feinbleche der Dicke 1 mm verwendet. Die Werkstoffkennwerte der in dieser Untersuchung benutzten Bleche wurden auf einer Zugprüfmaschine der Firma DynaMess am IFUM ermittelt. Hierbei wurden die einzelnen Proben in Walzrichtung, also unter 0°, getestet, wobei von jedem Werkstoff drei Zugproben angefertigt und deren Ergebnisse arithmetisch gemittelt wurden.

Die tiefgezogenen Teile wurden anschließend auf der am Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal befindlichen Koordinatenmeßmaschine (Zeiss UMM 550) mittels CNC-Programm hinsichtlich ihrer Rückfederungserscheinungen vermessen.

3 Taguchi-Versuchsmethode

Allgemein hat man bei statistischen Methoden und Klassifikatoren, also z.B. neuronalen Netzen, stets das grundlegende Problem, eine möglichst repräsentative Datenmenge zur Weiterverarbeitung vorliegen zu haben. Die Daten sollen zufällig ermittelt sein, um insbesondere bei geringen Probenzahlen unbeabsichtigte Gewichtungen zu vermeiden. Aus diesem Grund müssen bei der Gewinnung solcher Datensätze bestimmte Vorgehensweisen unbedingt eingehalten werden. Die Taguchi-Versuchsmethodik ist im Zusammenhang dieser Untersuchung ein Werkzeug, um einen zufälligen Datensatz, der aber gleichzeitig das gesamte Versuchsfeld systematisch abdeckt zu erzeugen. Desweiteren ist es wichtig, die ausgewählten Einflußparameter so zu untersuchen, daß die Wirkung eines

Parameters nicht die Wirkung eines anderen verfälscht. Um in einem Faktorversuch die Unabhängigkeit der Effekte zu gewährleisten, arbeitet man daher mit sogenannten orthogonalen Versuchsfeldern.

Orthogonale Versuchspläne haben die Form einer Matrix. In dieser Matrix wird jede Spalte mit einem zu untersuchenden Faktor belegt. Die Faktoren besitzen unterschiedliche Einstellwerte, die als Stufen bezeichnet werden. Die Kennzeichnung der einzelnen Stufen erfolgt im Versuchsplan durch die Zahlen „1“ und „2“ (**Tabelle 3.2**).

Die Zeilen der Versuchsmatrix entsprechen der jeweiligen Faktorkombination. Eine Faktorkombination stellt einen Versuch innerhalb eines Experiments dar.

3.1 Erstellung des Versuchsplans

1. Festlegung der Versuchsparameter:

Zunächst müssen die Faktoren bestimmt werden, die den Ziefziehprozeß entscheidend beeinflussen. In Diskussionen mit blechverarbeitenden Betrieben und Forschungsstellen wurden folgende Parameter als besonders wichtig herausgestellt und daher in den vorliegenden Untersuchungen berücksichtigt:

- Niederhalterdruck,
- Ziehverhältnis,
- Ziehgeschwindigkeit,
- Schmierung und
- Stempelkantenradius.

Obwohl ebenfalls von großem Interesse, wurden die Faktoren Blechdicke und Ziehringradius in den hier durchgeführten Untersuchungen nicht variiert. Grund hierfür ist, daß sie gleichzeitig zu viele weitere Invarianten mit einbrächten (Blechdicke/-Charge, Oberfläche, Anitocoritbenetzung usw.; Ziehringradius, Werkzeugoberfläche, Formabweichungen, Ecken-Kanten-Radienverhältnis usw.). Diese Parameter sollen daher erst in späteren Versuchsreihen berücksichtigt werden.

2. Festlegung der Einstellwerte:

Nachdem die zu untersuchenden Haupteinflußfaktoren gefunden wurden, können nun deren Einstellwerte festgelegt werden. Um die Effekte der Faktoren möglichst deutlich herauszustellen, sollten

die Einstellwerte technisch sinnvolle Extremwerte darstellen. Als Grenzen des Tiefziehprozesses können Bodenreißer und Faltenbildung angegeben werden. Auf sie ist bei der Festlegung der Einstellwerte zu achten.

Nach Vorversuchen und einer Abstimmung mit tiefzieherfahrenen Praktikern wurden die Einstellungen der Parameter für die unterschiedlichen Versuchsreihen festgelegt. **Tabelle 3.1** stellt die Parameter der Versuchsreihe DC 05 - einseitig elektrolytisch verzinkt - exemplarisch dar.

DC 05	Stufe 1	Stufe 2
Niederhalterdruck	2 N/mm ²	3 N/mm ²
Ziehverhältnis	$\beta_1 = 1,6$	$\beta_2 = 1,77$
Ziehgeschwindigkeit	$v_1 = 14,4$ mm/s	$v_2 = 22,4$ mm/s
Schmierung	Anlieferungszustand (Anticorit)	Ziehöl CLF 180 der Firma Raziol
Stempelkantenradius	$r_1 = 6$ mm	$r_2 = 12$ mm

Tabelle 3.1: Parametereinstellungen Versuchsreihe DC 05 (einseitig elektrolytisch verzinkt)

Die Ziehverhältnisse wurden Tabellenwerken aus /1/ entnommen. Die Ziehgeschwindigkeiten wurden nach Pressenmöglichkeiten festgelegt. Bei der Schmierung wurde der Anlieferungszustand untersucht. Die angelieferten Bleche sind aus Korrosionsschutzgründen mit Anticorit benetzt. Desweiteren wurde das in der Industrie weit verbreitete Ziehöl CLF 180 der Firma Raziol untersucht. Bei den Stempelkantenradien wurden 6 mm und 12 mm untersucht. Diese Radien waren durch die zur Verfügung stehenden Werkzeuge vorgegeben.

3. Zuordnung des Versuchsfeldes:

Um die Zuordnung durchzuführen, werden die gefundenen Haupteinflussfaktoren zunächst mit Buchstaben gekennzeichnet. Es folgt:

- A Niederhalterdruck
- B Ziehverhältnis

- C Ziehgeschwindigkeit
- D Schmierung
- E Stempelkantenradius

Die Zuordnung der Parameter und deren Wechselwirkungen auf das Versuchsfeld wird mit Hilfe eines linearen Graphen vorgenommen. Da sämtliche Wechselwirkungen der Parameter untereinander interessieren, wird ein diesen Sachverhalt beschreibender Graph gewählt, welcher in **Bild 3.1** zu sehen ist.

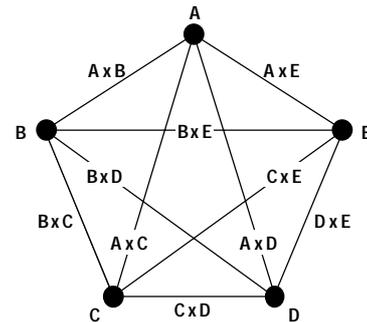


Bild 3.1: Linearer Graph der Versuchsmatrix /2/

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Faktoren	A	B	AxB	C	AxC	BxC	DxE	D	AxD	BxD	CxE	CxD	BxE	AxE	E
Versuch																
1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2		1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3		1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4		1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5		1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6		1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7		1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8		1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9		2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10		2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11		2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12		2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13		2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14		2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15		2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16		2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Tabelle 3.2: Versuchsmatrix L16 mit zugeordneten Parametern und Wechselwirkungen (DC 05 einseitig elektrolytisch verzinkt)

Zur Ermittlung der erforderlichen Größe des Feldes werden sämtliche Freiheitsgrade der einzelnen Parameter und Wechselwirkungen addiert. Die Summe aller Freiheitsgrade muß gleich oder kleiner

dem Freiheitsgrad des Feldes sein. Um den Freiheitsgrad des Feldes zu ermitteln, muß von der Anzahl der Versuche, welche durch das orthogonale Feld festgelegt wird, der Wert 1 subtrahiert werden. Demzufolge sind für die hier zu untersuchenden Versuchsreihen mindestens Versuchsfelder der Größe L16 zu verwenden. **Tabelle 3.2** zeigt das Versuchsfeld für den Werkstoff DC 05.

In Form der Versuchsmatrix sind nun die Faktorkombinationen für jeden Versuchslauf festgelegt. Um eine statistische Absicherung der einzelnen Versuche zu erhalten, wird jeder Versuch mehrmals durchgeführt, wobei die Anzahl der Wiederholungen bei den hier vorliegenden Versuchsreihen von der zur Verfügung stehenden Menge eines jeden Werkstoffs abhängig waren.

Tabelle 3.3 zeigt den endgültigen Versuchsplan. Da sich die Parameterwechselwirkungskombinationen aus den Einstellungen der einzelnen Parameter ergeben, sind im Versuchsplan nur die betreffenden Spalten 1, 2, 4, 8 und 15 aus **Tabelle 3.2** angegeben. In den Versuchsplanspalten 8 bis 11 sind die Nummern der jeweiligen Werkstücke, in Spalte 7 ist die Reihenfolge der einzelnen Versuche dargestellt. Die eindeutige Kennzeichnung der Werkstücke erfolgt nach dem Tiefziehvorgang mit Hilfe einer Reißnadel.

1	2	3	4	5	6	7	8 9 10 11			
							Probennummer			
Parameter	Niederhaltedruck	Ziehverhältnis	Ziehgeschwindigkeit	Schmierung	Stempelkantenradius	Versuchsreihenfolge	Wiederholung 1	Wiederholung 2	Wiederholung 3	Wiederholung 4
Sp.-Nr. in Orthogonaltafel	A	B	C	D	E					
Merkmalskombination	1	2	4	8	15					
1	1	1	1	1	1	4	13	14	15	16
2	1	1	1	2	2	12	45	46	47	48
3	1	1	2	1	2	13	49	50	51	52
4	1	1	2	2	1	6	21	22	23	24
5	1	2	1	1	2	15	57	58	59	60
6	1	2	1	2	1	7	25	26	27	28
7	1	2	2	1	1	2	5	6	7	8
8	1	2	2	2	2	9	33	34	35	36
9	2	1	1	1	2	14	53	54	55	56
10	2	1	1	2	1	5	17	18	19	20
11	2	1	2	1	1	3	9	10	11	12
12	2	1	2	2	2	11	41	42	43	44
13	2	2	1	1	1	1	1	1	2	3
14	2	2	1	2	2	10	37	38	39	40
15	2	2	2	1	2	16	61	62	63	64
16	2	2	2	2	1	8	29	30	31	32

Tabelle 3.3: Versuchsplan für Versuchsreihe DC 05 (einseitig elektolytisch verzinkt)

3.2 Auswertung der Versuche

3.2.1 Werkstück- und Werkzeugvermessung

Für jede einzelne Napfseite wurde ein Meßprotokoll erstellt. Mittels der Meßmaschinensoftware konnten Minimum und Maximum einer jeden Meßkurve ermittelt werden. Hieraus wurden die t-IST-Abweichungen bestimmt. Diese Werte sind ein Maß für die Rückfederung. Die Rückfederung ist die geometrische Abweichung des Werkstücks vom Fertigungswerkzeug, welches auf Sollmaß gefertigt ist. Um diese Abweichung bestimmen zu können, wurden die Werkzeuge vermessen. Die Meßergebnisse ergaben eine sehr gute Übereinstimmung mit den Angaben in der Fertigungszeichnung. Auch Formabweichungen der Werkzeuge waren nicht nachweisbar.

3.2.2 Auswertung der Meßergebnisse

Die Auswertung der Meßergebnisse wird hier exemplarisch an der Versuchsreihe DC 05 - einseitig elektolytisch verzinkt - durchgeführt.

Die Taguchi Versuchsmethodik schreibt zunächst vor, das Signal-Rausch-Verhältnis für die Meßwerte zu berechnen. Ist der Rauschabstand groß, liegt ein gutes Signal vor, das durch das Rauschen kaum gestört wird. Unter Rauschen ist in diesem Fall die Streuung der Meßwerte innerhalb eines Versuchs zu verstehen. Die auftretenden Fehler von Wiederholung zu Wiederholung eines jeden Versuchs werden durch den S/N-Wert /3/ ebenfalls berücksichtigt.

Die versuchstechnisch gewonnenen Daten werden der **Tabelle 3.3** zugeordnet. Anschließend wird für jede Merkmalskombination das Signal-Rausch-Verhältnis in der neuen Spalte 12 gebildet. Nachdem die S/N-Werte für alle 16 Versuche gebildet wurden, wird deren Summe errechnet. Hieraus ergibt sich der Mittelwert der S/N-Werte. Nun kann die Quadratsumme der Abweichungen vom Mittelwert gebildet werden. Nachdem die S/N-Werte bestimmt worden sind, wird als nächstes die durchschnittliche Wirkung der Einstellungen eines jeden Faktors berechnet. Dies geschieht, indem man diejenigen S/N-Werte addiert, die laut Versuchsmatrix die gleichen Indizes besitzen. Die Addition der S/N-Werte für die jeweiligen Faktoreinstellungen erfolgt in den Spalten 2 und 3 der **Tabelle 3.4** zum Summeneffekt der jeweiligen Stufe. Die Einzeleffekte in den Spalten 4 und 5 ergeben sich aus der Division der Summeneffekte durch die Anzahl der Faktoreinstellungen. Anschließend wird in

Spalte 6 der **Tabelle 3.4** die Abweichung zwischen den Einzeleffekten der jeweiligen Faktoren ermittelt.

Aus den Zahlenwerten in Spalte 6 läßt sich bereits qualitativ ableiten, welche Faktoren oder Wechselwirkungen einen großen Einfluß auf das Gesamtsystem ausüben. Im vorliegenden Fall übt der Faktor B (Ziehverhältnis) den größten Einfluß mit einer Abweichung von -1,9509 aus.

Um eine quantitative Aussage über den Einfluß der einzelnen Parameter und Wechselwirkungen treffen zu können, wird eine Varianzanalyse durchgeführt. Zu diesem Zweck werden die Variation S und der Varianz V der einzelnen Faktoren in Spalte 7 bestimmt.

1	2	3	4	5	6	7	8
Faktoren	Summen- effekt Stufe 1	Summen- effekt Stufe 2	Einzel- effekt Stufe 1	Einzel- effekt Stufe 2	Abwei- chung	S und V (da alle Frei- heits- grade=1)	Prozent- Anteil [%]
A	34,2079	29,7691	4,2760	3,7211	-0,5549	1,2314	4,3
B	39,7919	24,1851	4,9740	3,0231	-1,9509	15,2234	52,7
AxB	34,0682	29,9088	4,2585	3,7386	-0,5199	1,0813	3,7
C	31,3376	32,6393	3,9172	4,0799	0,1627	0,1059	0,4
AxC	32,5730	31,4039	4,0716	3,9255	-0,1461	0,0854	0,3
BxC	32,3230	31,6540	4,0404	3,9567	-0,0836	0,0280	0,1
DxE	32,2114	31,7656	4,0264	3,9707	-0,0557	0,0124	0,0
D	29,6926	34,2844	3,7116	4,2855	0,5740	1,3178	4,6
AxD	33,0510	30,9260	4,1314	3,8657	-0,2656	0,2822	1,0
BxD	31,9785	31,9985	3,9973	3,9998	0,0025	0,0000	0,0
CxE	31,9670	32,0100	3,9959	4,0012	0,0054	0,0001	0,0
CxD	31,7759	32,2011	3,9720	4,0251	0,0532	0,0113	0,0
BxE	34,1612	29,8158	4,2702	3,7270	-0,5432	1,1802	4,1
AxE	31,7037	32,2733	3,9630	4,0342	0,0712	0,0203	0,1
E	37,7622	26,2148	4,7203	3,2769	-1,4434	8,3338	28,8
							100,0

Tabelle 3.4: Taguchi-Berechnungstabelle der Versuchsreihe 0 (DC 05)

In Spalte 8 ist der prozentuale Anteil p eines jeden Faktors an der Qualitätsmerkmalsänderung angegeben. Man erkennt, daß der Faktor B, das Ziehverhältnis, mit einem Prozentanteil von $p_B = 52,7 \%$

den größten Einfluß auf das Qualitätsmerkmal Rückfederung hat.

3.2.3 Einflüsse auf die Rückfederung

Die im vorangegangenen Kapitel errechneten Einflüsse sind ausschließlich für die hier exemplarisch dargestellte Versuchsreihe (DC 05 - einseitig elektrolytisch verzinkt) gültig. Die Werkstoffe der anderen Versuchsreihen weisen zwar ähnliche, nicht aber identische Ergebnisse auf.

3.2.3.1 Technologische Einflüsse

Den größten Einfluß auf die Formabweichung der

Tiefziehteile der hier untersuchten Versuchsreihe hat mit 52,7 % das Ziehverhältnis (B). Der Einfluß der anderen technologischen Parameter liegt unter 10 %. Der Prozentanteil des Niederhalterdrucks (A) liegt bei 4,3 %, der Anteil der Schmierung (D) bei 4,6 %. Den geringsten Einfluß übt die Ziehgeschwindigkeit (C) mit 0,4 % aus.

3.2.3.2 Einfluß der Geometrie

Einflüsse auf die Rückfederung, welche durch die Geometrie des Werkstücks festgelegt sind, wurden im vorliegenden Fall durch die Variation des Stempelkantenradius berücksichtigt.

Der Einfluß des Stempelkantenradius (E) wurde mit einem Anteil von 28,8 % am Gesamtergebnis ermittelt. Der Stempelkantenradius übt insgesamt den zweitstärksten Einfluß auf die Formabweichung aus. Die Gesamtformabweichung der untersuchten Werkstücke läßt sich somit durch Einstellungen der Parameter B und E (Ziehverhältnis und Stempelkantenradius) zu 80 % beeinflussen. Diese beiden Parameter stellen die Haupteinflussfaktoren dar.

3.2.3.3 Parameter-Wechselwirkungen

Der prozentuale Anteil der Wechselwirkungen zwischen den Parametern ist in **Tabelle 3.4** ebenfalls angegeben. Auch hier liegt die stärkste Wechselwirkung zwischen den Parametern B und E vor. Dieser Einfluß wurde unter Berücksichtigung des S/N-Wertes zu 4,1 % bestimmt. Weitere signifikante Wechselwirkungen treten lediglich noch zwischen den Parametern A und B (Niederhalterdruck und Ziehverhältnis) sowie zwischen den Parametern A und D (Niederhalterdruck und Schmierung) auf. Der Gesamtanteil der Wechselwirkungseinflüsse auf den Gesamteffekt beträgt 9,3 %.

4 Künstliche neuronale Netze

Im folgenden werden die aus den Versuchsreihen resultierenden Rückfederungsdaten des Werkstoffs DC 05 (einseitig elektrolytisch verzinkt) mittels künstlicher neuronaler Netze analysiert.

Künstliche neuronale Netze orientieren sich in ihrem Aufbau und ihrer Konzeption am biologischen Vorbild Nervensystem /4/. Sie versuchen, dessen Strukturen und Funktionsweisen nachzubilden und komplexe menschliche Denkvorgänge zu simulieren. Ein solches künstliches System besteht ähnlich dem Gehirn aus einer Vielzahl gleichartiger Elemente (Neuronen), die parallel und unabhängig voneinander Informationen speichern, verarbeiten und weiterleiten.

Es gibt heute eine Vielzahl unterschiedlicher künstlicher neuronaler Netztypen. Welcher Typ bei welchem Anwendungsfall Verwendung findet, ist stets von der vorliegenden Problemstellung abhängig. Ein neuronales Netz muß immer auf die vorliegende Problematik angepaßt werden. Die Grundbausteine der Netze, also die kleinsten Verarbeitungseinheiten, die Neuronen, unterscheiden sich bei den verschiedenen Netztypen nur wenig.

Prinzipiell kann ein Neuron als Schaltung verstanden werden, welche eine Ausgabe erzeugt, wenn der kumulative Effekt der Eingabereize einen bestimmten Schwellenwert übersteigt, d.h. für jeden Eingabezweig gibt es externe Eingabesignale oder Reize sowie eine entsprechende Gewichtung. Diese Gewichtung stellt eine Art Filter dar. Sie kann die Eingabesignale verstärken (exzitatorische Eingabe) oder abschwächen (inhibitorische Eingabe). Die Gewichtung $w = 0$ bedeutet „keine Verbindung“. Eingabewerte, Gewichtungen und Ausgabewerte können reell (+ oder -), binär (0, 1) oder bipolar (-1, +1) sein.

4.1 Backpropagation-Netz

Die Entwicklung der neuronalen Netze für die vorliegende Problemstellung der Rückfederungsvorhersage an Tiefziehteilen stellte eine stark iterativ geprägte Vorgehensweise dar. Zahlreiche Netztypen wurden angepaßt, durchgerechnet und optimiert. Nach der Testphase mit diversen Netztypen zeigt sich das Backpropagation-Netz (Fehlerrückführungsmethode, **Bild 4.1**) als für die vorliegende Problemstellung am besten geeignet. Hierbei handelt es sich um ein Feedforward-Netzwerk, welches mindestens eine interne Schicht (Hidden-Layer) besitzt. Diese Art von Netzwerken ist in der Lage, auf Basis von nichtlinearen Daten zu arbeiten.

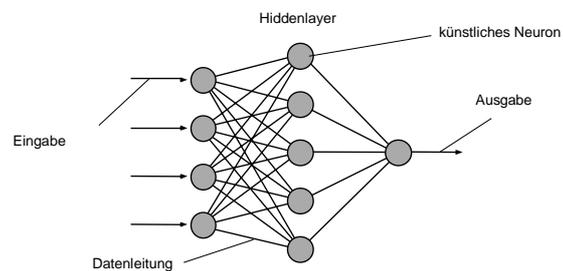


Bild 4.1: Backpropagation-Netz

Das Backpropagation-Netz besteht aus einem Input-Layer, einem oder mehreren Hidden-Layern und einem Output-Layer. Der Input-Layer dient zur Eingabe der Daten, welche reelle Zahlen zwischen 0 und 1 sein müssen. Liegen von der Wertigkeit her größere Eingabedaten vor, so müssen diese erst normiert werden. Die Neuronen des Input-Layers haben die Aufgabe, die eingegebenen Daten auf den nachfolgenden Layer zu verteilen. Die Anzahl der Input-Neuronen ergibt sich aus der vorliegenden Problemstellung. In der Gewichtung des Hidden-Layers ist ein Teil des gelernten Wissens gespeichert. Der Output-Layer dient zur Ausgabe der vom Netzwerk erzeugten Antworten auf die Input-Werte. Die Gewichtungen der Output-Neuronen beinhalten ebenfalls einen Teil des Wissens. Auch hier ist die Neuronenanzahl von der Problemstellung abhängig /5/.

Die Arbeitsweise eines Backpropagation-Netzes stellt sich somit wie folgt dar:

Die Input-Neuronen antworten auf ein Eingabemuster mit Werten, die auf die Hidden-Neuronen gegeben werden. Deren Ausgänge wirken wiederum auf das oder die Neuronen des Ausgabe-Layers und erzeugen einen Output. Der Output O wird mit

dem gewünschten Wert t (target) verglichen. Hieraus wird dann entsprechend untenstehender Gleichung der quadratische Fehler E berechnet.

$$E = \frac{1}{2} \sum_k (t_k - O_k)^2$$

Ausgehend von diesem Fehler werden die Gewichtungen der Neuronen im Output- und Hidden-Layer verstellt. Anschließend wird dem Netz ein neues Eingabemuster bereitgestellt, eine Antwort hieraus berechnet und erneut ein Fehler gebildet. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis Output O und gewünschter Output t genügend nahe beieinander liegen und das Abbruchkriterium erreicht wird. Das Netz ist dann trainiert und steht für Vorhersagen zur Verfügung.

4.2 Vorhersageergebnisse auf Basis ausgewählter neuronaler Netze

Bevor die ausgewählten Backpropagation-Netze mit den versuchsresultierenden Parameterwerten beaufschlagt werden können, müssen diese zunächst auf einen Wertebereich unter eins normiert werden. Um nach der Normierung den Trainingsvorgang zu starten, müssen die Anzahl der Neuronen und die anzuwendenden Aktivierungsfunktionen für die Neuronenschicht und die Ausgabeschicht des Netzes festgelegt werden. In Vorversuchen hat sich gezeigt, daß besonders gute Ergebnisse mit ein bis drei Neuronen unter Anwendung von logsig-, tansig- und linearen Aktivierungsfunktionen sowie deren Kombinationen erzielt werden konnten. Trainingsversuche mit einer höheren Anzahl von Neuronen oder anderen Aktivierungsfunktionen, wie z.B. die Schwellwertfunktion, lieferten eher schlechte Ergebnisse.

Nun wird der elektrolytisch einseitig verzinkte DC 05 getestet. Hier liefert ein Backpropagation-Netz mit zwei Neuronen im Hidden-Layer und einer doppelten logsig-Aktivierung beste Ergebnisse (minimale Abweichung). **Bild 4.2** stellt die verschiedenen Netze gegenüber.

Die hier vorhergesagten Rückfederungen von Tiefziehteilen sind den neuronalen Netzen in den abgefragten Parameterkombinationen nicht „bekannt“. Im Gegensatz zu einer Datenbank greifen die trainierten Netze auf ihr „Erfahrungswissen“ zurück, um auf unbekannte Fertigungs- bzw. Konstruktionsfälle zu schließen und hier Vorhersagen zu treffen.

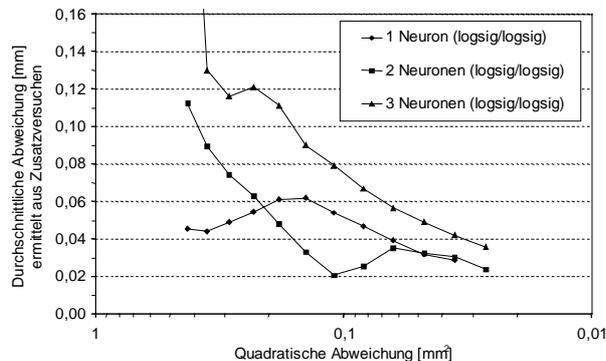


Bild 4.2: Vergleich der Backpropagationsnetze mit optimalen Aktivierungsfunktionen bei ein, zwei und drei Neuronen

Allgemein muß zu oben stehendem Bild gesagt werden, daß die künstlichen neuronalen Netze in dieser Untersuchung zwischen 15 000 und 20 000 Iterationsschritte je durchgerechneter Startwertekombination bzw. je Reihe abarbeiten und nicht wie die einzelnen Punkte auf den Graphen vermuten lassen - nur 15 bis 20 Schritte. Der Übersichtlichkeit wegen wurden aber nur die Koordinatenwerte jedes tausendsten Iterationsschritts herausgeschrieben und zur Graphenbildung verwendet.

Die erzielte durchschnittliche Abweichung zwischen den durch das künstliche neuronale Netz und den durch Versuche ermittelten Ergebnissen liegt bei 0,0205 mm und kann damit als sehr gut eingestuft werden. **Bild 4.3** stellt diese Differenz graphisch dar.

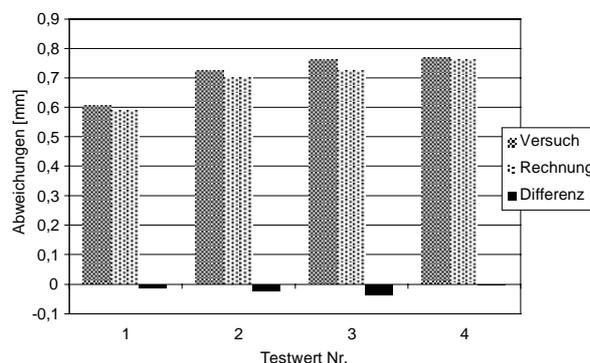


Bild 4.3: Vergleich von Versuchs- und Rechnungswerten zufällig ausgewählter Parameterkombinationen

Das neuronale Netz ist auf jede beliebige Geometrie, also auch auf Freiformflächen, trainierbar.

Wichtig hierbei ist, daß das System auf eine bestimmte Tiefziehpresse „eintrainiert“ wird, also nicht für Pressen allgemein bzw. nicht einmal für Pressen gleicher Bauart Gültigkeit hat. So wie ein Relativkostenkatalog immer nur für ein einziges Unternehmen Gültigkeit hat, könnte man von einer „Relativrückfederungsvorhersage“ sprechen, da auch hier die gelieferten Daten allein für eine bestimmte Presse gelten. Nur mittels dieser Vorgehensweise ist es möglich, besondere Charakteristika von Pressen bzw. Störgrößen bei der Rückfederungsvorhersage zu berücksichtigen. Ist das neuronale Netz ausreichend trainiert, kann der Konstrukteur ohne weiteres Training mit dem System arbeiten. Erst bei der Änderung einer Vorgabe, also z.B. eines neuen Werkstoffs oder eines neuen Werkzeugs, muß das System neu eintrainiert werden. Die bis dahin vorliegenden Rückfederungsdaten können aber als Basis weiterverwendet werden und so den Trainingsvorgang für die neuen Vorgaben abkürzen.

5 Zusammenfassung

Um die dargestellte Vorgehensweise für die Praxis nutzbar zu machen, wird es im weiteren Verlauf notwendig sein, zusätzliche Tiefziehgeometrien zu trainieren. Insbesondere rotationssymmetrische Geometrien und Freiformflächen sollten ihre Anwendung finden. Als positiv in diesem Zusammenhang ist zu werten, daß mittels der hier erstellten Fallbasis zukünftig weitaus geringere Probenzahlen für neue Trainingsreihen notwendig sein werden. So wurden in dieser Arbeit drei unterschiedliche Werkstoffarten trainiert: ein unlegierter Stahl, ein höherfester Stahl und eine Aluminiumlegierung. Jede dieser Reihen zeigte ein ihr eigenes „Verhaltensmuster“. Trotzdem sind Bereiche der „Verhaltensmuster“ identisch oder mindestens ähnlich. Das künstliche neuronale Netz ist in der Lage, auf Basis einer geringen Probenzahl eines neuen Werkstoffs Analogien zu bereits in der Fallbasis enthaltenen Fertigungsfällen herzustellen und auf diese Weise eine Beurteilung zu ermöglichen. Hierfür müssen lediglich 30 bis 40 Versuche unter Variation der Parameter mit dem neuen Blech durchgeführt werden. Mittels der hieraus gewonnenen Rückfederungswerte und den „Erfahrungen“ bzw. Kenntnissen über die „Verhaltensmuster“ früherer Versuchswerkstoffe trifft das Netz für den neuen Werkstoff im Rahmen der angesprochenen Genauigkeiten Rückfederungsvorhersagen. Dabei ist durchaus auch eine gleichzeitige Änderung mehrerer Para-

meter möglich, also beispielsweise neuer Werkstoff und neuer Schmierstoff.

Ein Ausbau dieser Methodik hinsichtlich eines formfeature-basierten Ansatzes zur Erkennung, Klassifizierung und Kombination von Geometriemerkmalen würde es weiterhin möglich machen, auch unbekannte Geometrien - aktuelle Konstruktions- und Fertigungsfälle - vorhersagen zu können. Es empfiehlt sich daher, dieses System an ein 3D-CAD-System zu koppeln.

Der Konstrukteur muß letztendlich durch solch ein Werkzeug in die Lage versetzt werden, an seinem Arbeitsplatz Rückfederungsdaten von gerade konstruierten Blechteilen abrufen und somit die Konstruktion entsprechend auslegen zu können.

Der Fertigungstechniker kann im Umkehrschluß dieses Tool nutzen, um festzustellen, wie er die Rückfederungswirkung eines vorliegenden Tiefziehwerkzeugs durch Änderungen von Parametereinstellungen beeinflussen kann.

Abschließend kann gesagt werden, daß sich die hier gewählte Vorgehensweise der Tiefziehidentifikation mittels künstlicher neuronaler Netze als sehr vielversprechend darstellt und daher zu einer intensiven Weiterverfolgung dieser Thematik berechtigt

6 Literaturverzeichnis

- /1/ König, W.: *Fertigungsverfahren*, VDI Verlag, Düsseldorf, 1990
- /2/ Kottmaier, J.: *Versuchplanung — Der Weg zur Qualität des Jahres 2000*, TÜV Rheinland Verlag, Zürich, 1990
- /3/ Hering, E.; Triemel, J.; Blank, H.-P.: *Qualitätssicherung für Ingenieure*, Springer Verlag, Düsseldorf, 1993
- /4/ Berns, K.; Kolb, T.: *Neuronale Netze für technische Anwendungen*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1994
- /5/ Blievernich, F.; Hartwig, W.; Hillert, F.; Hofmann, I.: *Assoziative Mustererkennung mit Hilfe neuronaler Netze*, Universität Bremen, Forschungsbericht, Bremen, (1990)

Rapid Tooling - Schnelle Herstellung von Prototypenwerkzeugen für den Formbau

Klemp, E.

Der Einsatz von Rapid Prototyping Werkzeugen im Formbau gewinnt immer größere Bedeutung. Zur schnellen Herstellung von Prototypenwerkzeugen ist es notwendig, die Einsatz- und Nachbearbeitungsmöglichkeiten und die erreichbaren Qualitäten zu kennen. Dazu wurden im Rahmen des EU Projektes RPTOOL Untersuchungen zur Erodierbarkeit und zum Werkstoffverhalten durchgeführt.

The use of Rapid Prototyping Tools is steadily increasing. In order to use these materials in industrial applications as tools, it is vital to know about the post-processing methods and capabilities of the material. In the frame of the European project RPTOOL investigations were carried out in order to prove the application with Electric discharging method (EDM) and the metallurgical behaviour.

1 Einleitung

Neben dem Rapid Prototyping findet das Rapid Tooling immer mehr Anwendungsbereiche und Nutzer. Dies ist nicht nur auf die Zeiteinsparungen in der Produktentwicklung und den damit einhergehenden Kostenreduzierungen zurückzuführen, die Qualität der Produkte hat hier einen ebenso großen Einfluß. In diesem Dreieck zwischen Kosten, Zeit und Qualität verspricht das Rapid Tooling dem Anwender einen erheblichen Wettbewerbsvorteil. Auch am IMW hat sich in dem vergangenen Jahr einiges zu diesem Themengebiet getan. Neben den Bestrebungen der Beschaffung einer Rapid Prototyping Maschine, wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Cardiff ein Europäisches Forschungsprojekt im Bereich CRAFT erfolgreich beantragt, dessen Ziel es ist, das Verfahren des Rapid Tooling in Hinsicht auf mögliche Anwendungen beim Bau von Werkzeugen zu verbessern, und diese Technik bei den beteiligten Unternehmen zu integrieren.

2 Projektinhalt

Industrieprojekte, die von der Europäischen Kommission im Bereich CRAFT gefördert werden, haben das primäre Ziel, für die beteiligten KMU einen wirtschaftlichen Nutzen zu erbringen. Da den KMU meist keine Mittel zur Verfügung stehen, um eigene Forschung zu betreiben, übernimmt diese Aufgabe

ein oder mehrere Forschungsdienstleister. Das Projekt RPTOOL hat die Zielsetzung, den beteiligten Unternehmen den Zugang zu Forschung zu verschaffen, damit sie einen Wettbewerbsvorteil erlangen. Daher wurde bei der Projektbeantragung mit den beteiligten Industriepartnern ein Projektplan ausgearbeitet, der die folgenden Ziele verfolgt: Zu Beginn wird eine Analyse der Anforderungen an die Herstellung von LMT- Produkten durchgeführt (LMT – Layer Manufacturing Technique). Die anschließende Analyse liefert die möglichen Parameter wie zum Beispiel Genauigkeit und Oberflächenbeschaffenheit, insbesondere der Nachbearbeitungsmöglichkeiten der im Rapid Tooling hergestellten Bauteile oder Werkzeuge. Auf Basis dieses Wissens wird dann eine Simulation des Spritzverfahrens für verschiedene Werkstoffe durchgeführt und die Erstellung eines Auswahlsystemes für die Nutzung von Rapid Tooling Produkten bildet dann zusammen mit der Evaluation der Ergebnisse den Projektabschluß. In jedem dieser Schritte wird unter Berücksichtigung der Aufgabenstellung und der firmenpezifischen Probleme, eine Lösung gefunden.

Das Projekt mit der Laufzeit von 2 Jahren befindet sich zur Zeit noch im Anfangsstadium, so daß bisher nur grundlegende Untersuchungen durchgeführt wurden, die sich mit der Verwendung von RP Produkten beschäftigten. Ziel dieser Untersuchungen war es bisher, die Eigenschaften des Materials zu bestimmen und mögliche nachfolgende Bearbeitungsmethoden zu untersuchen. Bei diesen grundlegenden Untersuchungen hat es sich herausgestellt, daß eine Nachbearbeitung der Rapid Tooling Werkzeuge mit Hilfe des funkenerosiven Abtragens und Untersuchungen der Materialeigenschaften relevante Schwerpunkte sind. Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen der Funkenerosion dargelegt und dann die Ergebnisse und deren Anwendung vorgestellt.

3 Grundlagen des funkenerosiven Abtragens

Die Funkenerosion ist ein abbildendes Formgebungsverfahren, bei dem der Materialabtrag an elektrisch leitfähigen Werkstoffen durch elektrische Entladungen hervorgerufen wird. Diese Entladungen finden in einer nicht leitenden Flüssigkeit, dem

sogenannten Dielektrikum, statt. Bei diesem Verfahren wird an das Werkzeug und an das Werkstück, die sich in einem geringen Abstand zueinander befinden - lediglich ein Funkenpalt wird eingestellt - eine elektrische Spannung gelegt. Zwischen den beiden gegenüberliegenden Flächen baut sich ein elektrisches Feld auf und sobald eine bestimmte Aufladung erreicht ist, kommt es zu einer Entladung in Form eines Funkens. Der Materialabtrag erfolgt dann aufgrund der elektrischen Energie, die der Funke in Wärme umsetzt. Diese Wärme bewirkt, daß das Material an der Werkstoffoberfläche teils aufschmilzt, teils verdampft. Die durch den Funken ebenfalls erzeugten Dampfblasen schleudern das geschmolzene oder verdampfte Material aus dem Entladungsbereich, wo es sofort zu staubförmigen Teilchen erstarrt.

Dieses Verfahren findet hauptsächlich seine Anwendung, wenn Bohrungen, Kerben, Spalte etc. in ein Werkstück eingebracht werden müssen, oder wenn die Oberflächengüte erhöht werden muß. Eines der Hauptanwendungsbereiche ist der Formbau, denn besonders hier treten die o. g. Geometrien häufig auf und somit erscheint die Verwendung von Rapid Tooling Werkzeugen durchaus vielversprechend.

3.1 Ziel und Durchführung der Untersuchungen

Ziel der Untersuchungen an der im IMW installierten Erodiermaschine war es, festzustellen, inwieweit sich das mit dem Rapid Tooling Verfahren der Firma DTM hergestellte Material zum Erodieren eignet. Dazu war es notwendig, Proben herzustellen und diese dann als Werkzeug (Elektrode) und als Werkstück einzusetzen.

Die Erodiermaschine erlaubt es, je nach Werkstoffpaarung Maschinenparameter zu wählen und zu verändern. Diese Einstellparameter beeinflussen im wesentlichen die Phasen des Erodierprozesses, also die Aufbauphase, die Entladungsphase und die Abbauphase. Diese Phasen werden bestimmt durch die Impulsdauer, die Periodendauer, die Pausendauer, das Tastverhältnis und die Impulsfrequenz.

Um nun die gewünschten Form- und Maßgenauigkeiten, die Oberflächengüte, die Abtragraten und den Verschleiß der Elektrode optimal zu erreichen, muß bei Verwendung von bisher nicht bekannten Werkstoffpaarung eine Anpassung der Parameter, also der Generatoreinstellungen, vorgenommen werden.

Neben den Einstellparametern an der Erodiermaschine muß untersucht werden, inwieweit das Werkstückverhalten einen Einfluß auf das Erodierergebnis hat, denn obwohl die Erodierbarkeit eines Werkstoffs von dessen mechanischen Eigenschaften unabhängig ist, haben die chemische Zusammensetzung und damit zusammenhängend, bestimmte physikalische Eigenschaften einen erheblichen Einfluß auf das Erodierverhalten.

Aus Experimenten ist bekannt, daß verschiedene Elektrodenwerkstoffe bei gleichen Werkstückwerkstoffen und Einstellparametern aufgrund eines unterschiedlichen Abtrags je Entladung verschiedene Abtragraten erbringen und sich vor allem in ihrem Verschleißverhalten unterscheiden.

3.1.1 Topographie

Um eine Bewertung des Erodierprozesses vornehmen zu können, ist es notwendig, daß die bearbeiteten Oberflächen charakterisiert werden. Die Topographie funkenerosiv bearbeiteter Oberflächen ist durch die Aneinanderreihung und Überlagerung einzelner Entladekrater bestimmt. Die Oberflächen-gestalt ist daher als narbig oder muldig zu bezeichnen, denn sie weist keine gerichteten Bearbeitungsspuren auf. Die Beschreibung der Topographie stützt sich in der Regel auf die Erfassung von Rauheitskennwerten mittels Tastschnittgeräten, allerdings kann zur schnellen überschlägigen Beurteilung der Rauheit ein Oberflächennormal verwendet, mit dessen Hilfe erodierte Oberflächen hinreichend genau verglichen und klassifiziert werden können.

Ein weiterer Einfluß auf die Oberflächenqualität hat die Elektrodenplanung. Abhängig davon, ob mit einer kompletten Formelektrode oder mit einer Kombination von mehreren einfachen Elektroden erodiert werden soll, schwankt die Qualität des Ergebnisses. Desweiteren nimmt die Anzahl der zur Verfügung stehenden Elektroden (Schrupp- und Schlichtelektroden) einen Einfluß auf die Abtragraten und auf den Verschleiß.

Um bei den durchgeführten Versuchen einen Vergleich zu erhalten, werden die Ergebnisse mit einem gebräuchlicher Elektrodenwerkstoffe, nämlich Elektrolyt-Kupfer verglichen.

3.1.2 Elektrodenherstellung

Da der Hauptvorteil in der Herstellung von Prototypen und Werkzeug mit Hilfe des Rapid Tooling Verfahrens darin liegt, daß auch komplizierte Geometrien, insbesondere Freiformflächen, direkt aus dem CAD Datensatz hergestellt werden können, ist

es naheliegend, dieses Verfahren zur Elektrodenherstellung zu nutzen und zu untersuchen, ob eine Fertigung von Elektroden, oder das Herstellen von Formen oder Formeinsätzen einen Sinn macht.

4 Erodierverhalten von Rapid Steel

Bei den durchgeführten Versuchsreihen sollte die Frage beantwortet werden, ob und inwieweit sich Rapid Steel als Werkstoff für das funkenerosive Abtragen eignet. Dabei ist sowohl das Verhalten von Rapid Steel Elektroden wie auch das von Werkstücken aus Rapid Steel von Interesse. Als Ausgangsmaterial diente zunächst eine Probe, die aus dem Material Rapid Steel 1 hergestellt worden war.

Die wichtigsten Beurteilungskriterien für das Erodierverhalten sind der auftretende Elektrodenverschleiß, die Höhe der Abtragrate, die entstehende Oberflächenqualität und die erreichbare Abbildungsgenauigkeit.

Zur Bestimmung des Erodierverhaltens von Rapid Steel wurde zunächst ein lasergesintertes Werkstück mit einer Elektrode aus Kupfer erodiert (**Bild 1**).



Bild 1: Probewerkstück aus Rapid Steel

Da es sich bei Rapid Steel um eine Legierung aus ca. 40% Kupfer und 60% Stahl handelt, wurde zunächst untersucht, welchen Einfluß der Kupferanteil und dann welchen der Stahlanteil auf das Erodierverhalten besitzt.

In einer zweiten Versuchsreihe wurde aus Rapid Steel selbst eine Elektrode hergestellt (**Bild 2**) und das Abtragverhalten an einem Formbaustahl überprüft. Dabei wurden unterschiedliche Werkstoffeinstellungen für die Elektrode gewählt.



Bild 2: Elektroden (li: Rapid Steel 1, re: Kupfer)

Im dritten Versuchsblock wurde das lasergesinterte Werkstück mit einer Rapid Steel Elektrode erodiert.

4.1 Versuchsergebnisse

Die bisher durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß Werkstücke aus Rapid Steel 1 durch funkenerosives Abtragen bearbeitbar sind und daß dabei die grundsätzlichen Zusammenhänge des Erodierens eingehalten werden. Durch Wahl der entsprechenden Technologieparameter, abhängig von der jeweiligen Werkstoffpaarung ergaben sich die folgenden Zusammenhänge:

1. Durch Impulse gleicher Energie werden die Rauheit, der Elektrodenverschleiß und die Abtragrate vorherbestimmbar und gleichmäßig.
2. Höhere Stromstärken und längere Impulse vergrößern die Abtragsmenge und verringern die Oberflächengüte.
3. Eine hohe Abtragrate bewirkt einen hohen Elektrodenverschleiß. Eine kleine Abtragrate führt zu einem geringen Elektrodenverschleiß.
4. Form- und Maßgenauigkeit, Oberflächengüte und Abtragsmenge sowie Verschleiß der Elektrode werden wesentlich von den Einstellungen des Generators während des Abtragsvorgangs bestimmt.

Beim funkenerosiven Abtragen von Werkstücken aus Stahl mit Elektroden aus Rapid Steel 1 ergaben sich hohe Abtragraten, Oberflächenqualitäten und Abbildungsgenauigkeiten, wenn mit den voreingestellten Prozeßparametern erodiert wurde, die von einer Kupfer/Stahl Werkstoff-Kombination ausgingen. Der Elektrodenverschleiß war aber relativ hoch und konnte auch durch unterschiedliche Einstellungen des Impulsstroms und der Impulsdauer nur unwesentlich verbessert werden.

Aufgrund der ansonsten sehr guten Erodierergebnisse ist der Einsatz von Elektroden aus Rapid Steel 1 aber dennoch empfehlenswert, zumal dann, wenn der Elektrodenverschleiß bei der Arbeitspla-

nung berücksichtigt wird (Elektrodenuntermaß, Nachstellbewegungen) oder eine untergeordnete Rolle spielt (Herstellung von Durchbrüchen, Schrupparbeiten, funkenerosives Schneiden, usw.).

4.2 Versuche mit Rapid Steel 2

Nach Beendigung der ersten Versuchsreihe wurde ein neues Material auf den Markt gebracht. Im Gegensatz zu Rapid Steel 1 besteht das Material Rapid Steel 2 aus einem Chromnickel Stahl, welcher nicht mit Kupfer, sondern mit Bronze infiltriert wird. Die Verwendung von Bronze führt zu einen zu besseren mechanischen Eigenschaften bezüglich Härte und Festigkeit und ist zum anderen dünnflüssiger, wodurch eine bessere Infiltration und damit ein vollständig dichtes Formteil erwartet werden kann.

Die ersten Versuche zeigen, daß sich dieses Material sehr gut als Werkzeug beim Erodieren eignet, die Verwendung als Elektrode ist aufgrund des hohen Verschleiß (geringe Formgenauigkeit) allerdings nicht ratsam.

Bei der Bearbeitung als Werkstück mit konventionellen Kupferelektroden eignet es sich sehr gut, eine hohe Oberflächengüte von R_m $2,7 \mu\text{m}$ kann erzielt werden und es liegt ein geringer Elektrodenverschleiß vor, so daß es ausreichende Formgenauigkeit zu erwarten ist.

5 Werkstoffuntersuchungen

Neben den Untersuchungen zum Erodierverhalten, sind die mechanischen Eigenschaften wie Zugfestigkeit und Härte für den Formbau von großer Wichtigkeit.. Für die Untersuchungen der Zugfestigkeit wurden Zugprobenform mit der Bezeichnung DIN 50125 – B 6 x 30 /24/ hergestellt und geprüft. Die Ergebnisse zeigt **Bild 3**. Bei dem Rapid Steel 1 Werkstoffe wurde die 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2\%}$ bei 170 N/mm^2 ermittelt. Nach Überschreitung der Proportionalitätsgrenze $R_{p0,2\%}$ beginnt der Werkstoff zu fließen. Durch den Fließvorgang kommt es zu wachsender Kaltverfestigung. Die ermittelten Zugfestigkeit beträgt für diesen Werkstoff: $R_m = 328 \text{ N/mm}^2$.

Bei dem Rapid Steel 2 Werkstoff wurde die 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2\%}$ bei 260 N/mm^2 ermittelt. Bei weiterer Steigerung der Prüfkraft erfolgte eine geringe Längenänderung der Zugprobe, so daß bei der maximalen Prüfkraft von 23 kN der Bruch erfolgte. Die ermittelten Zugfestigkeit beträgt für diesen Werkstoff: $R_m = 290 \text{ N/mm}^2$.

Spannungs-Dehnungsdiagramm

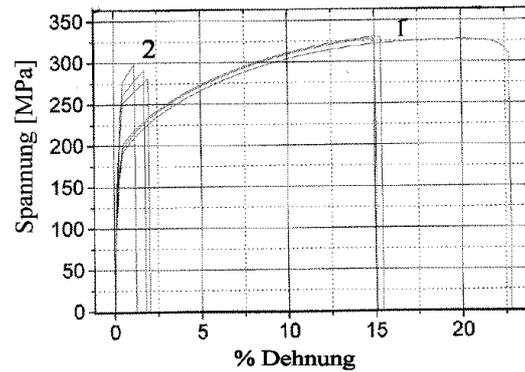


Bild 3: Spannungs-Dehnungsdiagramm

Der Spannungs-Dehnungsverlauf des Rapid Steel 1 Werkstoffes gibt das typische Verhalten eines Stahles wieder. Der ausgeprägte plastische Verformungsverlauf zwischen $R_{p0,2\%}$ und R_m entspricht dem Verhalten eines zähen Werkstoffes, damit eignet er sich ausgezeichnet für die Fertigung von Elektroden, da sich dieser Werkstoff problemlos konventionell bearbeiten läßt.

Der Spannungs-Dehnungsverlauf des Rapid Steel 2 Werkstoffes gibt das typische Verhalten eines Gußwerkstoffes wieder. Die geringe plastische Verformung zwischen $R_{p0,2\%}$ und R_m entspricht dem Verhalten eines spröden Werkstoffes, damit ist er für die Herstellung von Formteilen favorisieren, da die deutlich höheren Zugfestigkeitswerte eine bessere Verschleißfestigkeit erwarten lassen.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen der durchgeführten Versuche lassen sich generelle Aussagen über die Eignung von Rapid Steel Produkten zum funkenerosiven Abtragen und zur Eignung als Formbauwerkstoff und Werkstoff machen: Rapid Steel 1 eignet sich deutlich besser als Elektrodenwerkstoff und Rapid Steel 2.0 deutlich besser als Werkzeugwerkstoff.

7 Literatur

- /1/ Trenke, Detlef: Studienarbeit, IMW Clausthal 11/1998
- /2/ Harms, Thorsten; unveröffentlichte Diplomarbeit, IMW TU Clausthal 1998

KARE - Knowledge Acquisition and Sharing for Requirement Engineering

Heimannsfeld, K.; Judith, M.

Im September 1998 startete das EU ESPRIT Projekt 28916 KARE, in dem das Wissensmanagement in großen Organisationen und die Analyse von Kundenanforderungen komplexer Systeme (one of a kind systems) verbunden werden soll. Hauptziel des Projektes ist die Verbesserung der Erfassung und Auswertung von Kundenanforderungen in der Produktdefinitionsphase.

In September 1998 the EC ESPRIT project 28916 KARE started. KARE will combine knowledge management of large companies and the analysis of customer requirements of one of a kind systems. Main goal will be the improvement in capturing and evaluating customer requirements in the product definition phase.

beziehen, spezifiziert. Nicht funktionale Anforderungen beschreiben Abhängigkeiten die aus dem Betrieb (Human Factors, Unternehmensrichtlinien ...) oder aus der Fertigungsumgebung (Herstellungsverfahren, Maschinenauslastung, Werkstoffe, ...) resultieren. Der traditionelle Systementwurfsprozess verwendet normalerweise eine Funktionsanalyse. Dabei werden die Anforderungen in einem iterativen Verfahren an die zu erwartenden Produktfunktionen angepaßt. Für große, komplexe Produkte, die nur in geringen Stückzahlen produziert werden (one-of-a-kind), ist dieser Ansatz nicht kosteneffizient und führt zu Inkonsistenzen, Zweideutigkeiten, ungenau und unvollständig formulierten Produkthanforderungen.

1 Motivation

In den frühen Phasen der Produktentwicklung wird ein Großteil der kostenbestimmenden Faktoren eines Systems festgelegt. Insbesondere beim Entwurf hochkomplexer Systeme (z.B. Airbus, Ariane etc.), bei denen Mechanik, Elektronik und Software miteinander eng verzahnt sind, ist die systematische Analyse von Kundenanforderungen wichtig. Während der Analyse der Anforderungen des Kunden werden die funktionalen Anforderungen an das Produkt, die die Sichtweise des Herstellers mitein-

2 Ansatz

KARE zielt deshalb auf eine signifikante Verbesserung der Vorgehensweise bei Erfassung und Analyse der Kundenanforderungen beim Systementwurf bzw. bei der Produktdefinition ab. Dies soll durch ein verbessertes Werkzeug zur Anforderungsformalisierung und -analyse sowie eine systematische Einbeziehung von Unternehmenswissen in den Analyseprozeß erfolgen. **Bild 1** zeigt das generelle Vorgehensmodell des Ansatzes. Ausgehend von den vom Kunden spezifizierten

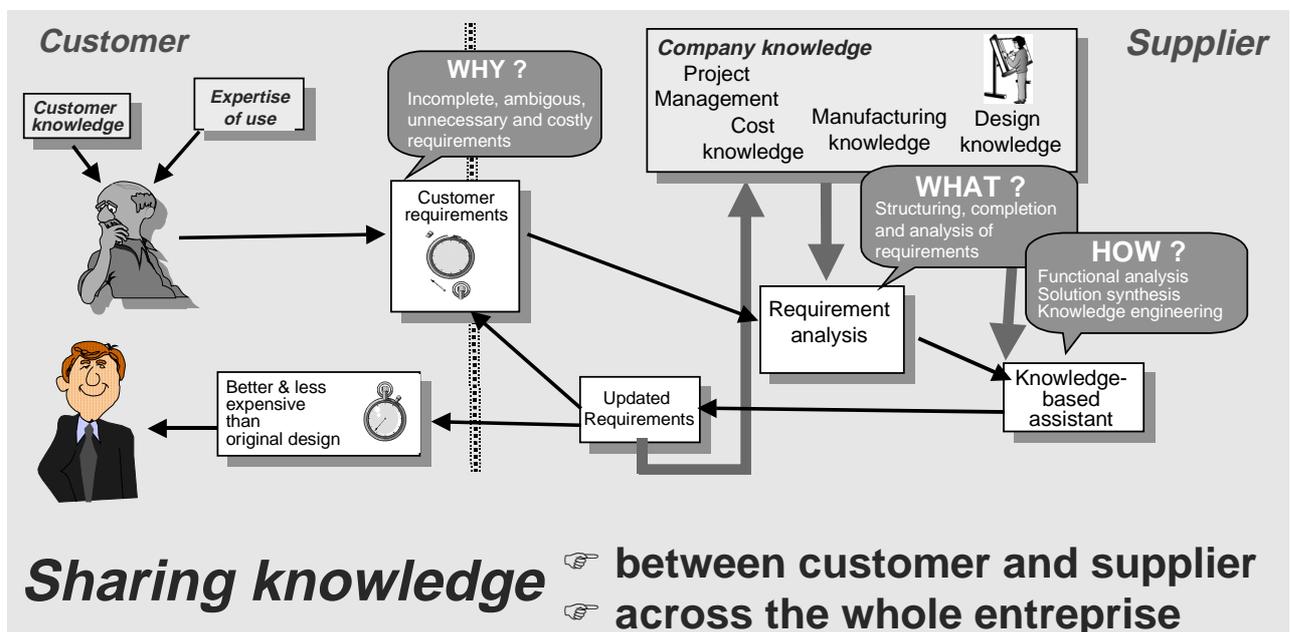


Bild 1: Allgemeines Vorgehensmodell für KARE

Anforderungen (Lastenheft) durchlaufen die Anforderungen eine Analysephase beim Lieferanten (Supplier), in der sie strukturiert, ergänzt und überprüft werden. Diese Analyse wird von einem wissensbasierten Werkzeug (Assistenten) unterstützt, der einen einfachen Zugriff auf das vorhandene Unternehmenswissen ermöglicht. Die so aktualisierten Anforderungen können jetzt wieder vom Kunden begutachtet und in weiteren Iterationsschritten angepaßt werden.

3 Partner

Initiiert wurde KARE von Thomson-CSF in Frankreich und bringt 7 Partner aus 5 europäischen Ländern zusammen. Die Universität Clausthal, Institut für Maschinenwesen, die Universität Nottingham, Department of Manufacturing Engineering, und Arthur Andersen, Knowledge Management Group fungieren als Lieferanten für die Basistechnologien. Thomson-CSF, Aerospatiale und Hollandse Signaal stellen als Industrieunternehmen ihre Erfahrungen bereit und spezifizieren die Anforderungen für den Systementwurfsprozeß. Siebter Partner ist die Firma IPS Ingeniería de Productos, Procesos y Sistemas Integrados, Spanien, die als Unterauftragnehmer des IMW für einen Teil der Implementierungsarbeiten im Bereich der Anforderungsmodule verantwortlich ist. Neben den eigentlichen Projektpartnern, die für die Arbeiten in KARE verantwortlich sind, wurden vier weitere europäische Firmen (Alenia, Italien, Rolls-Royce, Taylor Woodrow, UK und ATM Group, Schweden) eingeladen im Industrial Review Board die Arbeiten von KARE zu ver-

folgen und, ausgehend von ihren externen Standpunkten, zu hinterfragen. Bisher hat sich diese Kombination von Technologieprovidern, industriellen Anwendern und einer zusätzlichen Review-Instanz als sehr produktiv erwiesen.

4 Arbeitsplan

Der Arbeitsplan, in **Bild 2** dargestellt, sieht im wesentlichen 4 Phasen in der 30 monatigen Laufzeit des Projektes vor. In der ersten, derzeit laufenden, Phase werden in einem systematischen Vorgehen die Anforderungen und Spezifikationen der zu entwickelnden Methodik, sowie die Werkzeuge und deren Integration in die bestehenden Systemumgebungen der Industriepartner, definiert. Die zweite Phase beinhaltet die detaillierte Ausarbeitung des zugrundeliegenden Datenmodells für die Anforderungsfomalisierung. Außerdem soll ein Metamodell für die Erfassung und Handhabung von Unternehmenswissen ausgearbeitet werden. Die internationale Normung beider Datenmodelle soll im Rahmen von ISO 10303 (STEP) erfolgen. Vorarbeiten für ein Modell zur Normung des Datenaustausch von Systementwurfsinformationen (ISO 10303-AP233) wurden im EU Project SEDRES durchgeführt und werden nun innerhalb von KARE insbesondere von Aerospatiale weitergeführt werden. Im dritten Projektabschnitt werden die ersten Implementierungen der Methoden und Werkzeuge durchgeführt. Die einzelnen Werkzeugmodule werden dann von den verschiedenen Industriepartnern getestet und validiert. Die abschließende vierte Phasen hat die Integration der einzelnen Module in eine verteilte Systementwurfsumgebung (Workbench) zum Inhalt.

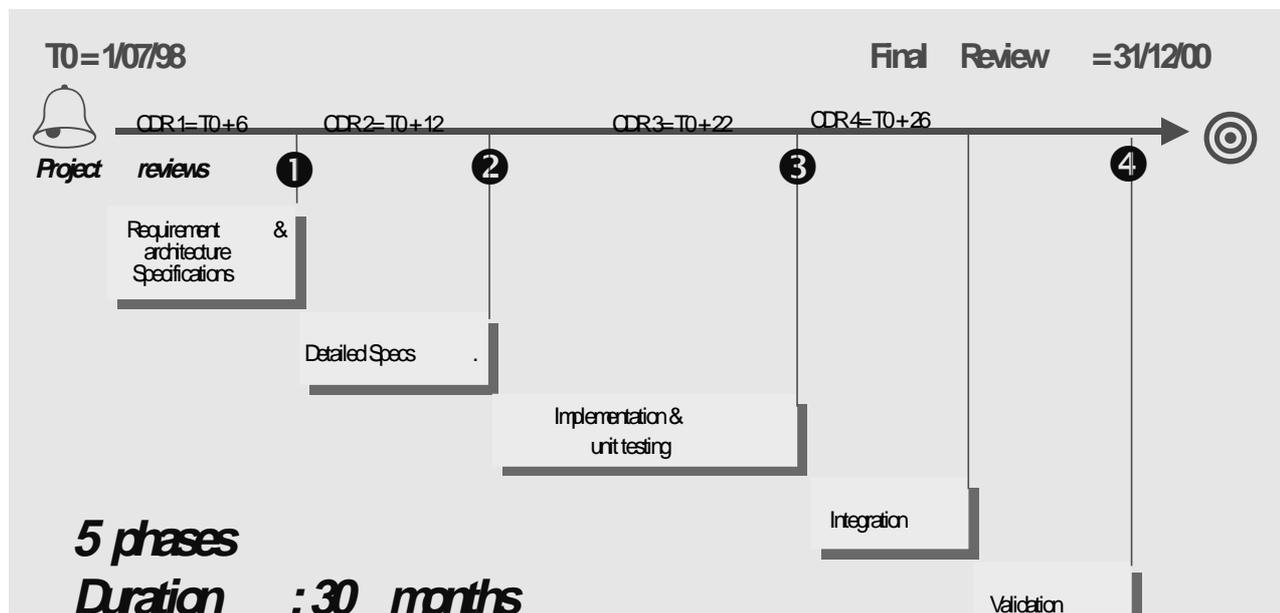


Bild 2: Projektplan KARE

5 Ziel von KARE

Die Ziele von KARE können in drei Klassen gegliedert werden:

- Nutzen durch Anwendung der KARE Workbench
- Technische Ziele in der Realisierung der Einzelkomponenten
- Nichttechnische Ziele: Förderung und Verbreitung des KARE Ansatzes durch Vorträge, Schulungen und Standardisierung

Die Ergebnisse des KARE Projektes sollen in erster Linie dazu dienen, die Kommunikation zwischen Kunden und Hersteller bei der Erstellung der Liste der Kundenanforderungen zu unterstützen. Gerade bei dem Entwurf von komplexen Produkten in Einzelfertigung oder Kleinserienfertigung kommt es hier zur einer Vielzahl von Problemen, die später erhebliche Mehrkosten verursachen. Schwerpunkt bei der Unterstützung ist die Vermeidung von widersprüchlichen, unnötigen und fehlenden Anforderungen. Basierend auf dem bereits vorhandenen Produktwissen sollen die Anforderungen auf Vollständigkeit untersucht werden. Als Ergebnis werden schnellere Reaktions- und Durchlaufzeiten zu einer verkürzten Produktdefinitionsphase führen. Die erhöhte Qualität der erarbeiteten Kundenanforderungen wird sich in einer höheren Produktqualität und einer höheren Kundenzufriedenheit widerspiegeln. Die Einbeziehung von Prozeßwissen (z.B. Was können wir realisieren bzw. fertigen ?) wird neben Kosteneinsparungen bei der Produktentwicklung auch zu Kostensenkungen in Fertigung führen. Da komplexe und große Projekte aus der Luft- und Raumfahrtindustrie, wie sie in KARE im Vordergrund stehen, meist eine Entwicklungszeit

von mehreren Jahren beanspruchen, wird ein Komponente von KARE sich auch mit der Abschätzung und Vorhersage von Technologieentwicklungen beschäftigen.

6 Systemstruktur der KARE Workbench

In Bild 3 erkennt man die verschiedenen Komponenten die im Rahmen des KARE Projektes entwickelt werden sollen. Die KARE Arbeitsumgebung (Workbench) soll aus folgenden Teilen bestehen:

- Server für Anforderungen
- Server für Unternehmenswissen
- Benutzerschnittstelle „Anforderungswerkzeug“
- Benutzerschnittstelle „Wissenskomponente“
- Anforderungsverarbeitung
- Systementwurfswerkzeuge, die bereits eingesetzt werden (RDD100, RDD2000 ...)

Den Kern der KARE Workbench bilden der Service für die Bereitstellung von Anforderungselementen und der Service für die Bereitstellung von Unternehmenswissen. Die Benutzerschnittstelle (User Interface) zur Anforderungserfassung und –formalisierung soll dem Anwender die erweiterte Funktionalität (insbesondere die Analyse mit Hilfe des Unternehmenswissen) eines Anforderungswerkzeuges bieten. Die Verarbeitung und Strukturierung unter Berücksichtigung des Unternehmenswissen wird durch das Anforderungsmodul (Requirement Processing Tool) erfolgen. Die Aufbereitung und Erfassung von Unternehmenswissen wird durch das Wissenserfassungs- und Strukturierungsmodul

übernommen. Neben den eigentlichen Modulen und Werkzeugen werden parallel Vorgehensmodelle insbesondere für die Wissensextraktion aus Unternehmen erarbeitet.

Als eines der Hauptprobleme in den Unternehmen wurde die Anzahl und die Integration der im Systementwurf eingesetzten Werkzeuge identifiziert. So werden im Rahmen eines Projektes bis zu 10 verschiedene Werkzeuge eingesetzt. Je nach Unternehmensphilosophie werden oftmals für verschiedenen Projekte zu dem noch verschiedenen Kombinationen von

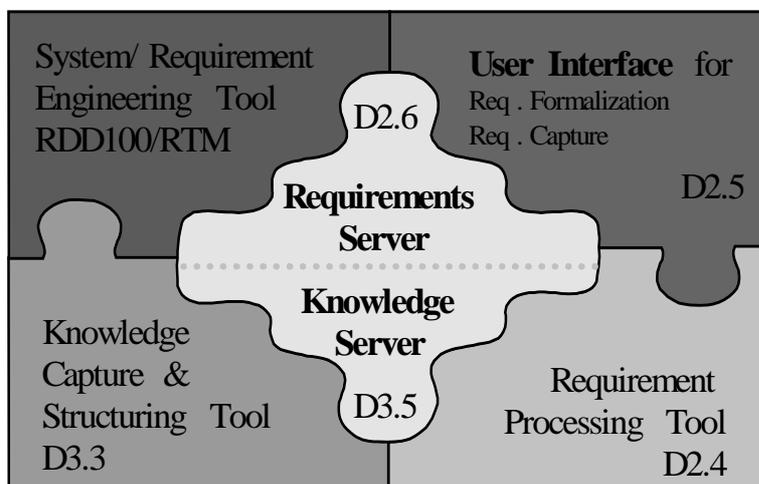


Bild 3: Hauptkomponenten der KARE Architektur

Entwurfswerkzeugen benutzt. Dies führte zu der Forderung, daß die KARE Workbench mit ihren Modulen leicht in das Umfeld der in den Unternehmen vorhandenen Werkzeugstrukturen zu integrieren sein muß. Ein anderer starker Einflußfaktor auf den Systementwurf von KARE kommt aus den Anforderungen des Concurrent Engineering. Durch die verteilte Bearbeitung von komplexen Produkten oder Systemen wird sich auch die Systemarchitektur an einem verteilten Ansatz orientieren müssen. Das bedeutet, daß zum Beispiel Anforderungen nicht alle zentral in einer Anforderungsdatenbank abgelegt sein müssen, sondern viel mehr verteilt von mehreren Dienstprozessen zur Verfügung gestellt werden können. Entsprechend könnten verschiedene Abteilungswissensserver das Unternehmenswissen einer Abteilung zur Verfügung stellen.

ment , PROLAMAT 98 Conference, 1998, Trento

7 Zusammenfassung

Der Ansatz, der vom KARE Konsortium verfolgt wird, ist vielversprechend und hat bereits für reges Interesse in Industriekreisen gesorgt. Ein erster Vortrag /2/ zwei Wochen nach dem offiziellen Projektstart auf der PROLAMAT 98 Konferenz führte zur einer regen Diskussion. Das bereits existierenden Werkzeug zur Anforderungsanalyse *demanda* /1/ des Institutes für Maschinenwesen und die Wissensumgebung *WISDOM* der Knowledge Management Group von Arthur Anderson bilden eine hervorragende Grundlage für die weiteren Entwicklungsarbeiten der KARE Workbench. Die Industrievertreter im KARE Konsortium stellen die zielorientierte Entwicklung entsprechend der Industriebedürfnisse sicher. Erste sichtbare Arbeitsergebnisse werden Mitte 1999 mit den Prototypen der verschiedenen Module zu Verfügung stehen. Weitere aktuelle Informationen und Publikationen zum KARE Projekt sind auf dem projekteigenen WWW Server <http://www.kare.org> zu finden.

8 Literatur

- /1/ Große, A.; Heimannsfeld, K.: Wissensbasierte Fehler- und Störfallanalyse von verfahrenstechnischen Maschinen, S. 75ff, Institutsmitteilung Nr. 21, IMW Clausthal 1996
- /2/ Pawar, K.S.; Ratchev, S. and Heimannsfeld, K.: Knowledge Acquisition and sharing for Requirement Engineering (KARE) in one-of-a-kind product development environment: Initial concepts, current and future develop-

Informationsbasis zur Konstruktion lärmarmen Produkte

Gummersbach, F.

Zur Erfüllung von Produktanforderungen müssen dem Konstrukteur geeignete Hilfsmittel zur Verfügung stehen, die ihn bei der Lösung von Teilproblemen unterstützen. Dabei müssen die in den Hilfsmitteln enthaltenen Informationen derart beschaffen sein, daß sie Zusatzinformationen enthalten, die der Konstrukteur zur Bewertung benötigt.

Acoustical concerns are more and more important due to legal and market demands. Therefore the designer needs specific tools, which supports him during product development.. The needed tools have to have such properties that the designer is able to select the appropriate measure.

1 Einleitung

Der Konstrukteur steht heute mehr denn je vor der Aufgabe seine konstruktive Tätigkeit innerhalb einer festgelegten Zeit zu erfüllen und dabei die ganzheitliche Berücksichtigung aller Forderungen zu erfüllen. So treten neben den Hauptforderungen (Erfüllung der Funktion) immer mehr Nebenforderungen (Montage-, Fertigungs-, Recyclinggerecht, Lärmarm, ...) in den Vordergrund, die parallel erfüllt werden müssen.

Die Anforderungen an ein Produkt betreffen zum einen die der Funktionserfüllung in Form von Funktionsforderungen, die den Zweck der Maschine angeben und die Zustands- und Eigenschaftsänderungen beim Energie-, Stoff- und Signalumsatz des Produktes kennzeichnen. Zudem müssen im Konstruktionsprozeß auch Randbedingungen erfüllt werden, die sich nicht direkt auf die Funktion beziehen, sondern darauf, wie diese erfüllt werden soll. Diese Betriebsforderungen sind sehr vielfältig und können unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit sowie der Mensch-Maschine-Beziehung gesehen werden, wobei betriebssicherheitliche Aspekte in den beiden zuvor genannten Bereichen zu finden sind, **Bild 1**.

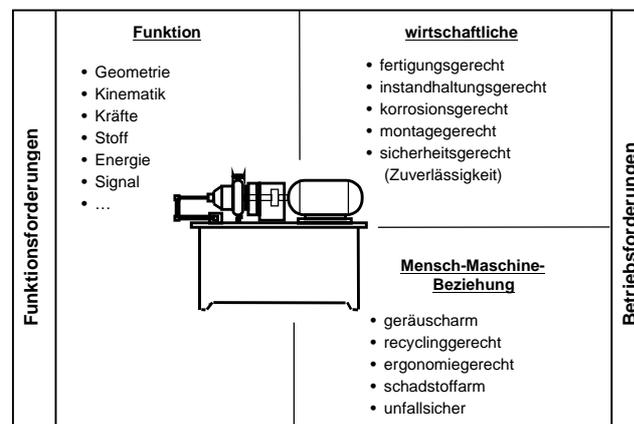


Bild 1: Anforderungen an ein Produkt

2 Problematik

Die Berücksichtigung der Betriebsforderungen umfaßt unter Umständen ein weites Feld und wird mit steigender Anzahl der Anforderungen immer komplexer. Zusätzlich bilden sich oft widersprechende Anforderungen, die unter Abwägung der Wertigkeit meist zu einer Kompromißlösung führen. Beispielhaft seien hier Zielkonflikte im Automobilbau genannt (Härte der Federung, Gewicht, Radstand usw.), wo unter den jeweiligen Zielen ein Kompromiß untereinander gefunden werden muß. Zur Unterstützung des Konstrukteurs bei der Umsetzung der Betriebsforderung benötigt der Konstrukteur, wie bei der Umsetzung der Funktionsforderungen, problemspezifisches Methoden- und Faktenwissen.

Diese Nebenforderungen berühren häufig Fachgebiete (z.B. die Ergonomie, die Umweltwissenschaften oder die Maschinenakustik) in denen der Konstrukteur jedoch nicht die zusätzliche Ausbildung erhalten hat.

Zur effizienten und zielorientierten Umsetzung der jeweiligen Forderungen ist die Kenntnis über die dazu notwendigen Hilfsmittel in Form von Fakten- und Methodenwissen notwendig. Das hierzu notwendige Wissen kann neben der einschlägigen Literatur, diversen VDI – Richtlinien oder Normen entnommen werden. Wie in **Bild 3** dargestellt, ist für die Berücksichtigung der verschiedenen Betriebsforderungen in Abhängigkeit des Stadiums des Konstruktionsprozesses problemspezifisches Fakten- und Methodenwissen notwendig. Es zeigt sich zudem, daß es eine Abhängigkeit zwischen den jeweiligen Anforderungen gibt. So beeinflusst beispielsweise jede Änderung die entstehenden Kosten eines Produkts.

Die gezielte Bereitstellung informationstechnischer Hilfsmittel unterstützt den Konstrukteur sachbezogene Problemgebiete (Montage-, Fertigungs-, Recycling-, Kostenge-

Die gezielte Bereitstellung informationstechnischer Hilfsmittel unterstützt den Konstrukteur sachbezogene Problemgebiete (Montage-, Fertigungs-, Recycling-, Kostenge-

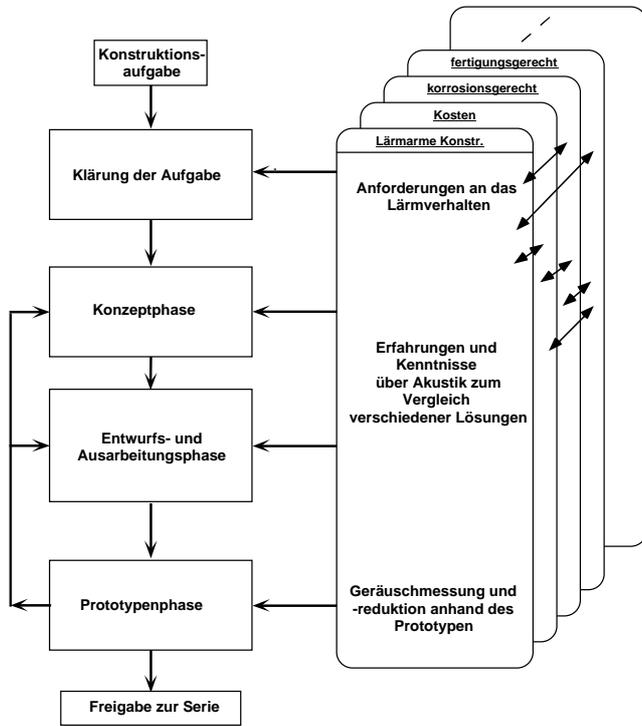


Bild 3: Verknüpfung konstruktionsspezifischen Wissens mit der allgemeinen Konstruktionsmethodik, in Anlehnung an /1/

recht und u.a. Lärmarm) möglichst umfassend zu berücksichtigen. Hier stehen unter anderem, Sammlungen von Gestaltungsregeln zur Verfügung, die dem Konstrukteur für bestimmte Problemgebiete Hinweise zur Gestaltung des Produktes geben. Zu erwähnen ist jedoch, daß die mit der Nutzung solcher informationstechnischer Werkzeuge verbundene Methodologie durchaus noch nicht entwickelt ist und daß sich die wissenschaftliche Grundlagenforschung auf folgende Aufgaben konzentrieren wird:

- Aufbereitung des Fachwissens auf seine Anwendung bei der Entwicklung von Produkten
- Datenhaltung und Aktualisierung

- Schnittstelle zwischen dem „fragenden“ Konstrukteur und der „antwortenden“ Wissensbasis
- datentechnische Verknüpfung zu existierenden Produktmodellierungswerkzeugen /2/

3 Konstruktion lärmarmen Produkte

3.1 Beeinflussungsmöglichkeiten zur Lärm-minderung

Im weiteren soll hier auf die Möglichkeiten der Lärm-minderung mittels konstruktiver Maßnahmen eingegangen werden. Eine nähere Betrachtung der konstruktiven Ansatzpunkte ist sinnvoll, um somit auf notwendige Hilfsmittel schließen zu können.

Zur Berücksichtigung maschinenakustischer Gesichtspunkte ist die Kenntnis der zur Lärm-minderung notwendigen Beeinflussungsmöglichkeiten unabdingbar. Entsprechend der Schalleitungskette wird dies in **Bild 2** für den Bereich der Akustik und unter konstruktiven Gesichtspunkten anhand einer Maschinenstruktur verdeutlicht. Dabei setzt sich akustisch gesehen der Geräuschmechanismus aus der Schallentstehung, -leitung und -abstrahlung zusammen, wobei in Bezug auf eine reale Maschinenstruktur parallel zu der Schallentstehung die Schallquelle aufgrund von Wechselkräften innerhalb der Bauteile der Maschine gesehen werden kann. Die Schalleitung erfolgt dann über die Maschinenstruktur und der Medien so daß letztendlich die Schallenergie über die Bauteiloberflächen bzw. Öffnungen abgestrahlt wird. Hieraus ergeben sich die prinzipiellen Beeinflussungsmöglichkeiten an der Quelle, Übertragung und Abstrahlung zur Konstruktion lärmarmen Produkte, **Bild 2** (rechts).

3.2 Prinzipielle Vorgehensweise

Die Vorgehensweise zur Konstruktion lärmarmen Produkte soll anhand von **Bild 4** dargelegt werden.

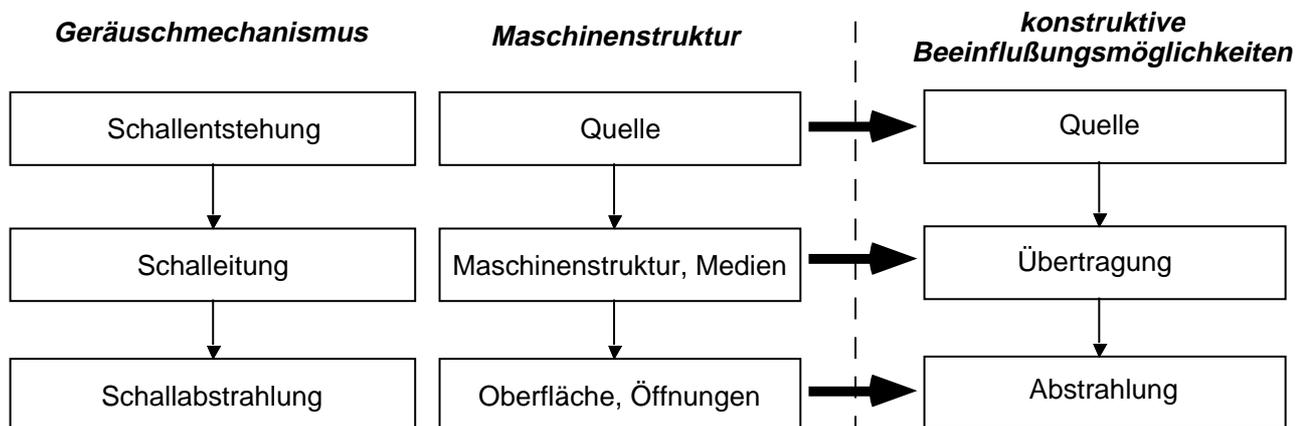


Bild 2: Schallkette unter akustischen und konstruktiven Gesichtspunkten in Anlehnung an /1/

Ausgehend von den Anforderungen eines Konstruktionsobjekts kann nach der Erstellung des ersten Konzepts bzw. bei Bestehen einer Maschine ein Schallflußmodell erstellt werden. Die Erstellung basiert u.a. auf dem Aufbau eines akustischen Modells mittels Funktionsträgern, welche jeweils eine Komponente des Analyseobjekts beinhaltet. Das derart erstellte Schallflußmodell beinhaltet damit den prinzipiellen konstruktiven Aufbau des Konstruktionsobjektes in abstrakter Form. Die im Modell enthaltenen semantischen Beziehungen können somit für einen weiteren Zugriff auf (maschinenakustische und andere) Hilfsmittel verwendet werden, **Bild 4 oben**. Eine nähere Erläuterung bezüglich Aufbau und Nutzung eines Schallflußmodells ist in /3/ zu finden.

Die graphische Repräsentation des Konstruktionsobjekts zeigt alle prinzipiellen Beeinflussungsmöglichkeiten und steht nun für eine schalltechnische Analyse zur Verfügung. Durch eine tabellarische Auflistung aller Schallquellen, Übertragungswege und Abstrahlungsmöglichkeiten können diese detaillierter untersucht werden.

Nach einer Bewertung aller Schallquellen, Übertragungswege und Abstrahlungsmöglichkeiten, können für die Relevantesten geeignete Lärmreduzierungsmaßnahmen erarbeitet werden. Die durchgeführten Arbeitsschritte dienen rein der Analyse des Konstruktionsobjektes.

Der nächste Arbeitsschritt dient der Lösungsfindung. Hierzu ist eine in sich konsistente Informationsbasis notwendig, die dem Konstrukteur zielorientiert geeignete Lärmreduzierungsmaßnahmen erarbeiten läßt, **Bild 4 Mitte**. Neben den Lärmreduzierungsmaßnahmen sollten diese auch Hinweise über konstruktive Gesichtspunkte, Abschätzverfahren, Konstruktionsbeispiele und auch Anwendungsgrenzen beinhalten.

Nach Abwägung unter technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten, können abschließend konstruktive Änderungen für das vorliegende Konstruktionsobjekt unter Verwendung der aussichtsreichsten Lärmreduzierungsmaßnahmen erarbeitet werden, **Bild 4 unten**.

Durch eine konsequente Nutzung der vorgeschlagenen Vorgehensweise mittels eines Schallflußmodells kann die direkte Einbindung von Anforderungen und der Auswahl von

Wirkprinzipien unter maschinenakustischen Gesichtspunkten erfolgen. Eine Dokumentation aller mit dem Konstruktionsobjekt verbundenen Sachsysteme läßt sich somit ebenfalls in einfacher Art realisieren.

Zu beachten ist hierbei ferner, daß mittels eines funktionsträgerorientierten Flußmodells auch eine Verknüpfung zu anderen Sachsystemen (recyclinggerecht, korrosionsgerecht usw.) möglich wäre, so daß die hier beschriebene Vorgehensweise einfach erweiterbar ist.

4 Informationsbereitstellung für den Konstrukteur

Allgemein kann der Wunsch eines Konstrukteurs in einem Informationssystem für die konstruktionsbegleitende Bereitstellung von konstruktionspezifischem Wissen für die Entwicklung lärmarmere Produkte gesehen werden. Dabei muß das Wissen in der Art aufbereitet, strukturiert und dem Benutzer

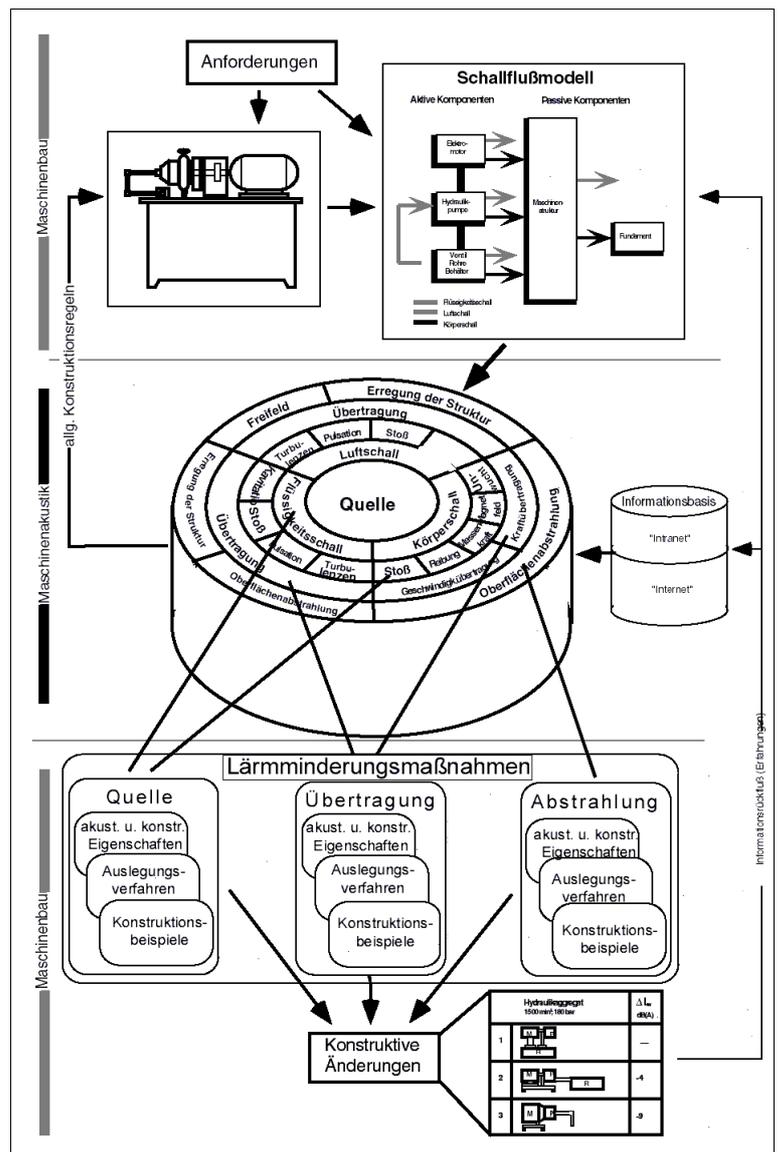


Bild 4: Vorgehensweise zur Konstruktion lärmarmere Produkte

zur Verfügung gestellt werden, daß auch Konstrukteure mit geringem maschinenakustischen Kenntnisstand, durch eine gezielte Nutzung von Methoden- und Faktenwissen der Maschinenakustik, die Lärmentwicklung des Produktes reduzieren können.

Bezogen auf die Konstruktion lärmarmen Produkte wäre dazu eine Informationsbasis zur Berücksichtigung maschinenakustischer Belange notwendig, die u.a. eine systematische Aufbereitung des im Sachsystem Maschinenakustik vorhandenen Wissens für die konstruktorgerechte Nutzung vorsieht, um so eine ganzheitliche Betrachtung des Sachsystems Maschinenakustik im Konstruktionsprozeß zu ermöglichen.

4.1 Informationsstrukturierung

Der internationale technische Bericht ISO/TR 11688-1 /1/ stellt eine Verknüpfung des Sachsystems "Maschinenakustik" mit dem Handlungssystem "Konstruktionsmethodik" her und orientiert sich so an der üblichen Vorgehensweise der Konstrukteure. Dieses Dokument stellt eine Vorgehensweise unter konstruktions-systematischen Gesichtspunkten zur Verfügung und enthält eine Reihe von Konstruktionsregeln und Berechnungshinweisen, die an den physikalischen Vorgängen der Schallentstehung, Weiterleitung und Abstrahlung ansetzen.

Neben den generellen Konstruktionsregeln, die die methodische Vorgehensweise unterstützen, stellen die Weiteren Faktenwissen zu den speziellen Problemgebieten zur Verfügung. Letztere können wieder in zwei Gruppen (primäre und sekundäre) untergliedert werden. **Bild 5** gibt dazu die Struktur nach der die maschinenakustischen Konstruktionsregeln geordnet sind, graphisch wieder. Die erstellte Struktur gruppiert die einzelnen Beeinflussungsbereiche in insgesamt 19 Untergruppen, die nach der jeweiligen Lärmart (Luft-, Flüssigkeits- und Körperschall) und den Hauptgruppen (Quelle, Übertragung und Abstrahlung) getrennt aufgeführt werden.

Die erste Gruppe stellt die Gruppe der primären Maßnahmen dar (Beeinflussung an der Schallquelle). Die zweite Gruppe beinhaltet die sekundären Maßnahmen (Beeinflussung der Übertragung und Abstrahlung). Die in diesem Dokument enthaltene Einteilung nach den prinzipiellen Beeinflussungsmöglichkeiten soll als Grundschema für den Aufbau einer Informationsstruktur dienen.

4.2 Erstellung einer Informationsbasis

Für eine optimale Konstruktionsunterstützung benötigt der Konstrukteur eine problemorientierte Vorgehensweise, die eine zielgerichtete Konstruktion lärmarmen Produkte unter Berücksichtigung konstruktions-systematischer Aspekte unterstützt.

Da der Konstrukteur entsprechend einer Befragung in der Regel über gar keine bzw. geringe akustische Kenntnisse verfügt /4/, stellt die Bereitstellung eines schnell zu verstehenden und für die dargestellten Belange ausreichenden Hilfsmittels die Hauptaufgabe dar.

Ein zentraler und wichtiger Punkt zur Konstruktion lärmarmen Produkte, ist die Bereitstellung geeigneter prinzipieller Lärminderungsmaßnahmen.

Zur Berücksichtigung akustischer Belange eines Produktes ist entsprechend der allgemeinen Vorgehensweise des Problemlöseprozesses eine schalltechnische Analyse des Produktes notwendig

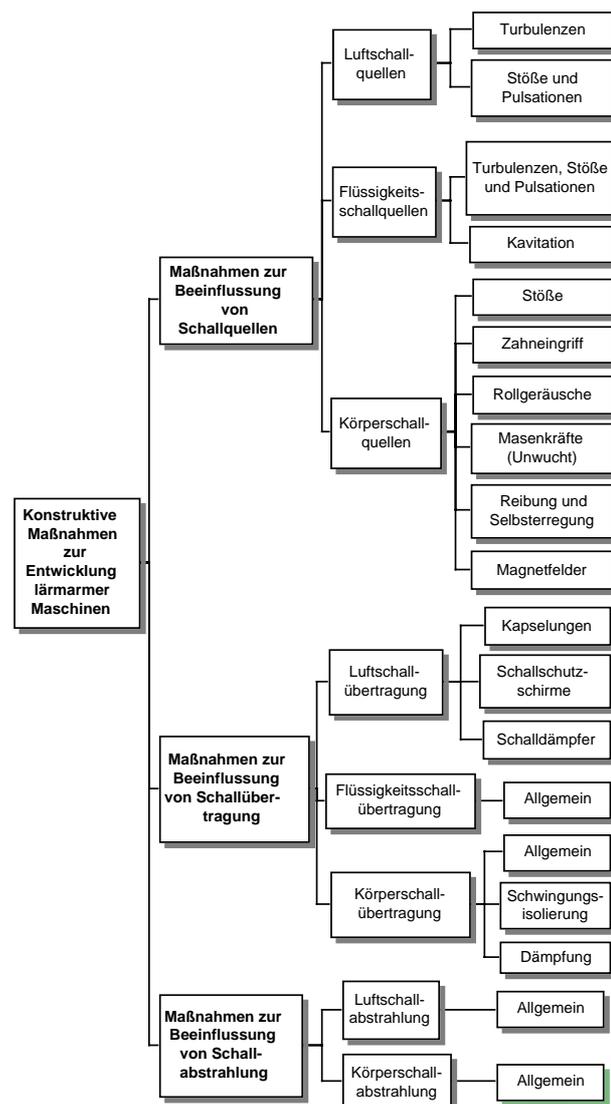


Bild 5: Struktur der konstruktiven Beeinflussungsmöglichkeiten nach /1/

um darauf aufbauend Lösungsmöglichkeiten zur Lärminderung zu erarbeiten. Abschließend erfolgt die Bewertung der Maßnahmen zur Lärminderung unter verschiedenen Gesichtspunkten. Dies beinhaltet neben funktionalen und wirtschaftlichen Aspekte auch die der Mensch-Maschine-Beziehung, entsprechend der zuvor dargestellten Grundstruktur von Anforderungen. Zur Analyse der Geräuschsituation ist die Ermittlung der für die Geräuschentstehung verantwortlichen Mechanismen notwendig. Die Wichtigkeit der Analyse kann parallel zu allen Problemlösungsprozessen gesehen werden, da ohne eine ordentliche Problemanalyse, die Ermittlung von Problemlösungen mit anschließender Bewertung nicht zielorientiert durchgeführt werden kann.

Die prinzipiellen Lärminderungsmaßnahmen können unter Berücksichtigung der zuvor in **Bild 5** dargestellten Gliederung in einer strukturierten Lösungssammlung abgelegt werden. Hierfür bieten sich systematisch geordnete Konstruktionskataloge nach /5/ an. Diese bieten nach /6/ einen schnellen Zugriff auf aufgabenorientierten Lösungen, ein möglichst vollständiges Lösungsspektrum, eine merkmalspezifische Lösungsauswahl und eine Algorithmmierung des Konstruierens an. Gegenüber den tabellarischen Lösungssammlungen haben die Konstruktionskataloge nach /5/ verbindliche Anforderungen an Inhalt, Aufbau und Vollständigkeit. Sie dienen als Informationsspeicher in übersichtlicher Form mittels ordnender Gesichtspunkte und unterstützen u.a. durch den systematischen Aufbau (Gliederung) den Einsatz zum methodischen Konstruieren. Durch die systematische Anwendung wird die Konstruktionssynthese zur Generierung von Gesamtlösungen aus abstrahierten Gesichtspunkten ermittelte Teillösungen. Ferner dienen sie zur systematisch geordneten Repräsentation von wenig bekannten Wissensgebieten /5/.

Hierzu zeigt **Bild 6** den prinzipiellen Aufbau einer Informationsbasis, die sich an den Grundaufbau der Konstruktionskataloge nach /5/ anlehnt. Der Grundaufbau dieser Kataloge sieht das Ablegen der Informationen in einheitliche Ordnungsschemata vor, welche prinzipiell den gleichen Aufbau besitzen. Die Kataloge werden dazu in der Regel in vier Teile gegliedert.

Der Gliederungsteil dient der Anordnung der ordnenden Gesichtspunkte sowie deren sinnvolle Unterteilung (Gliederung) zur widerspruchsfreien Darstellung der im Hauptteils abgelegten Informationen.

Im Hauptteil des Kataloges, der auch die Katalogart bestimmt, wird die eigentliche Information (Objekte, Operationen oder Lösungen) abgelegt. Dies kann u.a. durch Skizzen, Formeln und/oder Benennungen erfolgen.

Der Zugriffsteil dient der Charakterisierung der im Hauptteil befindlichen Informationen. Im Gegensatz zum Gliederungs- und Hauptteils sind die den Zugriffsteil bildenden ordnenden Gesichtspunkte frei wählbar, wobei diese oft anwendungs- und branchenabhängig sind. Die Zugriffsmerkmale sollten so gewählt werden, daß für den vorliegenden Anwendungsfall eine schnelle Auswahlmöglichkeit der im Hauptteil befindlichen Informationen möglich ist, vorteilhaft ist zudem die einfache Erweiterbarkeit des Zugriffsteils, da dieser von anderen Katalogen unabhängig ist. Anregungen zur Wahl der Gliederungs- und Zugriffsmerkmale gibt u.a. /5/ bzw. /7/ auf Basis physikalischer Gesichtspunkte.

Ferner schlägt Roth /5/ auch einen Anhang vor, in dem Angaben über Quellen, weiterführender Literatur, Anwendungsbeispiele und Anmerkungen enthalten sind und sich somit von den meist technischen Merkmalen des Zugriffsteils separat dargestellt wird.

Die in **Bild 6** dargestellten Kataloge zur Konstruktion lärmarmen Produkte beinhalten die für die Analyse und Lösungsfindung notwendigen Informationen. Der obere Katalog, der zur schalltechnischen Analyse dient, wird im Gliederungsteil entsprechend der ISO/TR 11688-1 /1/ enthaltenen Struktur der Schallquellen gegliedert, wobei hier eine weitere Gliederungsebene mit den eigentlichen Schallentstehungsmechanismen und deren Kurzbeschreibung notwendig ist. Im Hauptteil befinden sich die grundsätzlichen Hinweise zu primären und sekundären Lärminderungsmaßnahmen. Der Zugriffsteil beinhaltet Hinweise, unter welchen Randbedingungen die Schallentstehungsmechanismen auftreten, sowie deren akustische Eigenschaften wie die Art ihres Geräusches (impulsförmig, breitbandig, oder periodisch) sowie eine Zuordnung des Frequenzbereichs (nieder, mittel oder hochfrequent). Diese Informationen sind für eine weitere Auswahl bzw. Bewertung primärer und sekundärer Lärminderungsmaßnahmen notwendig.

Der Katalog zur Lösungsfindung von primären Lärminderungsmaßnahmen ist mit dem Gliederungsteil des Katalogs zur Analyse identisch. Im Hauptteil befinden sich eine oder mehrere Lösungsmöglichkeiten, die im Zugriffsteil näher charakterisiert werden. Dies erfolgt durch Angabe der

passenden Gestaltungsregel, dessen Anwendbarkeit mittels deren akustischen Eigenschaften sowie weiteren konstruktiven Hinweisen bei Anwendung dieser Maßnahme.

Die Kataloge mit den sekundären Lärminderungsmaßnahmen werden entsprechend der in **Bild 5** dargestellten Struktur gegliedert, wobei in Einzelfällen eine weitere Untergliederung sinnvoll erscheint. Die letzte Gliederungsebene stellt schon den Hauptteil dar und wird durch eine entsprechende Kurzerläuterung erweitert. Der Zugriffsteil enthält prinzipiell die gleiche Informationsstruktur wie der

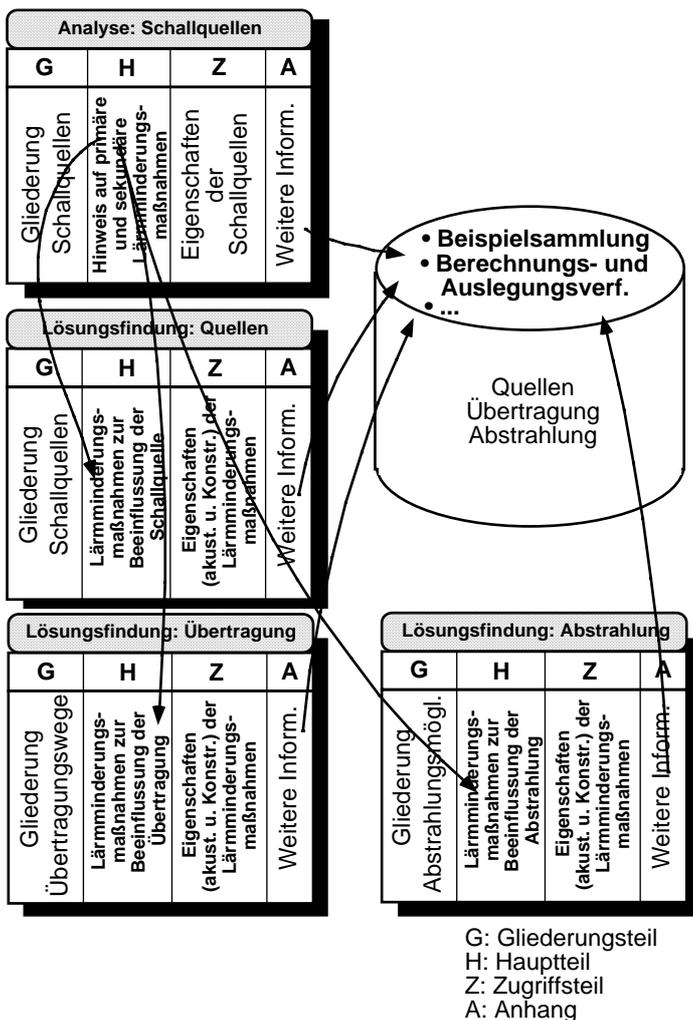


Bild 6: Aufbau und Anwendung der Informationsbasis

für die primären Maßnahmen.

Alle Anhänge der Konstruktionskataloge sind mit einem Verweis auf Beispielsammlungen, Berechnungs- und Auslegungsverfahren und Literatur der jeweiligen Problemgebiete versehen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Informationsstruktur stellt eine solide Basis für die systematische Erfassung und Be-

reitstellung maschinenakustischer Lärminderungsmaßnahmen dar. Durch die Gliederung nach den Beeinflussungsmöglichkeiten erhält der Konstrukteur ein Hilfsmittel mit dem er sich unter Verwendung eines Schallflußmodells (welches jedoch nicht zwingend erforderlich ist) zielorientiert geeignete Lärminderungsmaßnahmen erarbeiten kann, die sich zudem durch die Angaben im Zugriffsteil auf ihre Anwendbarkeit bewerten lassen. Durch eine Kombination der jeweiligen grundsätzlichen Maßnahmen (Reflexion und Absorption), z.B. mittels eines morphologischen Kastens, sind weitere kombinierte Lärminderungsmaßnahmen entwickelbar.

Für eine rechnerintegrierte Anwendung läßt sich durch die Verwendung der ordnenden Gesichtspunkte eine relativ schnelle Umsetzung in ein Datenbanksystem realisieren. Durch eine entsprechende Benutzeroberfläche wäre hier eine eigenständige Anwendung möglich, die jedoch auch in eine integrierte Systematik mit eingebunden werden kann.

6 Literatur

- ISO/TR 11688: Acoustics - Recommended practice for the design of low-noise machinery and equipment. Part 1: Planning, International Standardisation Organisation. Genf, März 1995
- Dietz, P.; Gummersbach, F.: 2. Zwischenbericht des Forschungsvorhabens F1529; Lärmarm konstruieren - Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele -; Clausthal 1998
- Dietz, P.; Haje, D.: Entwicklung lärmarmen Produkte -Rechnergestützte Beratungshilfen für den Konstrukteur-; IMW-Institutsmitteilung Nr. 23; Clausthal 1998
- Haje, D.; Gummersbach, F.; Schmidt, A.: Inquiry Results about Low Noise Design; Clausthal; März 1994; unveröffentlicht
- Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen; Band II Konstruktionskataloge; Springer-Verlag; Berlin Heidelberg 1994
- Ehrlenspiel, Klaus: Integrierte Produktentwicklung; Methoden für Prozeßorganisation, Produkterstellung und Konstruktion; Carl Hanser Verlag; München 1995
- Diekhöner, G.: Erstellen und Anwenden von Konstruktionskatalogen im Rahmen des methodischen Konstruierens; Diss. TU-Braunschweig 1980

ProManual - Intelligente Produkthandbücher

Judith, M.

Das INCO-COP Projekt ProManual befaßt sich mit der Erstellung von elektronisch verfügbaren Produkthandbüchern. Dabei sollen vorwiegend multimediale Techniken zum Einsatz kommen. An dem vornehmlich auf Technologietransfer ausgerichteten Projekt beteiligen sich vier Universitäten und zwei Industrieunternehmen. Das Ergebnis der Projektarbeit wird eine Methodik zur Erstellung von elektronischen Handbüchern sowie zwei fertige Produkthandbücher für die beteiligten Industrieunternehmen sein.

ProManual is an EC sponsored INCO-COP project. Subject is the development of electronic available product manuals making use of advanced multimedia techniques. Four universities and two enterprises are partners in this project, whose major aspect is technology transfer. As a result, the project will provide a guideline for electronic product manuals and two ready to use manuals for the industrial partners.

1 Ziele des Projektes

Das INCO-COP Projekt 96/0231 „Intelligent Product Manuals“ entwickelt eine Methodik zur Erstellung von Handbüchern und Dokumentationen eines Produktes, die den Anwender bei der Inbetriebnahme, Wartung und Reparatur unterstützen sollen.

Die Hauptziele des Projektes sind:

- Entwicklung einer Methodik zur Erstellung von „intelligenten“ Produkthandbüchern, die durch die Verwendung von neuen Medien über das Informationsangebot von herkömmlichen Handbüchern hinausgehen
- Entwicklung einer gemeinsamen „Wissensarchitektur“ für alle produktbezogenen Daten
- Kleinen und mittelständischen Unternehmen, insbesondere aus Mittel- und Osteuropa, den Zugriff auf neue Technologien zu vermitteln
- Erhöhung der Effizienz bei Inbetriebnahme, Wartung und Reparatur von ausgelieferten Produkten

2 Projektpartner und -dauer

Entsprechend der Idee des INCO Förderungsprogrammes setzt sich das Konsortium vorwiegend aus Partnern sich entwickelnder Länder aus Mittel- und Osteuropa zusammen. Dies sind die beiden Universitäten Budapest (Ungarn) und Rouse (Bulgarien), die für die Implementierung der elektronischen Produkthandbücher verantwortlich sind. Sie arbeiten eng mit der dort ansässigen Industrie, die die technischen Daten bereitstellt, zusammen.

Die beiden einzigen Partner aus Ländern der EU, die Cardiff School of Engineering (Universität of Wales) und das Institut für Maschinenwesen (IMW) der Technischen Universität Clausthal, besitzen in diesem Projekt mehr eine beratende Funktion.

Das Projekt wurde im April 1997 begonnen und hat eine Laufzeit von drei Jahren.

3 Die Arbeitsfortschritte

Im ersten Arbeitspaket ist eine Problemstudie und eine Lösungsfindung durchgeführt worden. Ausgangspunkt war die Analyse konventioneller Produkthandbücher (Handbücher in Papierform), um damit die Grundanforderungen an ein Produkthandbuch zu definieren. Ergänzend ist eine Studie über die relevanten Normen und gesetzlichen Vorschriften, die Vorgaben hinsichtlich der Erstellung von konventionellen Handbüchern machen, durchgeführt worden. Diese gibt Aufschluß darüber, welchen Anforderungen Handbücher in den einzelnen Ländern genügen müssen.

Da im Verlauf des Projekts Prototypen von Produkthandbüchern entwickelt werden sollen, ist im ersten Arbeitsabschnitt neben der Frage „Was soll Inhalt eines intelligenten Produkthandbuchs sein?“ auch analysiert worden, „Wie kann man das intelligente Produkthandbuch mit vorhandenen Softwarewerkzeugen umsetzen?“ Dazu wurden die bei den Projektpartnern vorhandenen sowie weitere auf dem Markt angebotene Programme hinsichtlich der Verwendbarkeit bei der Implementierung von intelligenten Produkthandbüchern überprüft und in eine Übersichtsdarstellung aufgenommen.

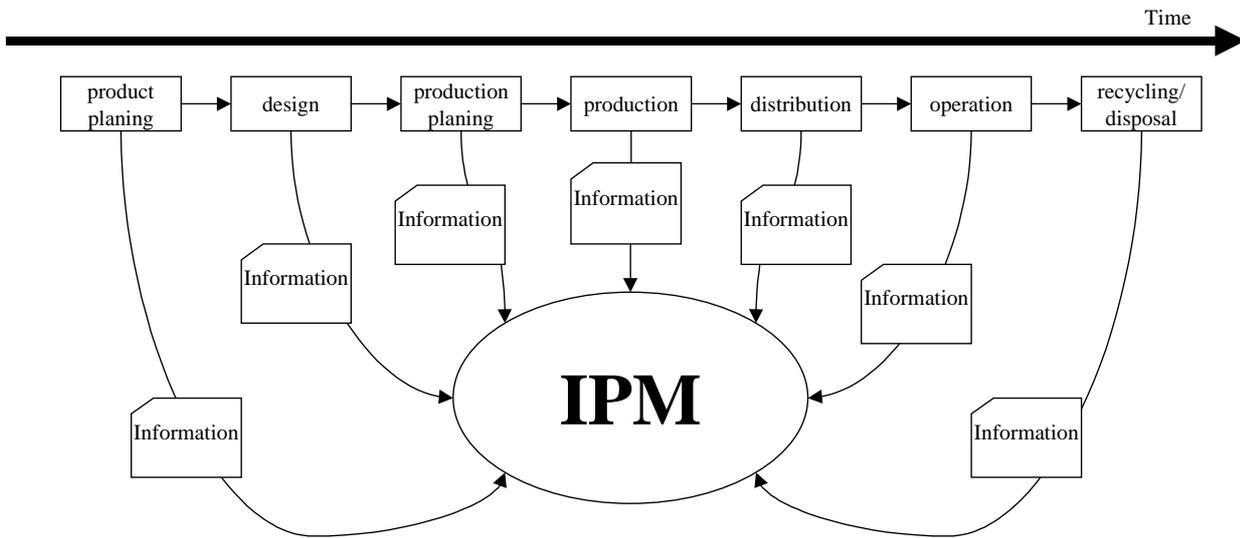


Bild 1: Produktlebenszyklus - Informationsquelle für ein intelligentes Produkthandbuch (IPM)

Während des zweiten Arbeitsabschnittes wurde eine Methodik zur Erstellung intelligenter Produkthandbücher erarbeitet. So wurden zunächst mögliche Datenquellen untersucht. Um das Vorgehen möglichst systematisch zu gestalten, wurde als Basis hierfür der Produktlebenszyklus gewählt (Bild 1). Für die Phasen des Produktlebens wurden die Tätigkeiten bestimmt. So gibt es in der Konstruktionsphase etwa die Aufgabe der Konzeption. Dabei werden verschiedene Arbeitsschritte und Tätigkeiten, wie das Identifizieren des Problems oder das Aufstellen von Funktionsstrukturen, vom Produktentwickler oder Konstrukteur durchgeführt. Als

Arbeitsergebnis erhält man ein Konzept, das sich üblicherweise aus mehreren Teilen zusammensetzt. Hier wären für das Ausarbeiten beispielsweise zu nennen (Bild 2):

- Einzelteilzeichnungen
- Zusammenbauzeichnungen
- Werkstattzeichnungen
- Stücklisten
-

Diese Ergebnisse liegen in unterschiedlichen Formen wie Tabellen, Textdokumenten oder Bildern vor und sollen in ein IPM integriert werden. Dazu ist eine entsprechende Aufbereitung der Daten notwendig.

Eine Stückliste kann beispielsweise von den meisten CAD Systemen automatisch generiert werden und steht somit direkt zur Einbindung in ein intelligentes Produkthandbuch zur Verfügung. Andere Daten bedürfen einer aufwendigeren Aufarbeitung.

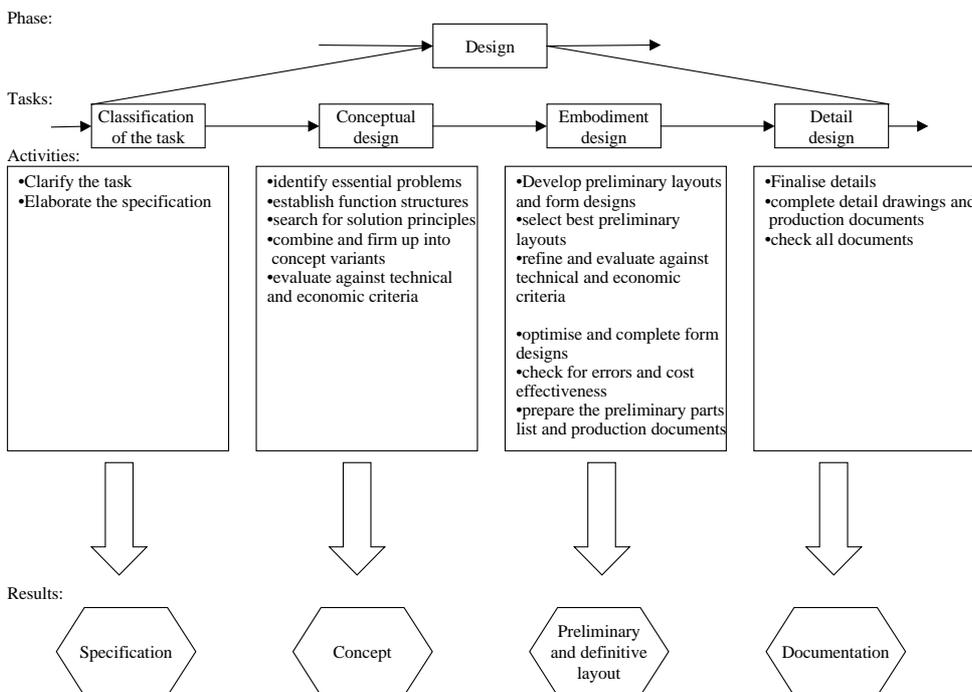


Bild 2: Informationen aus der Konstruktionsphase

Aus diesem Grund sind die existierenden Techniken und Arbeitsweisen analysiert und auf die Verwendbarkeit zur Erfassung und Darstellung von Produktwissen geprüft worden. Verschiedene davon wurden ausgewählt und zu einer Architektur für intelligente Produkthandbücher zusammengefügt (Bild 3).

Das dritte Arbeitspaket, das derzeit bearbeitet wird, hat die Entwicklung und Implementierung von zwei Pilotanwendungen zum Inhalt. Dazu stellen die beiden industriellen Partner je ein Beispielprodukt zur Verfügung. Der ungarische Partner, EXCEL, produziert Drehmaschinen, für die die Universität Budapest ein intelligentes Produkthandbuch erstellt. Für die bulgarische Firma SPARKY wird von der Universität Rousse ein Produkthandbuch für einen Gabelstapler hergestellt.

Der enge Kontakt zwischen den Entwicklern der Produkthandbücher und den Firmen, die diese für ihre Produkte nutzen wollen, stellt sicher, daß die Anforderungen und Wünsche an die Produkthandbücher auch umgesetzt werden. So muß beispielsweise entschieden werden, ob das Produkthandbuch auf CD vertrieben werden soll und so auf Ein-

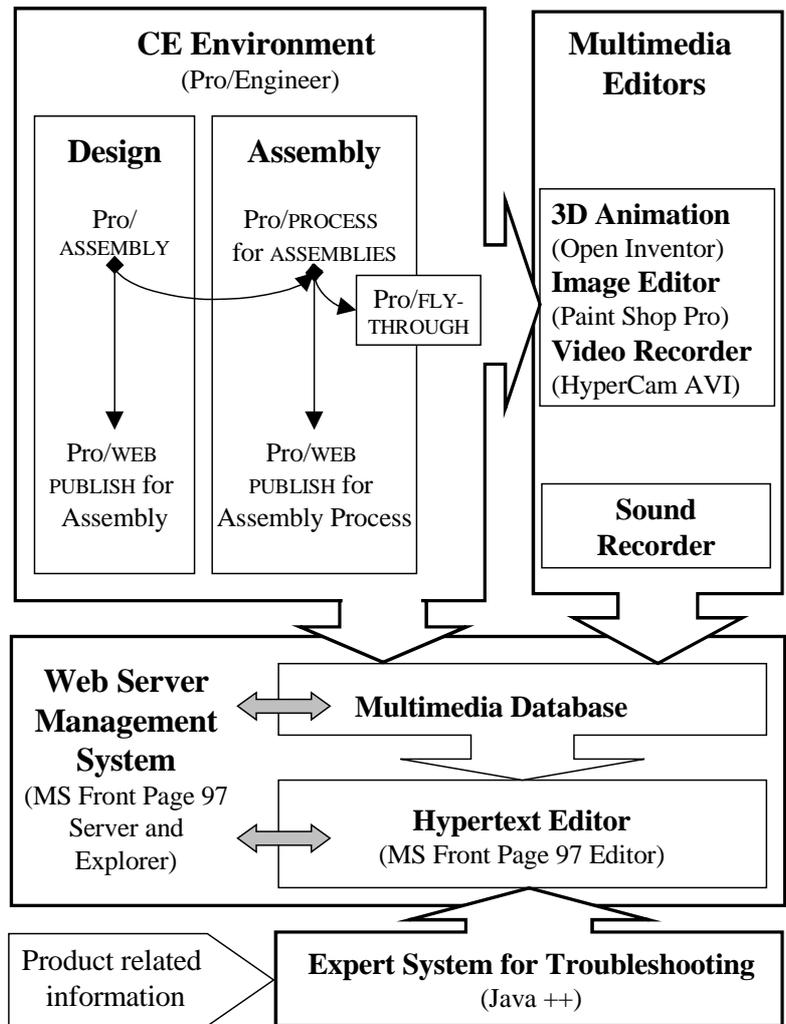


Bild 3: Architektur eines intelligenten Produkthandbuchs

zelrechnern betrieben wird oder ob das Handbuch über ein Intranet oder das Internet zur Verfügung gestellt werden soll. Dies beeinflusst den Aufbau eines (plattformunabhängigen) Handbuchs entscheidend.

Nach der Klärung der Anforderungen, die von den verschiedenen Nutzergruppen kommen sowie aus den Bedingungen und Voraussetzungen der Rechnerumgebungen her resultieren, wurde mit der Entwicklungs- und Implementierungsarbeit begonnen.

Bild 4 zeigt die Startseite des internetbasierten Prototypen eines IPM für einen Gabelstapler der Firma SPARKY. Um eine möglichst schnelle Umsetzung und Entwicklung des intelligenten Handbuchs zu erreichen, wurde ein modularer

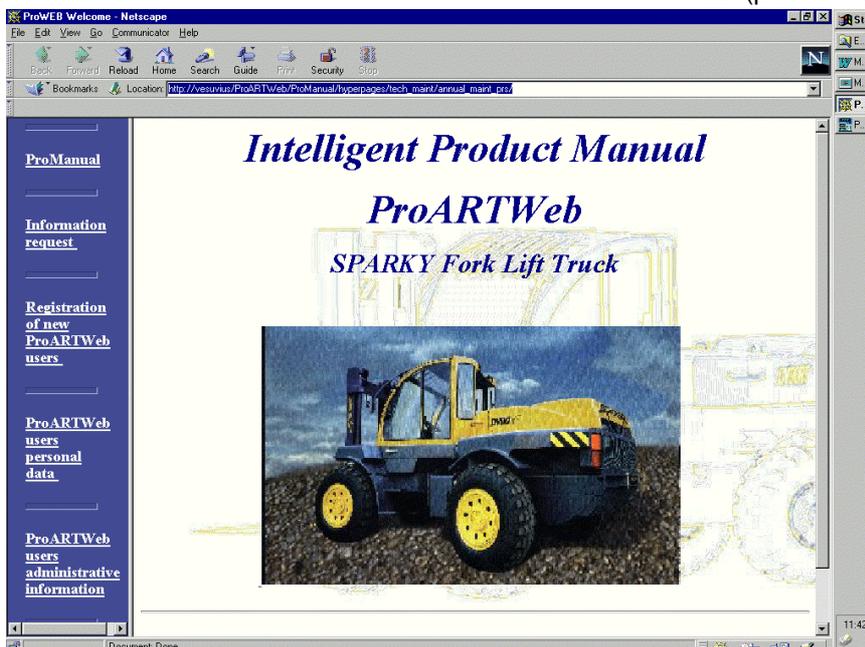


Bild 4: Startseite des Prototypen „SPARKY“

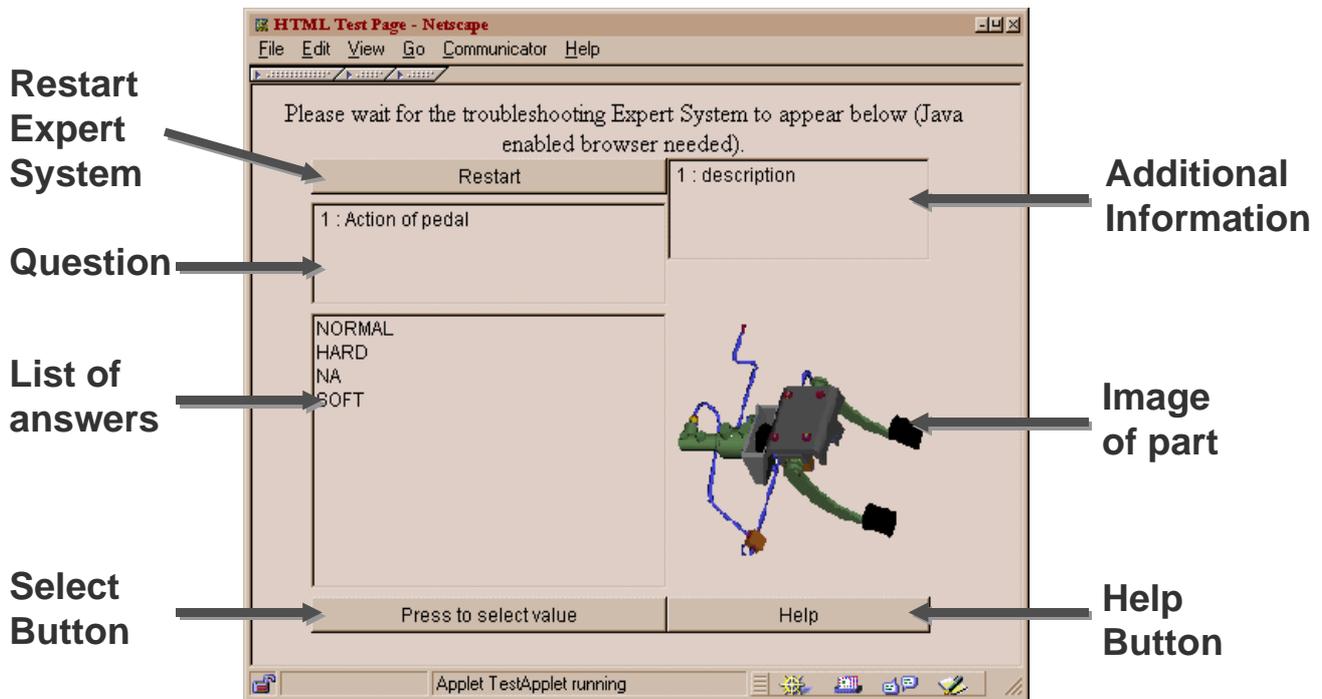


Bild 5: Anfrageseite des Prototypen

Aufbau gewählt, der durch die verwendete Web-technologie in geeigneter Weise unterstützt wird.

Bild 5 zeigt beispielhaft eine Anfrageseite auf der der Benutzer des Handbuchs Informationen zu einer Baugruppe des Gabelstaplers erhält. Neben einem Bild des entsprechenden Teils bzw. der Baugruppe werden weitere Hinweise gegeben. Durch die Möglichkeit, Fragen an ein Expertensystem zu stellen, ist es möglich, den Benutzer gezielt die Antworten anzubieten, die er sucht. Er muß sich also nicht durch Antworten zu Fragen, die er gar nicht gestellt hat, hindurcharbeiten. Auch die Ausführlichkeit der Antworten läßt sich auswählen, indem man seine Erfahrung mit dem beschriebenen Produkt angeben kann. So ist es möglich, daß ein Kfz-Meister nur die technischen Daten, die für das spezielle Bauteil gültig sind, tabellarisch erhält. Dem Fahrer eines Gabelstaplers hingegen werden Informationen zur Funktionsweise (beispielsweise ein Video eines Montagevorgangs), die dem Meister i.d.R. bekannt sein dürften, gegeben. Unabhängig von der Angabe der persönlichen Qualifizierung kann man jedoch über ein Hilfesystem jederzeit alle verfügbaren Daten abfragen.

Die Hauptaufgabe der Projektpartner besteht derzeit in der Erstellung der einzelnen Module der beiden IPM Prototypen. Dabei wird besonders die Funktionalität weiter ausgestaltet und zusätzliche von den Firmen bereitgestellte Daten werden eingebunden.

4 Zusammenfassung

Ausgehend von einer Analyse (Normen, konventionelle Handbücher) der für ein elektronisches Produkthandbuch erforderlichen Informationen sowie der Quellen dieser Informationen (Phasen des Produktlebenszykluses) werden in Zusammenarbeit mit der Industrie exemplarisch zwei funktionsfähige Handbücher entwickelt. Bei der Erarbeitung der elektronischen Handbücher stehen die Anforderungen und Wünsche des späteren Benutzers im Vordergrund. Die ihm angebotenen Informationen sollen gezielt auf seine Bedürfnisse abgestimmt werden, so daß er nicht mit einer Datenflut zugeschüttet wird. Die neusten Entwicklungen der Rechnerunterstützung bieten dazu einen gute Ausgangspunkt.

5 Literatur

- /1/ Ort, A.: ProManual: Erstellung elektronisch verfügbarer Produkthandbücher, Institutsmittellung Nr. 22, IMW Clausthal 1997

3D-CAD-Einsatz in Konstruktion und Fertigung

Tawil, M.

Mit dem Einzug der 3D-CAD-Technik in die Konstruktion und Fertigung wurden den Industrieunternehmen nahezu unbegrenzte Möglichkeiten eröffnet, mit denen sie neue Produkte schnell und günstig herstellen können. Dabei verlieren die klassischen, fast ausschließlich als elektronisches Zeichenbrett verwendeten CAD-Systeme immer mehr an Bedeutung. Am Institut für Maschinenwesen (IMW) werden neben den gängigen 2D-Systemen verstärkt verschiedene 3D-CAD-Systeme in Forschung und Lehre sowie bei der Bearbeitung unterschiedlicher Projekte mit den Industriepartnern eingesetzt. In diesem Artikel werden einige Anwendungsbeispiele der 3D-CAD in Konstruktion und Fertigung vorgestellt.

The introduction of the 3D-CAD-technology in design and manufacturing opens almost unlimited possibilities for industrial enterprises and enables them to create new less expensive products faster. The use of classical CAD systems as pure drawing tools diminish in their importance. Besides the usual 2D-CAD systems various 3D-CAD systems are increasingly in use for research and education as well as in industrial project cooperations at the Institut für Maschinenwesen (IMW). In this article some application examples of the 3D-CAD in design and manufacturing will be presented.

1 Einleitung

Im immer härter werdenden Wettbewerb sieht sich die Fertigungsindustrie gezwungen die Produktentwicklungszeiten erheblich zu verkürzen. Dies wird durch steigende Komplexität der Produkte und Produkttechnologien sowie zunehmende Produktvielfalt und -variation erschwert. Allein in der Konstruktion, wo Funktion und Gestalt eines Produktes bestimmt werden, fallen 70% der Herstellungskosten an /1/. Die Forderung nach intelligenten CAD-Gesamtlösungen zur Rationalisierung der Konstruktions- und Fertigungsprozesse wird immer lauter. Durch die Einbindung der CAD-Systeme in den gesamten Produktentstehungsprozeß lassen sich folgende Zielsetzungen realisieren /2/:

- durch die schnelle Durchführung von Routine-tätigkeiten können die Durchlaufzeiten drastisch gesenkt werden,

- die einmal in den Rechner gegebenen Daten können in den der Konstruktion nachfolgenden Bereichen ohne manuelle Interpretations- und Konvertierungsschritte weiterbearbeitet werden. Dadurch kann Zeit gespart und Übertragungsfehler vermieden werden,
- schnelle und flexible Reaktion auf Kundenwünsche, da Änderungen der vorhandenen Daten rasch und Bereichsübergreifend durchgeführt werden können.

Die heutigen 3D-CAD-Systeme ermöglichen es Bauteile am Bildschirm realitätsnah zu erzeugen und darzustellen. Ausgehend von den dreidimensionalen Modellen können Baugruppen, Einzelteil- und Zusammenbauzeichnungen erstellt werden, wobei der Assoziativität der drei Objekte Sorge getragen wird. D. h. eine Änderung des Modells wirkt sich auf die Baugruppe bzw. die Zeichnung oder umgekehrt aus.

Die Nutzung der CAD-Technik als Werkzeug zur Simulation bestimmter Betriebsabläufe ist heutzutage in vielen Industriebranchen zu finden. Crash-Tests, Triebwerks-/ Getriebekinematik, Tiefzieh-, Spritzguß-, NC-Prozesse u. ä werden mit enormer Zeit- und Kostenersparnis dank leistungsfähiger und relativ kostengünstiger Rechner realitätsgetreu nachgebildet.

Ein weiterer Vorteil der 3D-CAD-Systeme ist ihre Durchgängigkeit. Die in der Konstruktion erzeugten Daten können mit den entsprechenden Schnittstellen von den nachgeschalteten Abteilungen z. B. der Fertigung genutzt werden.

2 3D-CAD in der Konstruktion

Die Integration der 3D-CAD in die Konstruktion trägt durch Verringerung der Durchlaufzeiten, schnelle Reaktion auf kurzfristige Änderungswünsche, und die ständige Optimierung der Produktentwicklung zur Verkürzung der Innovationszeit von der Idee bis zum fertigen Produkt bei /3/. Im folgenden werden einige Konstruktionstätigkeiten aufgezeigt, bei denen der 3D-CAD-Einsatz am IMW erfolgreich erprobt wurde.

2.1 Entwerfen und Modellieren

Bild 1 zeigt die dreidimensionale Darstellung einer Teleskopmontierung, die im Rahmen von Forschung und Lehre am IMW konstruiert wurde. Die Einzelbauteile der Montierung wurden als 3D-Volumenelemente erzeugt und zu Unterbaugruppen zusammengefügt.

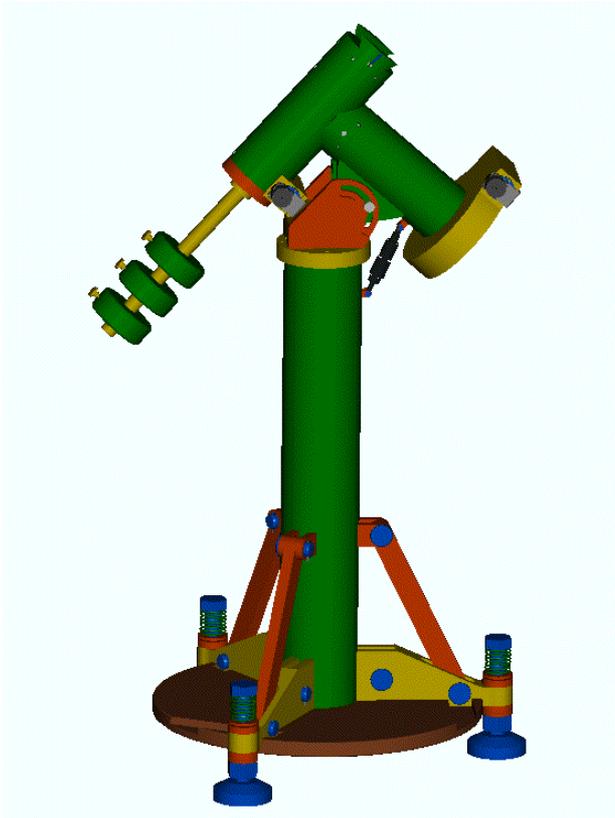


Bild 1: Teleskopmontierung /4/

Diese zeichnen sich durch hohe Übersichtlichkeit sowie leichte Handhabbarkeit aus und lassen sich einfach zu einer Zusammenbaugruppe verknüpfen. Dabei kann man die Zeichnungs- und Stücklisten-erstellung sozusagen als Abfallprodukt betrachten. Denn aus den 3D-Modellen werden 2D-Zeichnungen regelrecht abgeleitet und Stücklisten sogar automatisch erstellt.

Die Einzelbauteile sind vollparametrisch so, daß ihre Geometrie beliebig modifiziert werden kann. Eine Änderung an einem Objekt (z. B. Einzelteil) wirkt sich auf alle damit in Beziehung stehenden Objekte (z. B. Baugruppe, Zeichnung) aus. Da während der Entwurfsphase bekanntermaßen ständig optimiert wird, ist es nur aufgrund der Assoziativität des CAD-Systems möglich, die Montierung direkt auf dem Rechner zu konstruieren.

Darüber hinaus bieten die meisten 3D-Systeme Kollisionskontrolle an. Dadurch kann eine fehlerfreie Montage gewährleistet werden.

2.2 Normteil- und Produktdatenbanken

Ein Großteil seiner Tätigkeit verbringt der Konstrukteur mit der Erstellung von Norm- und Wiederholteilen /5/. Die Parametertechnik der heutigen 3D-CAD-Systeme ermöglicht es innerhalb eines Volumenmodells geometriespezifische Beziehungen zu bestimmen, mit denen man die Form des Modells durch Ändern eines Maßes steuern kann. Um eine Normteillbibliothek beispielsweise für Wälzlager zu erstellen, werden Parameter definiert, die die Abhängigkeit der Breite und des Außendurchmessers vom Innendurchmesser festlegen. Durch Änderung des Innendurchmessers entsteht eine Kopie des Lagers gleicher Normreihe mit den modifizierten Maßen. Dadurch wird dem Konstrukteur eine zeitraubende Routinearbeit erspart. Aufgrund der Tatsache, daß jeweils nur ein Teil pro Normreihe notwendig ist, um die komplette Reihe zu erfassen, ist die Pflege einer solchen Bibliothek mit wenig Aufwand verbunden. In **Bild 2** ist ein Rillenkugellager aus der institutsinternen Datenbank dargestellt.

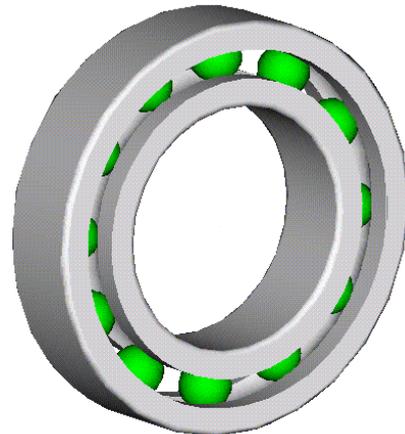


Bild 2: Vollparametrisches Modell eines Rillenkugellagers

2.3 Berechnung und Auslegung

Mit Hilfe von 3D-Systemen lassen sich Bauteile und komplette Baugruppen optimal dimensionieren. Die aufwendige Vernetzung, die man von den klassischen FEM-Programmen kennt, erfolgt hier automatisch. Durch die Auswahl der entsprechenden Belastungsart und -bedingungen sowie des Materi-

als berechnet das Programm die auftretenden Spannungen bzw. Verformungen. In **Bild 3** ist die Verformung im Ständer der Teleskopmontierung aufgrund einer vertikalen Druckbelastung dargestellt. Ferner kann man die örtlichen Spannungen an bestimmten Stellen und Optimierungsvorschläge vom Programm ausgeben lassen.

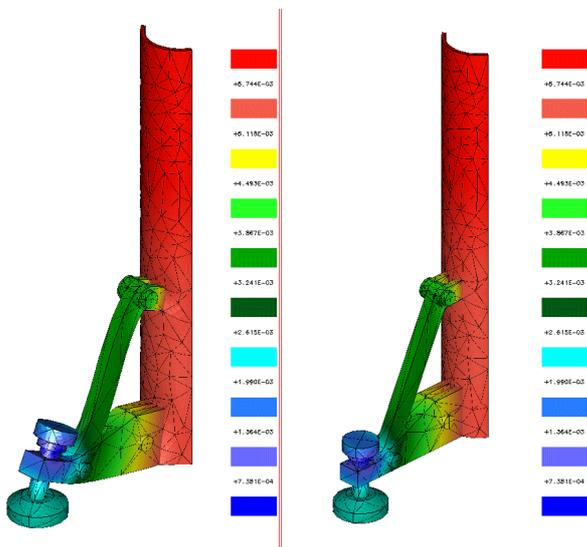


Bild 3: FEM-Modell der Teleskopmontierung /4/

3 3D-CAD in der Fertigung

3.1 CNC-Fräsen

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens der DFG (Fertigen in Feinblech) wurde ein Fahrradrahmen aus Blech konstruiert /6/. Am IMW wurde die Konstruktion des Rahmens und die Fertigung der Stempel und Matrizen für das Tiefziehwerkzeug durchgeführt. Zum automatischen Erstellen der NC-Programme wurden die in der Konstruktion des Rahmens anfallenden Geometriedaten lediglich um die Technologiedaten ergänzt. Die Bearbeitungsfolge wurde im 3D-System zur Kontrolle ihrer Richtigkeit simuliert (**Bild 4**). Anschließend wurde das NC-Programm durch ein Post-Prozessor für die Maschinensteuerung der Fräse umgewandelt.

3.2 Zahnkantenabdachung

Für einen Industriepartner wurde am IMW ein Programm, auf 3D-CAD-Plattform, zur Simulation des Fertigungsablaufs während der Zahnkantenabdachung entwickelt (**Bild 5**). Bedingt durch die vielen Freiheitsgrade der Bearbeitungsmaschine mußten

entsprechend zahlreiche Parameter variiert werden um die gewünschte Abdachgeometrie zu erhalten.

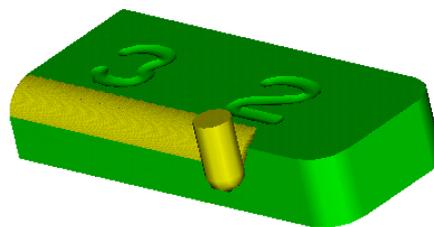


Bild 4: Bearbeitungssimulation eines Stempels für das Ziehwerkzeug mit einem Kugelfräser

Das Einrichten und Einfahren der Maschine dauerte teilweise mehrere Tage. In vielen Fällen war es notwendig spezielle Fräser für jeden Bearbeitungsfall anzufertigen um die angestrebten Ergebnisse zu erzielen. Dadurch entstand eine enorme Werkzeugvielfalt, die Lager- und Verwaltungskosten mit sich bringt.

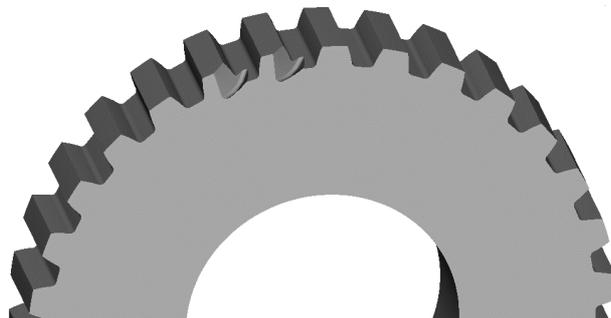


Bild 5: 3D-Modell eines Zahnrades mit zwei abgedachten Zahnkanten

Das vom IMW entwickelte Programm ermöglicht die realitätsgetreue Simulation der Fertigung durch Berücksichtigung aller vorhandenen Freiheitsgrade. Dabei kann der Einfluß der Einzelnen Parameter auf die Abdachgeometrie schnell dargestellt werden. Die Parameter werden solange variiert bis das gewünschte Ergebnis erreicht wird. Nun werden die so ermittelten Werte in die Maschinensteuerung eingegeben und es kann mit der Fertigung begonnen werden.

3.3 Rapid Prototyping

Das Rapid Prototyping ist heute ein weitverbreitetes Verfahren. Durch dieses Verfahren ist die Möglichkeit gegeben, zu einem frühen Entwicklungsstadium ein anschauliches und funktionsfähiges Modell zu haben, an dem man mögliche Design- und Funktionsfehler erkennen und beseitigen kann /7/. Ähnlich der CNC-Fertigung werden auch hier die in der Konstruktion anfallenden Daten bei der Fertigung des Modells weiterverwendet. Diese Daten werden als sogenanntes STL-Format exportiert und direkt von der Bearbeitungsmaschine abgelesen. **Bild 6** zeigt das mit einem Industriepartner entwickelte Kunststoff-Gehäuse eines Hörgerätes. Nach der Konstruktion des Gehäuses wurde seine Geometrie innerhalb einiger Minuten in ein STL-Format umgewandelt. Die Herstellung des Prototypen nach dem Stereolithographie-Verfahren dauerte einige Stunden.

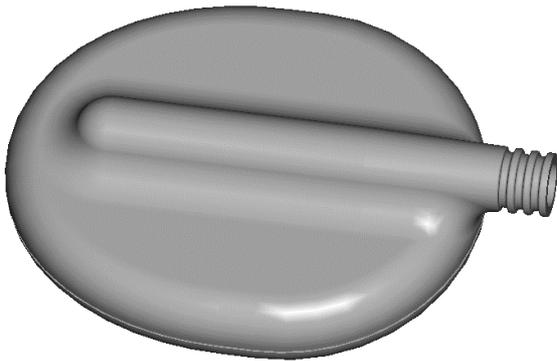


Bild 6: Hörgerätgehäuse für die Fertigung mit dem Rapid Prototyping-Verfahren

4 Zusammenfassung

Die Vorteile der 3D-CAD-Integration in Konstruktion und Fertigung liegen auf der Hand und wurden anhand verschiedener Anwendungsbeispiele in diesem Artikel vorgestellt. Der CAD-Einsatz bringt den Industrieunternehmen Wettbewerbsvorteile durch schnellere Angebotsbearbeitung, Flexibilitätserhöhung und termingerechte Projektfertigstellung.

Eine effektive Nutzung der CAD-Lösung setzt eine gesamtheitliche Integration dieser Technik in allen Unternehmensbereichen voraus. Dazu müssen die geistigen Mauern zwischen den einzelnen Abteilungen abgebaut und statt dessen Teamarbeit gefördert werden.

Eine sinnvolle Erweiterung der CAD-Systeme wäre die Einbindung der Feature-Technologie. Die featurbasierte Darstellung ermöglicht die Verknüpfung der funktions-, qualitäts-, fertigungs- und werkstoffbezogenen Informationen bei der Produktentwicklung und kann somit als Schnittstelle zwischen CAD- und wissensbasierten Systemen fungieren.

5 Literaturverzeichnis

- /1/ Ehrlenspiel, K.: *Kostengünstiges Konstruieren*, Springer, Berlin, 1985
- /2/ Vajna, S.: *CAD / CAM für Ingenieure*, Vieweg, Braunschweig / Wiesbaden, 1994
- /3/ Dietz, P.: *Konstruktionslehre*, Vorlesung IMW Clausthal 1993
- /4/ Reintgen, T.: Unveröffentlichte Studienarbeit, IMW TU Clausthal, 11.1998
- /5/ Lewandowski, S., Hohmann, S.: *3D-Normteillbibliotheken innerhalb eines PDM-Konzepts*, CAD-CAM-Report Nr. 9, Essen, 1998
- /6/ Penschke, S., Heinen, F., Griesbach, B.: *Entwicklung und Fertigung eines Mountainbikerahmens in Blech*, Institutsmittellung Nr. 22, IMW Clausthal, 1997
- /7/ Klemp, E.: *Rapid Prototyping - vom Prototyp zum Werkzeug*, Institutsmittellung Nr. 22, IMW Clausthal, 1997

SIMNET - Workflow Management for Simultaneous Engineering Networks

Goltz, M.; Schmitt, R.

Eine Analyse der Entwicklungsprozesse in Unternehmen mit komplexen Produkten und zahlreichen Kunden-Lieferanten-Beziehungen hat ergeben, daß ein sehr großer Anteil (teilweise bis zu 70%) der Ingenieurstätigkeit für organisatorische statt „produktive“ Aufgaben aufgewandt wird. Unzureichendes Prozeßmanagement im Engineering Bereich, fehlender Zugang zu Produktdaten bei Zulieferern und Partnern sowie heterogene Kommunikations- und Systemarchitekturen sind dabei als Hauptgründe der mangelnden Effizienz ermittelt worden. Der folgende Artikel erläutert die Ziele von SIMNET – einem von der Europäischen Union im Rahmen des ESPRIT-Programms geförderten Forschungsprojekts¹.

Analyses of engineering activities in companies with complex products and numerous customer/supplier relationships show that a very high share (up to 70%) of the engineering hours are spent on organisational rather than 'productive' tasks. Poor engineering process management, missing direct access to product data among the engineering partners as well as heterogeneous communication and system infrastructure have been identified as major reasons for lacking engineering efficiency. The following article shows the objectives of SIMNET – a project funded by the Commission of the European Communities under the ESPRIT programme¹.

1 Simultaneous Engineering

Der Begriff „Simultaneous Engineering“ (SE) beschreibt eine Strategie, durch Parallelisierung der einzelnen Phasen der Produktentwicklung die Ent-

wicklungszeit eines Produkts drastisch zu reduzieren.

Dies setzt voraus, daß Entwicklung, Konstruktion, Fertigung, Montage, Vertrieb, Marketing u. a. bei Produktinnovationen gleichzeitig am Entwicklungsprozeß beteiligt werden.

Mitarbeiter aus allen Abteilungen bilden interdisziplinäre Teams mit dem Ziel, die vielfältigen und oft komplexen Abhängigkeiten bei der Entwicklung neuer Produkte frühzeitig zu erkennen und in die Strategien einzubeziehen. SE stellt konzeptionell eine ganzheitliche Vorgehensweise dar, die ein funktionierendes Projektmanagement voraussetzt. Alle Phasen des Entwicklungsprozesses von der Produktidee bis zur Produktbetreuung werden durch das interdisziplinäre Projekt begleitet. Häufig werden die am späteren Fertigungs- und Distributionsprozeß beteiligten externen Zulieferer auch miteinbezogen /1/.

2 PDM als Schlüsseltechnologie für Simultaneous Engineering

Wie in Abschnitt 1 bereits erwähnt, handelt es sich bei SE primär um eine Organisationsstrategie zur Optimierung der Produktentwicklungsaktivitäten in einem Unternehmen. Allerdings wird heute mit dem Begriff SE automatisch auch der Einsatz unterstützender Informationstechnologien verbunden. Systeme des Produktdatenmanagements (PDM, auch: Engineering-Datenmanagement - EDM) gelten dabei als Schlüsseltechnologie für die integrierte Produktentwicklung.

Die CIMdata Corp. /2/ hat eine inzwischen allgemein anerkannte Definition für PDM formuliert. Demnach wird bei der Beschreibung von PDM-Funktionen zwischen zwei Kategorien unterschieden (siehe Bild 1):

Anwendungsfunktionen bilden die Schnittstelle zur gesamten PDM-Funktionalität einschließlich Datenspeicherung, -wiedergewinnung und -verwaltung. Verschiedene Anwendergruppen nutzen unterschiedliche Teilmengen der Anwendungsfunktionen, die wie folgt eingeteilt werden können:

¹ EP 26780 SIMNET - Fördersumme: ECU 1.380.000,-; Starttermin: 1.11.98; Dauer: 30 Monate; Projektpartner: Siemens SGP Verkehrstechnik GmbH, Graz (A) - Koordinator; Eigner + Partner AG, Karlsruhe (D); Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH, München (D); OÖ Datenhighway Entwicklungs-GmbH, Linz (A); The Institute for Business Engineering and Technology Application, Eindhoven (NL); Technische Universität Clausthal (D), IPS Ingeniería de Productos, Procesos y Sistemas Integrados S.L., Valencia (E)

- Daten- und Dokumentenmanagement, d. h. Verwaltung beliebiger Daten- und Dokumentensätze einschl. Versionsmanagement sowie Check-in- und Check-Out-Mechanismen für die Ablage und Wiedergewinnung von Daten aus einem virtuellen Datentresor,
- Produktstrukturmanagement, d. h. Verwaltung von Produktversionen und Produktvarianten auf verschiedensten Freigabeebenen sowie Management von Produktkonfigurationen
- Klassifizierung, d. h. parametrisierte Verwaltung von Produktkomponenten nach Sachmerkmalen einschl. der Bereitstellung von Bauteil- oder Feature-Bibliotheken,
- Projektmanagement für die Planung und Steuerung komplexer Produktentwicklungsvorhaben und
- Workflowmanagement zur automatisierten Durchführung strukturierter und sich wiederholender Abläufe wie z. B. Prüf- und Freigabeprozesse im Änderungswesen.

Hilfsfunktionen sollen die Nutzung des Systems erleichtern und die genannten Anwendungsfunktionen unterstützen. Hilfsfunktionen stellen die Verbindung zur Betriebsumgebung her und schirmen deren Funktionen vom Anwender ab. Anpassungsfunktionen gewährleisten die Konformität des Systems mit der übrigen Umgebung des Anwenders. Zu den Hilfsfunktionen zählen:

- Kommunikation und Benachrichtigung,
- Datentransport,
- Datenkonvertierung,
- Visualisierung grafischer Daten und
- Systemadministration.

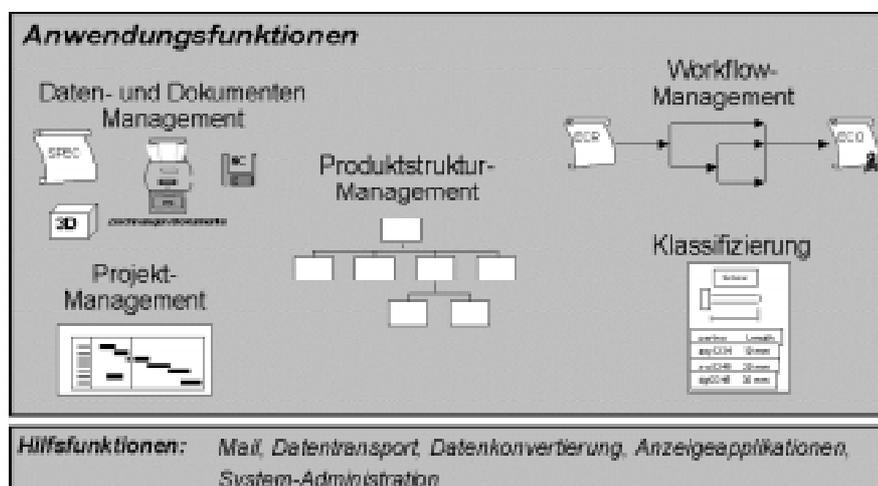


Bild 1: Funktionen eines PDM-Systems (nach /2/)

3 Probleme bei der Systemunterstützung über Standort- und Unternehmensgrenzen hinweg

Selbst bei Voraussetzung eines „idealen“ PDM-Systems, das alle der genannten Funktionen in vollem Umfang auf sich vereinigt, sind im Falle einer Nutzung der PDM-Technologie zur Unterstützung unternehmensübergreifender SE-Prozesse unter Einbindung von Zulieferern und Engineering-Partnern folgende Probleme bislang ungelöst:

- mangelnde Transparenz der Engineering-Daten durch
 - das Fehlen einer einheitlichen elektronischen Produktdatenverwaltung,
 - den fehlenden direkten Zugriff auf standortexterne Produktdaten,
 - heterogene Systemlandschaften;
- mangelnde Transparenz der Engineering-Prozesse aufgrund der Nichtverfügbarkeit von Werkzeugen und Systemen zur Festlegung und Verfolgung standort- und unternehmensübergreifender Informationsflüsse.

4 Das EU-Projekt SIMNET - ein Stück Evolution in der PDM-Technologie

Das EU-Projekt SIMNET („Workflow Management for Simultaneous Engineering Networks“) widmet sich den genannten Problemen und versucht auf der Grundlage etablierter Technologien, insbesondere jener des Produktdatenmanagements, Lösungsansätze zu deren Überwindung zu erarbeiten.

Im einzelnen sollen folgende Ziele im Rahmen des Projekts erreicht werden:

4.1 Verknüpfung von Engineering-Prozessen mit Produktdaten

Obwohl die meisten PDM-Systeme Funktionen zur Administration von sowohl Produkt- als auch Prozeßdaten anbieten, gibt es keine Verbindung zwischen Produktstrukturen/-konfigurationen und den Workflow Management Modulen. Um jedoch eine effiziente Koordination komplexer Änderungsprozesse zu ermöglichen, ist es wünschenswert,

zum einen sofort die Auswirkungen einer geplanten bzw. bereits ausgeführten Modifikation einer Komponente auf die übrigen Komponenten innerhalb der Produktstruktur transparent zu machen. Zum anderen ist im Falle einer Änderung der Produktdaten zu bestimmen, welche Engineering-Aktivitäten in welcher Reihenfolge auszuführen sind, und welche Abteilungen in den Entscheidungsprozeß miteinbezogen werden müssen.

Basierend auf den Funktionen des PDM Systems CADIM/EDB von Eigner + Partner sollen Mechanismen entwickelt werden, welche die oben angeführten Probleme lösen, um letztendlich ein produktdatengesteuertes Engineering-Workflow-Management zu realisieren.

4.2 Flexible Definition und Ausführung komplexer und dynamischer Simultaneous Engineering Workflows

Heutige Workflow-Management-Systeme - entweder in Form von Stand-alone-Lösungen oder als Bestandteil eines PDM-Systems - bieten keine ausreichende Flexibilität, um komplexe dynamische Simultaneous Engineering Workflows effizient zu verwalten. Ein Hauptgrund dafür ist in der Entwicklungsgeschichte dieser Systeme zu suchen. Ursprünglich zur Automatisierung von Vorgängen im Bürobereich gedacht, ist die Philosophie der Workflow-Management-Systeme auf die Ausführung gut strukturierter, zeitlich unveränderlicher und meist eindimensionaler Workflows ausgerichtet. Im Engineering hingegen treten größtenteils unstrukturierte oder spontane Ad-Hoc Workflows auf, die oft nur ein einziges Mal durchlaufen werden. Eine Verfolgung dieser dynamischen Prozesse auf der Basis heutiger Systeme ist nahezu unmöglich.

Des Weiteren sind zur Definition und Planung komplexer Workflows geeignete Funktionen notwendig, die eine Modellierung der zugrundeliegenden Geschäftsprozesse ermöglichen. Dazu notwendige Schnittstellen zu Werkzeugen zur Geschäftsprozeßmodellierung sind bisher aber weder für Workflow-Management-Systeme noch für PDM-Systeme verfügbar. Ein Grund dafür ist der Mangel an Standards zum Austausch von Workflow Daten. Erst vor kurzem wurde von der Workflow Management Coalition (WfMC – eine Vereinigung von Entwicklern von Workflow Management Systemen und Werkzeugen zur Geschäftsprozeßmodellierung) eine Spezifikation für Standardschnittstellen veröffentlicht.

Daraus ergeben sich als weitere Projektziele:

- die Erweiterung der existierenden Workflow Funktionalität von CADIM/EDB um Mechanismen zur Verwaltung komplexer dynamischer Workflows und
- die Entwicklung einer WfMC-Schnittstelle zu kommerziellen Werkzeugen zur Geschäftsprozeßmodellierung.

4.3 Offene PDM-Workflow-Architektur in Übereinstimmung mit den WfMC- und STEP-Spezifikationen

Während sich zum Austausch von Produktdaten die ISO-10303 „Standard zum Austausch von Produktmodelldaten“ zum Stand der Technik in CAD/CAM und PDM Systemen entwickelt, gibt es zum Austausch von Workflow Daten nur erste Ansätze. Wie bereits oben erwähnt hat die WfMC kürzlich eine Spezifikation veröffentlicht, die es erlaubt, Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Workflow Systemen zu entwickeln. Diese Spezifikation wird allgemein akzeptiert, obwohl es sich dabei nicht um einen offiziellen Standard handelt. Es ist davon auszugehen, daß die Entwickler von Werkzeugen zur Geschäftsprozeßmodellierung und Workflow Management Systemen dieser Spezifikation folgen werden.

Gegenwärtige PDM-Systeme verfügen zwar häufig über STEP-Schnittstellen, ihre Workflow Management Module dagegen unterstützen bisher noch nicht den WfMC-Standard. Doch diese Unterstützung ist grundlegend, betrachtet man das heterogene Systemumfeld des Projektteams. Unterschiedliche PDM Systeme müssen in der Lage sein, miteinander zu kommunizieren. Außerdem werden PDM Systeme parallel zu Produktionsplanungs- und -steuerungssystemen (PPS, MRPII) oder unternehmensweiten Informationsmanagement Systemen wie SAP/R3 oder BAAN IV eingesetzt, die ebenfalls Workflow Funktionalitäten anbieten.

Aufgrund ihres dualen Ansatzes im Hinblick auf die Verwaltung von sowohl Produktdaten als auch Prozeßdaten, müssen Entwickler von PDM-Systemen beide Standards berücksichtigen. Während STEP ein offizieller ISO Standard ist, ist die Spezifikation der WfMC bislang nur eine private Initiative, die bei der Entwicklung offizieller Standards nicht berücksichtigt wurde. Da STEP auch eine Spezifikation für Prozeßdaten anbietet, ist es möglich, daß zu Konflikten zwischen diesen beiden Standards kommt.

Deshalb wird eine weitere Aufgabe des Projekts sein, beide Standards hinsichtlich Kompatibilität zu untersuchen. In Abhängigkeit von den Ergebnissen dieser Untersuchung wird ein Konzept für die PDM-Workflow Architektur ausgearbeitet und für die Anpassung von CADIM/EDB verwendet.

4.4 Unternehmensübergreifende Extranet-Lösungen für Engineering Workflows

In den letzten Jahren hat der gewaltige Erfolg des Internets dazu geführt, daß sich das TCP/IP-Protokoll sowie die darauf basierenden Dienste, wie z. B. WWW, FTP, Email, zu einem weltweiten plattformübergreifenden Quasistandard entwickelt haben. Unternehmen nutzen vermehrt Internet-Technologien zum Aufbau eines Intranet, die dem internen Informationsaustausch dienen.

Intranet beschreibt das interne Netzwerk eines Unternehmens, das auf Internet-Technologie basiert und entweder keinen Zugang zum weltweiten Internet anbietet, oder diesen nur über sogenannte „Firewalls“ erlaubt. Ein Extranet hingegen stellt ein unternehmensübergreifendes Intranet dar, das z. B. Lieferanten oder Kunden mit einbezieht.

Obwohl die verfügbare Internet-Technologie als Integrationsplattform dienen kann, wird diese kaum für Workflow Management und zugehörige Kommunikationswerkzeuge, wie z. B. Elektronische Nachrichtenübermittlung oder Datentransfer, genutzt. Ein Hauptgrund dafür sind die mit der Internet-Technologie verbundenen Sicherheitsbedenken. Gerade die im Rahmen von Engineering-Workflows transferierten Daten gelten als äußerst sensibel, weshalb den Sicherheitsmechanismen innerhalb eines Extranet eine hohe Bedeutung zukommt. Dies gilt nicht nur für den unberechtigten Zugriff Dritter außerhalb des Extranet, sondern auch für die Beschränkung von Zugriffsrechten der Kunden und Lieferanten auf unternehmensinterne Produkt- oder Prozeßdaten. Sogenannte „Firewalls“ bieten eine Möglichkeit, Intra-/ Extranet vor unberechtigtem Zugriff zu schützen. Allerdings existiert bislang noch keine standardisierte Firewall-Lösung. Es ist zwar technisch möglich, eine Firewall so zu konfigurieren, daß sie zufriedenstellende Sicherheit bietet. Aber ein Firewall-Konzept, welches die besonderen Ansprüche der Simultaneous Engineering Workflows berücksichtigt, ist am Markt nicht verfügbar.

Im Rahmen des SIMNET Projekts soll ein solches Konzept entwickelt und implementiert werden.

4.5 Pilotanwendung als Projektergebnis

Das Ergebnis des SIMNET-Projekts besteht in einer prototypischen Lösung für das unternehmensübergreifende Workflow Management von SE-Prozessen. Dieser Prototyp soll in die Systemumgebung der Endanwender implementiert, getestet und bewertet werden. Zu dieser Systemumgebung zählen:

- PDM-System CADIM/EDB[®] der Eigner + Partner AG,
- CAD/CAM-Paket Pro/Engineer[®] von PTC,
- CAD-System ME 10 von Hewlett Packard,
- Unternehmensinformationssysteme SAP R/2 und SAP R/3,
- Werkzeug zur Modellierung von Geschäftsprozessen (ARIS Toolset[®] der IDS Prof. Scheer GmbH.

Die kommerziellen Systeme und Werkzeuge, die für Forschung und Entwicklung verwendet werden, stellen den Stand der Technik in Bezug auf Prozeßmodellierung, Produktdatenmanagement, CAD/CAM und Informationsmanagement dar. Sie dienen als notwendige Basis zur Überprüfung der ausgeführten Forschung. Die entwickelten Methoden und Mechanismen lassen sich aber ohne weiteres auf andere Systeme und Werkzeuge übertragen, wenn diese einen ähnlichen Funktionsumfang anbieten.

5 Literatur

- /1/ Liessmann, K.: Gabler Lexikon Controlling und Kostenrechnung, Betriebswirtschaftlicher Vlg Gabler, 1997
- /2/ CIMdata Corp. (Hg.): Product Data Management: The Definition - An Introduction to Concepts, Benefits, and Terminology, Informationsblatt der CIMdata Corporation, 1996
- /3/ Abramovici, Michael; Gerhard, Detlef: Engineering Daten Management (EDM)-Anspruch, Wirklichkeit und Zukunftsperspektiven, Engineering Daten Management 1996/97 (GITO), S. E 12 ff
- /4/ Potthast, Peter; Pluszynski, Klaus: Trends und Kriterien für den Aufbau einer IT-Infrastruktur in EDM/PDM-Projekten, Industrie Management special: Engineering Management 1997/98, S. E 42 ff

3D-Verformungsmessungen auf 10nm genau Grundlagen und Anwendungsbeispiele der Speckle-Interferometrie

Käferstein, B.

Die Speckleinterferometrie ist eine Methode zur hochgenauen Verformungsmessung bei statischer und dynamischer Last. Sie ist aus der Holographie abgeleitet und kann durch deren Gesetzmäßigkeiten erfaßt werden. Im Gegensatz zur relativ komplexen Anwendungstechnik der klassischen Holographie bietet die Speckleinterferometrie den Vorteil, daß sie aufgrund der rein elektronischen Auswertung der Interferenzbilder auf Bildverarbeitungsrechnern online Verformungsfelder im Bereich von 0,01-2µm erfaßt.

Speckle interferometry is a highly sensitive method to detect small scale static and dynamic deformations. The setup is derived from holography and the theoretical equations are indeed quite identical. Speckle interferometry has in contrast to the complex application procedures of traditional holography the advantages of full automated image processing. This makes it possible to evaluate deformation fields in a range from 0.01µm up to 2µm in real time on common computer systems.

1 Einleitung

Die Speckleinterferometrie ist ein Ganzfeldmeßverfahren zur Ermittlung von Bauteildeformationen unter Verwendung von kohärentem und monochromatischem Licht, das zur Interferenz gebracht wird. Die verwendete Lichtquelle darf nur eine Wellenlänge abstrahlen (Monochromasie), und es muß gewährleistet sein, daß die interferierenden Wellen einen gemeinsamen zeitlichen und räumlichen Bezug haben, also die konstante Anfangsphasendifferenz wie beim Austritt aus der Lichtquelle beibehalten. Als Lichtquelle eignet sich deshalb nur ein Laser, dessen Mindestkohärenzlänge durch die Anforderungen des Meßaufbaus festgelegt wird.

2 Grundlagen

2.1 Speckleeffekt

Die Erscheinung der „Speckles“ – „Fleckchen“ oder auch „Lichtgranulation“ genannt, **Bild 1**, beruht auf der Tatsache, daß bei der Beleuchtung von diffus reflektierenden, rauhen Oberflächen die Rauigkeitsspitzen nach dem Huygenschen Prinzip als

Ausgangspunkte für neue Elementarwellen dienen, die sich rein zufällig im Raum ausbreiten und überlagern. Diesen Effekt kann man z.B. bei Laserpointern beobachten, wenn man eine matte Oberfläche anstrahlt. Dabei ist es für eine gute Messung wichtig, eine „gleichmäßig rauhe“ Struktur im Lichtwellenlängenbereich¹ ohne Texturen zu erhalten.

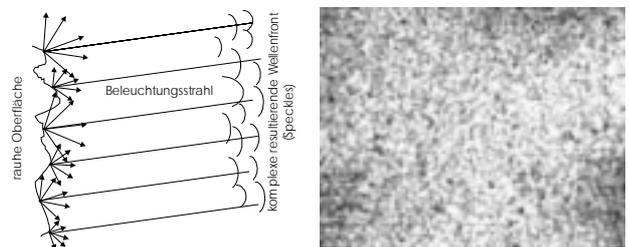


Bild 1: Speckles durch Lichtgranulation auf rauhen Oberflächen

Die Verwendung von matter Aluminiumsprühfarbe oder Sandstrahlen erzeugen zwar sehr grobe und kontrastreiche Speckles, hat aber den Nachteil, daß dort die Rückreflexion sehr zielgerichtet erfolgt, so daß man nur Out-Of-Plane Messungen durchführen kann. Zusätzlich muß die Farbe in mehreren Schichten sehr dünn aufgetragen werden, so daß beide Verfahren relativ aufwendig sind. Besser ist das Aufsprühen von schnell trocknendem Farbeindring-Entwickler, der sich sehr leicht wieder abwischen läßt und für alle Beleuchtungsrichtungen nahezu gleich helle homogene Speckles erzeugt. Weitere Möglichkeiten sind z.B. das Aufrauen mit Sandpapier und Stahlwolle, matter weißer Sprühlack oder Dispersionsfarbe mit Latexanteil, die jedoch nur Notlösungen darstellen. Oberflächen mit Walz- oder Gußhaut können zwar unbehandelt verwendet werden, jedoch ist dann der Lichtverlust sehr groß.

Man unterscheidet zwei Arten von Speckles: Objektive Speckles entstehen, wenn die Bauteiloberfläche mit der Wellenlänge λ und dem Strahldurchmesser L angestrahlt wird und die entstehende komplexe Wellenfront auf einen im Abstand z

¹ z.B. HeNe-Laser mit 0,632 µm Wellenlänge

stehenden Schirm trifft. Die dort entstehende mittlere Specklegröße Δx berechnet sich zu:

$$\Delta x = \frac{\lambda z}{L} \quad \text{Gl. 1}$$

Subjektive Speckles entstehen, wenn eine „granulierte“ oder „speckelnde“ Oberfläche mit einem Abbildungssystem der Brennweite f auf einen Schirm fokussiert wird. Die mittlere Specklegröße ist dann etwa:

$$d_{sp} \approx \frac{2,4\lambda f}{d} = 2,4\lambda F \quad \text{Gl. 2}$$

wobei d der Blendendurchmesser der Abbildungslinse des Objektivs ist, und F ist die sogenannte „Blendenzahl“, die auf dem Blendeneinstellung des Kameraobjektivs aufgedruckt ist und so eingestellt werden muß, daß die Speckles etwa so groß wie die CCD-Pixel sind.

2.2 Interferometrie

2.2.1 Wellenüberlagerung und Bestimmung der Anfangsphasendifferenz

Das grundlegende Meßprinzip ist die Interferometrie, bei der zwei kohärente Lichtwellenzüge zur Überlagerung gebracht werden.

Der Laserstrahl wird in zwei Teilstrahlen aufgespalten. Einer passiert als Referenzstrahl vor oder nach der Aufweitung meist einen Phasenschieber und wird dann auf das CCD-Array der Kamera gelenkt. Mit dem anderen Teil wird das Bauteil beleuchtet, und das reflektierte Specklemuster das man als sogenannten Objektstrahl bezeichnet, über das Kameraobjektiv ebenfalls auf den CCD-Sensor abgebildet, wo sich beide elektrische Lichtfeldvektoren additiv überlagern. In **Bild 2** ist beispielhaft ein interferometrischer Aufbau nach dem klassischen Michelson-Typ dargestellt, mit dem man Verformungen des Objekts senkrecht zur Oberfläche messen kann.

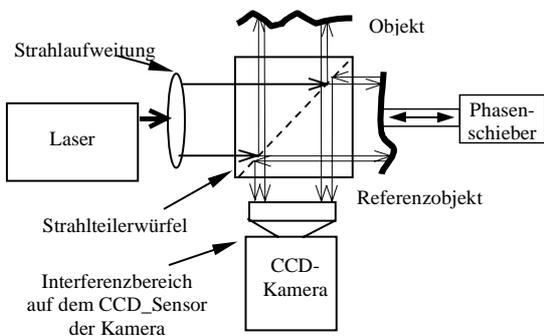


Bild 2: Aufbau eines Michelson-Interferometers zur Messung von Out-Of-Plane Verformungen

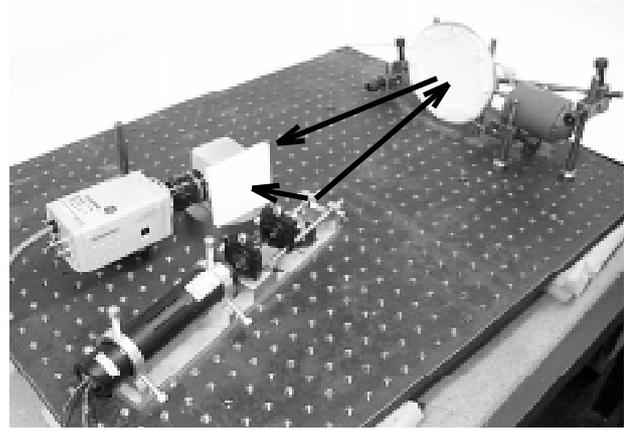


Bild 3: Realisierung eines OOP-Michelson-interferometers nach **Bild 2** ohne Phasenschieber

Betrachtet man einen CCD-Pixel so gilt für die auftreffenden Einzelwellen E mit den Amplituden A und der Lichtfrequenz $f = \frac{\omega}{2\pi}$ bei einer anfänglichen Phasenverschiebung von φ für Objekt- und Referenzstrahl (Index „o“ und „r“):

$$E_o(t) = A_o \sin(\omega t + \varphi_o) \quad \text{Gl. 3}$$

$$E_r(t) = A_r \sin(\omega t + \varphi_r)$$

Durch Addition erhält man:

$$E_{res}(t) = A_o(\sin(\omega t) \cos \varphi_o - \cos(\omega t) \sin \varphi_o) + A_r(\sin(\omega t) \cos \varphi_r - \cos(\omega t) \sin \varphi_r) \quad \text{Gl. 4}$$

Der CCD-Pixel erfaßt die Intensität des Lichtes, die proportional zum Quadrat des E-Feldes ist, und mittelt diese über viele Schwingungsperioden ($T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$):

$$\begin{aligned} \overline{I_{res}} &= \frac{1}{T} \int_0^T I_{res}(t) dt \propto \frac{1}{T} \int_0^T E_{res}^2(t) dt \\ &= \frac{1}{2} A_r^2 + \frac{1}{2} A_o^2 + A_o A_r \cos(\varphi_o - \varphi_r) = \quad \text{Gl. 5} \\ &= I_r + I_o + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\varphi_o - \varphi_r) \end{aligned}$$

Dabei sind I_r und I_o jeweils die Einzelintensitäten von Referenz- und Objektstrahl. Im Cosinus-Term ist die Phasendifferenz zwischen beiden enthalten, so daß man durch Interferenz von zwei Lichtwellen den *Gangunterschied zwischen beiden durch Helligkeitsmessung ermitteln* kann. Das ist Basis der interferometrischen Messverfahren Holographie und Speckleinterferometrie. Man kann zur Bestimmung der Helligkeiten von I_r und I_o je einen Strahl abdunkeln und die Helligkeit des anderen messen, und danach eine Messung mit beiden, sich überlagernden Strahlen vornehmen. Dann erhält man durch Auflösen von **Gl. 5** sehr einfach die Anfangsphasenverschiebung $\theta = \varphi_o - \varphi_r$. Das ist

aber nicht praktikabel, so daß man die sogenannte Phasenschiebetechnik verwendet.

Problematisch bei dieser Vorgehensweise ist, daß $\arccos(x)$ nur Winkel im Bereich von $[0 \dots \pi]$ liefert, also größere Phasenwinkel in diesen Bereich gefaltet werden, **Bild 4**. Der Term $I_r + I_o$ ist die sogenannte Hintergrundintensität, die unabhängig von der Phasendifferenz ist und $2\sqrt{I_o I_r}$ ist der Kreuzkorrelationsterm der angibt, wieviel Phaseninformation im Helligkeitsmuster gespeichert wird. Man muß diesen Anteil maximieren, um sicherzustellen, daß im Helligkeitsmuster möglichst viel Phaseninformation vorhanden ist, indem man zunächst die mittleren Helligkeiten von Objekt- und Referenzstrahl abgleicht.

Für ein ganzes CCD-Array ist nicht nur die Größe der Speckles zufällig verteilt, sondern auch Phasenlage und Helligkeit, also $\overline{I_{res}}, \theta, I_o, I_r = f(x, y)$. Für eine computergestützte Auswertung ist es vorteilhaft, Speckles mit ihrer Kreuzkorrelation bzw. Modulation in der Verformungsberechnung zu gewichten, um zu verhindern, daß „kontrastarme“ Speckles zu starken Einfluß nehmen.

Bringt man nun eine Phasenverschiebung ein, indem man die optische Länge des Objektstrahls durch eine Bauteilverschiebung vergrößert, oder die Glasfaser in der der Referenzstrahl läuft bewegt, dann ist auf die Anfangsphasendifferenz zwischen beiden Strahlen die Phasenverschiebung vorzeichenrichtig aufzuaddieren. Allgemein gilt vor der Veränderung für die Intensität aus **Gl. 5**:

$$\overline{I_{res,y}} = I_r + I_o + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\theta_v) \quad \text{Gl. 6}$$

Und nach der Veränderung

$$\overline{I_{res,n}} = I_r + I_o + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\theta_n) \quad \text{Gl. 7}$$

Wenn man **Gl. 5** und **Gl. 6** jeweils nach ihren Phasen auflöst, erhält man die aus der Veränderung resultierende Phasendifferenz, unter der Voraussetzung, daß alle anderen Größen bekannt sind:

$$\Delta\phi = \theta_n - \theta_v, \quad \text{Gl. 8}$$

2.2.2 Phasenschiebetechnik

Um jeweils für einen Zustand vor oder nach der Verformung bei einem quasistatischen Belastungsfall die Phase zu berechnen, verwendet man heute die sogenannte Phasenschiebetechnik. Dabei gibt man eine bekannte Phasendifferenz für den Referenzstrahl vor und nimmt jeweils ein Intensitätsmuster ohne Veränderung des Objekts auf, **Gl. 9** bis **Gl.11**. Für eine eindeutige Lösung mit einfachen Gleichungen, die entsprechend hohe

Geschwindigkeiten bei der Bildverarbeitung erreichen, kann man sich drei äquidistante Phasenlagen ($-120^\circ, 0^\circ$ und 120°) vorgeben und erhält bei unverformtem Objekt ein lineares Gleichungssystem dritter Ordnung mit den drei Unbekannten I_r, I_o und der gesuchten Anfangsphasendifferenz θ :

$$I_1 = I_r + I_o + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\theta) \quad \text{Gl. 9}$$

$$I_2 = I_r + I_o + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \quad \text{Gl. 10}$$

$$I_3 = I_r + I_o + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) \quad \text{Gl. 11}$$

Daraus errechnet sich die Phasendifferenz zwischen beiden Strahlen zu

$$\theta = \arctan \frac{\sqrt{3}(I_3 - I_1)}{2I_1 - I_2 - I_3} \quad \text{Gl. 12}$$

Neben der zeitlichen Phasenschiebetechnik, bei der drei Bilder aufgenommen werden müssen, gibt es noch räumliche Phasenschiebetechniken, die aus einer einzigen Aufnahme die Phaseninformation erhalten, indem der eingekoppelte Referenzstrahl zum CCD verkippt wird, so daß je drei benachbarte Pixel 120° zum mittleren phasenverschoben sind, **Bild 5**.

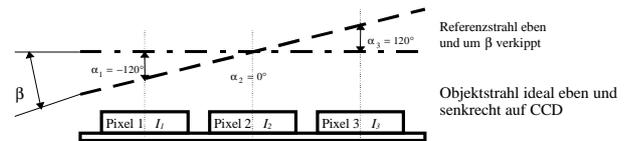


Bild 5: Räumlicher Phasenschieber

Eine Phasenberechnung nach dieser Methode führt ebenfalls zu einer Faltung der tatsächlich aufge-

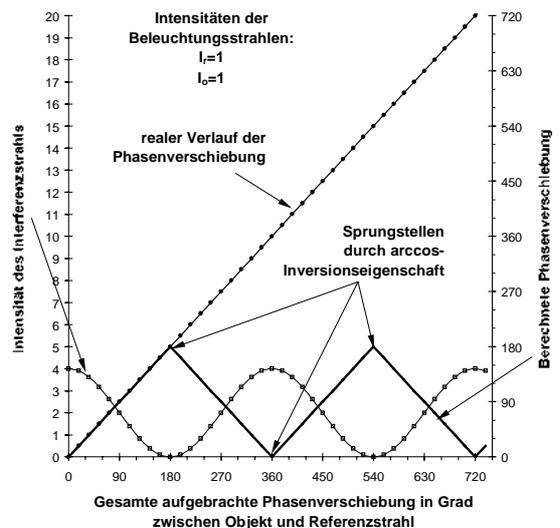


Bild 4: Resultierende Intensität bei unterschiedlicher Phase zwischen Objekt- und Referenzstrahl, Mehrdeutigkeit bei der Phasenberechnung

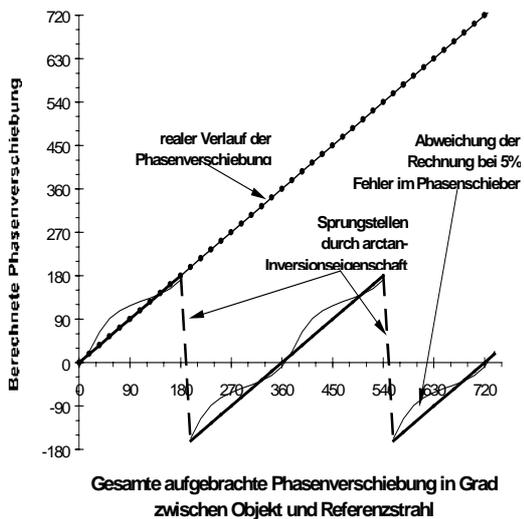


Bild 6: Phasenschiebetechnik mit drei Bildern und Doppeldeutigkeit bei der Phasenrückfaltung; Fehlereinfluß

brachten Phasendifferenz in den Bereich zwischen -180° und 180° ; an den Übergangsstellen treten hier aber Sprünge, **Bild 6** anstatt Knicke, **Bild 4** auf, die man leichter detektieren kann.

Um die Phasendifferenz aufgrund einer Bauteilverformung zu ermitteln, nimmt man drei Intensitätsbilder auf vor der Verformung und drei mit Phasenschiebetechnik nach der Verformung. Für jeden Zustand berechnet man die Phase und kann dann nach **Gl. 8** die verformungsbedingte Phasendifferenz $\Delta\phi$ durch einfache Subtraktion ermitteln.

3 Konstruktion eines Meßaufbaus

3.1 Vorgehensweise

Die Verformungsmessung an Bauteilen mit Speckleinterferometrie setzt sich grundsätzlich aus zwei voneinander relativ unabhängigen Teilproblemen zusammen:

a. Wie ist der Zusammenhang zwischen der gemessenen Helligkeitsveränderung und der Phasendifferenz. Die Phasenverschiebung entsteht bei der Verformungsmessung durch eine Veränderung der optischen Weglänge von Referenz- und/oder Objektstrahl.²

² Es ist auch denkbar, den optischen Weg durch eine Brechzahlveränderung einzubringen, ohne dabei eine örtliche Verschiebung der Komponenten im Lichtweg zu haben. Das wird z. B. verwendet, um den temperaturabhängigen oder konzentrationsabhängigen Brechungsindex von Lösungen und Flüssigkeiten zu ermitteln.

b. Wie ist der Zusammenhang zwischen der aus der Intensitätsmessung nach a. berechneten Phasendifferenz und der tatsächlichen Bauteilverformung? Dabei können je nach Versuchsaufbau Dehnungen, Neigungen, Rotationen und Verschiebungen getrennt oder in Kombination zu Phasenverschiebungen führen und gemessen werden.

Punkt a wurde bereits in 2.1 Speckleeffekt erläutert und stellt ein allgemeines Problem der Wellenmechanik dar und tritt bei Akustik, Optik und Elektrotechnik gleichermaßen auf. Dabei kann man unterscheiden in statische und dynamische Anwendungen, die immer zeitlich veränderliche Phasenbeziehungen von interferierenden Wellenzügen betrachten. Daraus leitet man entsprechende Methoden zur Erfassung der Grauwerte ab. Als Beispiele seien hier das Subtraktionsverfahren, Additionsverfahren und die Phasenschiebetechnik für statische Anwendungen, das Zeitmittelverfahren mit und ohne Phasenschiebetechnik und das Echtzeitsubtraktionsverfahren für harmonische Schwingungsanalysen bzw. das Doppelpulsverfahren mit räumlichen Phasenschieber als Verfahren für hochdynamische Stoßvorgänge erwähnt.

Punkt b ist ein Problem der Mechanik und Vektoralanalyse. Hierbei ist zu klären, welche Bauteilverformungen sich in Form einer Phasenänderung bemerkbar machen. Dadurch wird festgelegt, wie der Meßaufbau geometrisch definiert ist, also von wo beleuchtet, und von wo aufgenommen wird, ob man Verschiebungen senkrecht zum Bauteil oder in Bauteilebene messen will oder 3D-Verformungen.

Als letzter Schritt ist der eigentliche Meßaufbau festzulegen, je nachdem ob man Gradienten oder absolute Verformungen ermitteln will.

Bei der Shearographie wird z. B. durch die Optik ein Doppelbild des Bauteils erzeugt, **Bild 17**, so daß der Referenzstrahl keine ebene Welle, sondern ein verschobenes Bild des Objekts ist, und man die Verformungen jeweils zwischen zwei Objektpunkten mißt. Je nach Verscherungs- und Beleuchtungsrichtung kann man Neigungsänderungen der Oberfläche oder Dehnungen in der Ebene in verschiedene Richtungen, bei Bedarf sogar in radialer oder tangentialer Richtung aufnehmen, aber auch 3D-Gradienten.

3.2 Allgemeiner Ansatz zur Berechnung der Weglängenänderung

Um den Zusammenhang zwischen der Phasendifferenz, die mit Hilfe der Intensitätsmuster ermittelt wurde, und der tatsächlichen Verformung des

Bauteils herzustellen, sind die Meßaufbauten zu betrachten. Geht man näherungsweise davon aus, daß die Beleuchtungsquelle L eine Kugelwelle abstrahlt, der Beobachter B sich in einem diskreten Punkt befindet und vernachlässigt die Abbildungseigenschaften des Kameraobjektivs, dann kann man die Weglänge eines Strahls, jeweils vor und nach einer Verformung des Bauteils berechnen, **Bild 7**. Der gesuchte Zusammenhang zwischen der Verformung d und der Differenz des Wegunterschiedes Δs , der linear mit der gesuchten Phasenänderung $\Delta\phi$ zusammenhängt:

$$\frac{\Delta s}{\lambda} = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \quad \text{Gl. 13}$$

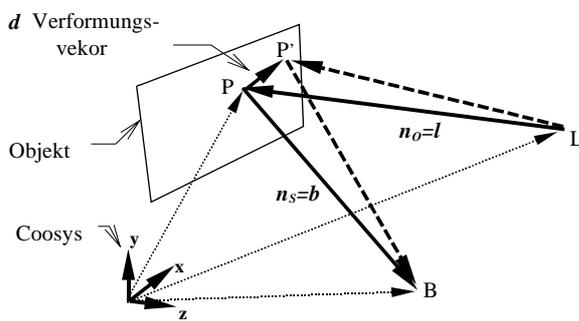


Bild 7: Weglängenänderung eines Lichtstrahls vom Laser zum Sensor

Für einen Lichtstrahl von L über den unverschobenen Objektpunkt P nach B erhält man dann für die Anfangsweglänge aus den Ortsvektoren:

$$s = |\vec{P} - \vec{L}| + |\vec{B} - \vec{P}| \quad \text{Gl. 14}$$

und nachdem P um den Verformungsvektor \vec{d} verschoben wurde:

$$s' = |\vec{P}' - \vec{L}| + |\vec{B} - \vec{P}'| = |\vec{P} + \vec{d} - \vec{L}| + |\vec{B} - (\vec{P} + \vec{d})| \quad \text{Gl. 15}$$

Wenn man zur Vereinfachung $\vec{l} = \vec{P} - \vec{L}$ als Beleuchtungsvektor und $\vec{b} = \vec{P} - \vec{B}$ als Beobachtungsvektor zur Rechnung einsetzt, erhält man für die Wegänderung:

$$\begin{aligned} \Delta s &= s' - s \\ &= \sqrt{(l_x + d_x)^2 + (l_y + d_y)^2 + (l_z + d_z)^2} \\ &\quad + \sqrt{(b_x + d_x)^2 + (b_y + d_y)^2 + (b_z + d_z)^2} \\ &\quad - \sqrt{l_x^2 + l_y^2 + l_z^2} - \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2} \end{aligned} \quad \text{Gl. 16}$$

für kleine $|\vec{d}|$ läßt sich Δs als eine mehrdimensionale Taylor-Reihe um den Entwicklungspunkt $\vec{d}_0 = (d_{x_0} \ d_{y_0} \ d_{z_0})^T = \vec{0}$ schreiben, und es ergibt sich nach einigen Umformungen:

$$\Delta s = 0 + \left(\frac{l_x}{|\vec{l}|} + \frac{b_x}{|\vec{b}|} \right) dx + \left(\frac{l_y}{|\vec{l}|} + \frac{b_y}{|\vec{b}|} \right) dy + \left(\frac{l_z}{|\vec{l}|} + \frac{b_z}{|\vec{b}|} \right) dz \quad \text{Gl. 17}$$

oder wieder in Vektorschreibweise transformiert:

$$\Delta s = (\vec{l}_0 + \vec{b}_0) \cdot \vec{d} \quad \text{Gl. 18}$$

In obiger Gleichung ist \vec{l}_0 der normierte Beleuchtungsvektor und \vec{b}_0 der normierte Beobachtungsvektor, der Term $\vec{s} = (\vec{l}_0 + \vec{b}_0)$ wird Sensitivitätsvektor genannt, da die Wegänderung \vec{d} durch das Skalarprodukt auf ihn projiziert und in seine Richtung gemessen wird. \vec{l}_0 und \vec{b}_0 sind zwar für einen Punkt konstant, wenn er sich nur gering verformt (Forderung für die Taylor-Reihe), aber immer noch für jeden Objektpunkt von der Bauteiloberfläche abhängig. Erst bei der Annahme, daß man von der Ferne aus beleuchtet und beobachtet, darf man ebene Wellenfronten voraussetzen und aus dem Meßaufbau *einen* Sensitivitätsvektor für alle Bauteilpunkte annehmen. Ansonsten muß man diese Abweichung rechnerisch korrigieren.

Für eine Deformationsmessung im Statischen bestimmt man z.B. nach der Phasenschiebemethode die verformungsbedingte Phasendifferenz $\Delta\phi$ durch einfache Subtraktion nach **Gl. 8** und rechnet diese dann entsprechend **Gl. 13** in eine optische Weglängenänderung Δs um. Aus dieser kann man dann nach **Gl. 18** bei einem ESPI-System die Bauteilverformung \vec{d} ermitteln.

4 Systemkomponenten

Grundsätzlich ist der Gesamtaufbau steif zu gestalten, und Temperaturdehnungen oder Luftströmungen zu vermeiden, durch die Drift oder ein instabiles Speckleinterferenzmuster erzeugt wird. Eine Schwingungsisolation ist bei ESPI-Systemen notwendig, während Shearographiesysteme weniger sensibel gegenüber Starrkörperbewegungen sind, da sie Verformungsgradienten messen.

4.1 Kameras

Ein Speckle-Meßsystem muß in der Lage sein, die entstehenden Speckles aufzulösen, weshalb immer eine variable Blende im Kameraobjektiv eingebaut sein muß, um die Specklegröße entsprechend anpassen zu können. Wenn man eine handelsübliche Schwarzweißkamera (1/3" CCD mit 4,8x3,6mm² Fläche und einer Auflösung von 753x582 Pixel einschließlich 25mm Objektiv 1:2) verwendet, und auf ein Pixel etwa ein Speckle abgebildet werden soll, ergibt sich eine Blendenzahl von 4, damit die Speckles noch groß genug sind um von der Kame-

ra aufgelöst zu werden. Damit gehen ca. 75% Licht zu voll geöffneter Blende verloren, was ein großer-Nachteil des Verfahrens ist. Entscheidend für eine exakte Messung ist der lineare Zusammenhang zwischen Grauwert und Ausgangsspannung, so daß immer eingebaute AGC-Filter³ abgeschaltet werden müssen.

4.2 Framegrabberkarten

Mit einer schnellen Bilderfassungskarte werden die Specklemuster in Echtzeit digitalisiert und entweder direkt auf dem Board oder im Rechner online verrechnet. Je nach Komplexität des Aufbaus und des eingesetzten Rechenalgorithmus muß man derzeit von Bildwiederholraten von 2/s bis 0,1/s ausgehen. Durch eine höhere Graustufenzahl, (Standard: 256), wird die Meßempfindlichkeit verbessert, jedoch darf man dabei nicht die Genauigkeit des Phasenschiebers und die Linearität der Kamera außer acht lassen, **Bild 6**. Einige Boards haben einen Overlaypuffer, mit dem ein bei normaler Raumbelichtung aufgenommenes Bauteil dem Streifenmuster zur Anschaulichkeit überlagert wird.

4.3 Optik

Die verwendeten optischen Bauteile müssen im allgemeinen keine allzu hohen Anforderungen erfüllen, es ist aber auf eine sehr gute Entspiegelung zu achten, weil sonst Mehrfachinterferenzen im System auftreten, die zu einer räumlichen Modulation der Wellenfronten führen und den Kontrast der Speckles auf dem CCD-Sensor so stark senken können, daß der Meßaufbau unbrauchbar wird. Bei ESPI-Systemen mit Referenzstrahleinkoppelung zwischen Abbildungsoptik und CCD-Sensor hat man meist das Problem, daß dort der Abstand bei Verwendung eines Standardobjektivs zu klein ist, um dort einen Strahlteiler zu positionieren. Man kann aber auf kurzbrennweitige Kleinbildkameraobjektive ausweichen oder eine Retrofokuskonstruktion vornehmen. Als Spiegel kommen ausschließlich Oberflächenspiegel in Betracht, da herkömmliche zu Doppelreflexionen und starken Interferenzstreifen führen, Strahlteiler sollten auf der Rückseite entspiegelt, oder leicht keilförmig geschliffen sein. Zur Strahllenkung haben sich in ESPI-Systemen Monomode-Glasfasern als günstig erwiesen, die auf die Laserwellenlänge abgestimmt gleichzeitig auch einen hervorragenden Filtereffekt zur Verbesserung der Strahlqualität bieten.

³ AGC- „automatic gain control“, Kontrast und Helligkeitsverbesserung dunkler Bildbereiche

Zum Aufweiten des Lasers verwendet man je nach Durchmesser von Strahl und Objekt kostengünstige Mikroskopobjektive oder spezielle Optiken.

4.3.1 Laser

Als Laser kommen nur Monomodesysteme (TEM_{00} ⁴) unterschiedlicher Type mit oder ohne Polarisierung in Betracht. Entscheidend sind dabei einerseits die auszuleuchtende Fläche, die Frage nach dynamischer oder statischer Last und der eigentliche Meßaufbau. Dadurch werden Leistung, Betriebsart, Wellenlänge und Kohärenzlänge festgelegt. Man kann dabei Diodenlasersysteme, gepulst oder un gepulst, Festkörperlaser oder Gaslaser verwenden. Die Preisspanne liegt dabei zwischen 2500 DM für einen handlichen 25 mW Diodenlaser mit ca. 2 m Kohärenzlänge, der für eine Ausleuchtung von ca. 15x20 cm im Statischen geeignet ist, bis zu 1 W Festkörperlasern (NdYag) mit Kohärenzlängen im Bereich einiger Zentimeter für stroboskopische Anregung bis mehrere Tausend Hertz für ca. 80000DM. Es können auch Rubin-Riesenimpuls laser für die Holographie eingesetzt werden, die den Schwingungszustand durch einen Kurzzeitblitz von wenigen Nanosekunden einfrieren.

4.3.2 Phasenschieber und Steuerelektronik

Durch Verwendung eines Phasenschiebers ist es möglich, nicht nur Streifenbilder, sondern für jeden Bildpunkt den exakten Verformungswert zu erhalten. Je nach Phasenschiebetechnik sind verschiedene Ausführungen möglich, man verwendet aber meist den mechanischen Phasenschieber, bei dem unterschiedliche Wegdifferenzen in den Referenzstrahl eingebracht werden. Dazu wird an einen Piezokristall vom BV-Rechner über eine DA-Wandlerkarte und eine Regeleinheit ein definierter Spannungswert ausgegeben, der dann eine bestimmte Verschiebung hervorruft. Diese wird dazu verwendet, die optische Weglänge zu variieren, indem man z. B. einen Spiegel im Strahlengang des Referenzstrahls, die Glasfaserhalterung, eine Plan- oder Keilplatte verschiebt. Als weiterer Phasenschieber ist auch LCD-System denkbar, das den Kerr-Effekt ausnutzt.

Die Steuerelektronik wird bei dynamischen Vorgängen gebraucht, um aus dem Schwingungsmuster ein Triggersignal abzuleiten, mit dem der Laser, ein

⁴ TEM_{00} „transversal emission mode“, charakterisiert die Helligkeitsverteilung im Strahlprofil als radial-symmetrisch und Gaussförmig

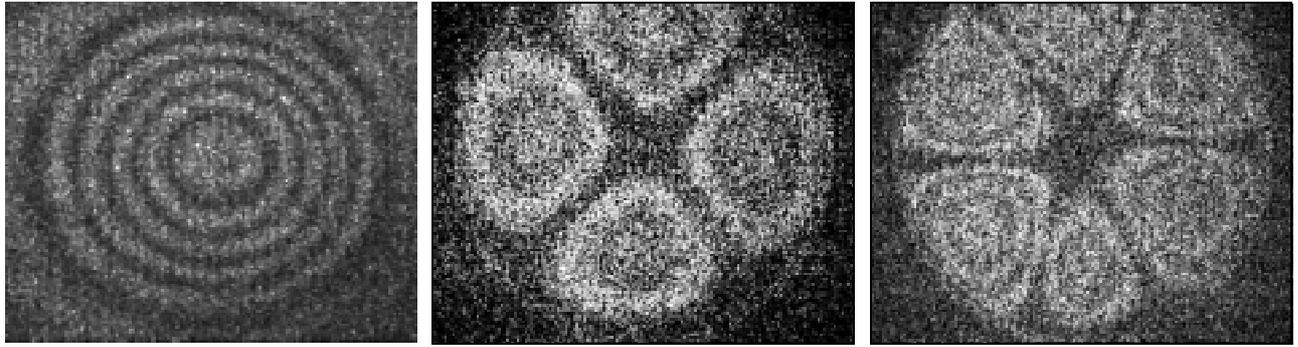


Bild 8: Statische OOP-Verformung Kreisscheibe

Bild 9: OOP-Schwingung der Scheibe bei 2400Hz

Bild 10: OOP-Schwingung der Kreisscheibe bei 3320Hz

akusto-optischer Modulator und die Bilderfassung kontrolliert werden.

5 Durchgeführte Messungen

Am IMW wurden eine Studie zum Aufbau eines Speckleinterferometers mit möglichst geringen Kosten erstellt und die Praxistauglichkeit durch dynamische Out-Of-Plane-Messungen (OOP) bewiesen. Dazu wurde an Scheibenstrukturen mit harmonischer Anregung in Bauteilebene mit dem Echtzeitsubtraktionsverfahren und 180° Phasenschiebung Schwingungsmessungen vorgenommen und ausgewertet, **Bild 11** bis **Bild 14**. Für die Studie wurden Objekte mit unterschiedlichen Verfahren vermessen:

Eine Kreisscheibe (Dicke 1 mm, \varnothing 1000 mm) wurde radial fest eingespannt und in ihrem Mittelpunkt zentrisch durch eine Einzelkraft belastet, **Bild 8**. Es wurde das Subtraktionsverfahren angewendet, bei dem die Specklemuster ohne Berechnung der Phasenbeziehung als Intensitätsmuster vor und nach der Verformung subtrahiert werden. Es leuchtet ein, daß an Stellen, an denen die Verformung 0 oder ganze Vielfache der halben Wellenlänge ist, schwarze Streifen entstehen müssen, denn der Meßaufbau ist entsprechend **Bild 2** und **Bild 3** für die OOP-Verformung empfindlich. Der Abstand zwischen zwei dunklen Streifen entspricht einer Phasenänderung von 2π und der Zusammenhang

zwischen Phasenänderung und Bauteilverschiebung ist $\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} d_z$. Die Bauteilverschiebung ist dann $d_z = \lambda/2$ und bei einem 690 nm-Laser ca. $0,35 \mu\text{m}$.

Bild 9 und **Bild 10** zeigen die gleiche Scheibe bei hamonischer Anregung mit dem Echtzeit-Subtraktionsverfahren aufgenommen. Es ist zu erkennen, daß durch eine Erhöhung der Frequenz ein weiterer Schwingungsbauch entsteht, und die Schwingungsknoten, die als schwarze Linien auftreten, symmetrisch ausgebildet sind. Bei der Streifenberechnung wurde ein Bild der Platte in Ruhe von einem zeitlich über mehrere Plattenschwingungen gemittelten Grauwertbild subtrahiert, so daß der Kontrast mit steigender Streifenordnung nach einer Besselfunktion relativ stark sinkt, während er im statischen Fall, **Bild 8** für alle Ordnungen konstant ist.

Die gleiche Scheibe wurde zusätzlich mit einem shearographischen Aufbau vermessen, **Bild 16** bis **Bild 18**, der nicht Linien gleicher OOP-Deformation, sondern Linien gleicher Oberflächenneigungsänderung anzeigt.

Beim Shearographieaufbau wird das Bauteil direkt beleuchtet, und erst danach ein Doppelbild erzeugt (z.B. mit Strahlteiler und zwei Spiegeln, Glaskeilen, gegeneinander verschobenen Halblinsen, geneigte

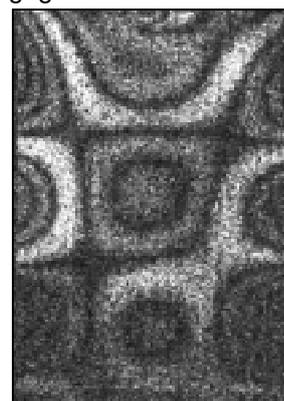
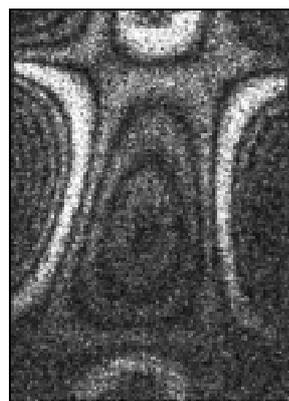


Bild 11: OOP 900 Hz

Bild 12: OOP-1000Hz

Bild 13: OOP-2100Hz

Bild 14: OOP-3000Hz

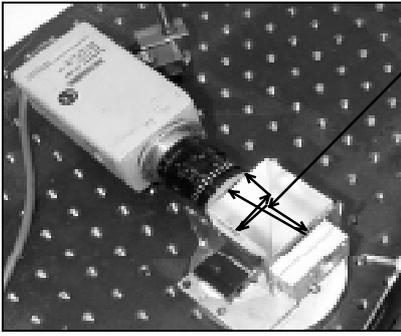


Bild 16: Shearographischer Aufbau mit Strahlführung über Strahlteilerwürfel



Bild 17: Durch Strahlteilerwürfel „verschertes“ Doppelbild der Kreisscheibe

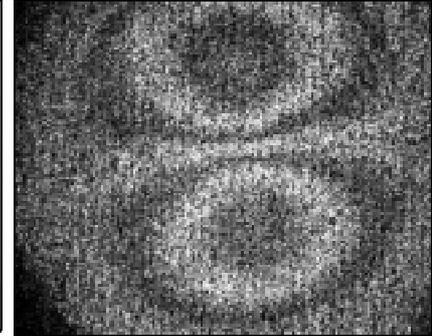


Bild 18: Shearographieaufnahme der zentrisch belasteten Kreisscheibe

Glasplatten), so daß als Referenz das verschobene Objekt dient und die Verformungen als Gradienten ausgegeben werden. Je nach Verscherungsdistanz erhält man unterschiedliche Empfindlichkeiten. Dieses Verfahren ist relativ unabhängig von Starrkörperverschiebungen und deshalb hervorragend für den Feldeinsatz geeignet. Es wird im wesentlichen zur Fehlerdetektion z.B. bei Reifen oder Laminaten verwendet, wo es weniger auf exakte Ergebnisse sondern auf Robustheit und Zuverlässigkeit ankommt.

6 Konzept eines Interferometers

Anhand der Erfahrungen aus den Messungen wurde ein mögliches Konzept eines ESPI-Systems für die zu erwartenden Anforderungen anhand der bereits vorhandenen Komponenten erstellt, **Bild 15**. Damit sollen 3D und OOP-Verformungen sowie In-Plane Verschiebungen mit Phasenschiebetechnik durch relativ einfachen Geräteumbau gemessen werden.

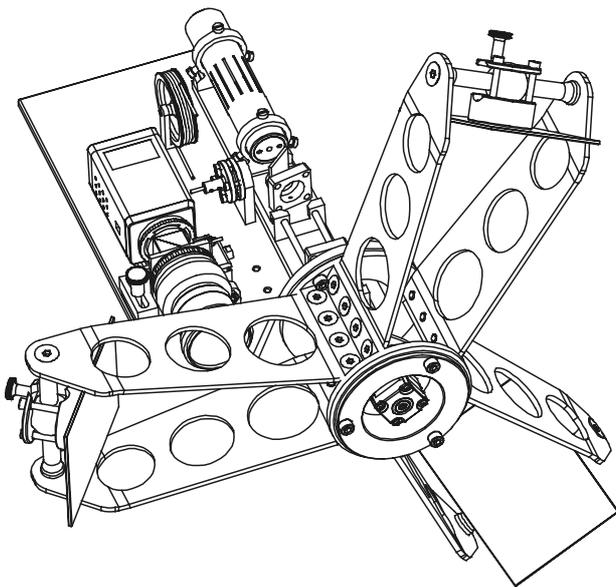


Bild 15: Konzept des Speckle-Interferometers

7 Zusammenfassung

Die Speckleinterferometrie ist ein hochempfindliches Werkzeug zur Messung von Bauteilverformungen oder Gradienten bei statischen und dynamischen Belastungsfällen. Durch die Phasenschiebetechnik wird die Auswertung vollständig automatisiert. Von Vorteil ist die hohe Empfindlichkeit und Variabilität, nachteilig die teilweise hohen Kosten für Laser und die Forderung nach rauen Oberflächen ohne Textur. Bei ESPI-Systemen ist oft auch ein schwingungsisolierter Tisch notwendig, während Shearographiesysteme aufgrund der Messung von Verformungsgradienten für den Praxiseinsatz besser geeignet sind. Bei fallendem Preis für ausreichende Laserleistung wird die relativ junge Speckleinterferometrie weiter in den Bereich der zerstörungsfreien Bauteilprüfung und Qualitätssicherung vordringen.

8 Literatur

- /1/ Jones, R.; Wykes, C.: Holographic and Speckle Interferometry, Cambridge University Press, Cambridge 1983'
- /2/ Steinchen, W.; Yang, L.X.; Schuth, M.; Kupfer, G.: Dehnungsmessung mit digitaler Shearographie, tm-Technisches Messen 62, S. 337-341, Oldenbourg-Verlag 1995
- /3/ Creath, K.: Phase-shifting speckle interferometry, Applied Optics 24, S. 3053-3058, 1985
- /4/ Hung, Y.Y.: Shearography: A new optical Method for strain measurement and Nondestructive Testing, Optical Engineering 21, S. 391-395, 1982
- /5/ Käferstein, B.: Studienarbeit, Aufbau und Entwicklung eines optischen Ganzfeldmeßverfahrens auf der Grundlage der Electronic-Speckle-Pattern Interferometry, Clausthal 1998

Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 1)

Garzke, M.; Henschel, J.; Schäfer, G.

Zur Untersuchung von Bauteilen und Maschinenelementen bei statischer und dynamischer Belastung sowie unter tribologischen Gesichtspunkten existieren am Institut für Maschinenwesen zahlreiche selbstkonstruierte und in Eigenfertigung hergestellte Prüfstände.

At the Institute of Mechanical Engineering several test machines are in use where investigations of machine elements under static and dynamic loads and tribological views are carried out.

1 Hydropuls- und statische Torsionsprüfstände

Zur Bestimmung des Torsionsschwingfestigkeitsverhaltens von Maschinenelementen wird am IMW ein servohydraulischer Torsionsschwingprüfstand genutzt, **Bild 1**. Ursprünglich für Dauerfestigkeitsuntersuchungen an Zahnwellen-Verbindungen konstruiert, wurden auf diesem Prüfstand zwischenzeitlich auch verschiedene andere Bauteile erfolgreich dynamisch geprüft, z.B. Drehmomentmeßwellen und gebaute Nockenwellen.



Bild 1: Torsionsschwingprüfstand

Das Drehmoment wird durch eine servohydraulische Stelleinheit (Hydroschwinger) erzeugt. Durch Vorgabe eines elektrischen Stellsignals (Sollsignal) an zwei gegenseitig geschaltete Servoventile wird die durch eine externe Hydraulikpumpe erzeugte hydraulische Energie über den Ventilblock in zwei Druckkammern innerhalb des Schwingers geleitet. Der Druck wirkt auf zwei auf der Antriebswelle befestigte Flügel, die infolge

Druck und Ölvolumenstrom gegenüber dem Schwingergehäuse in Bewegung gesetzt werden. Der Prüfstand kann ein maximales Torsionsmoment von 2000 Nm aufbringen, die Erzeugung einer überlagerten Biegebelastung ist nicht möglich. Um die Versagensursachen „Verschleiß“ und „Bruch“ wirksam voneinander trennen zu können, verfügt der Prüfstand zur Vermeidung von Biegung, Querkraft und Fluchtungsfehlern über eingebaute Membrankupplungspaare der Fa. BHS-Cincinnati /1/. Die doppelt angeordneten Membrankupplungen sind extrem torsionsteif und biegeweich, wodurch die infolge Fertigungsabweichungen und die selbst bei hoher Ausrichtungspräzision der Prüfstandsteile und der Prüflinge entstehenden Fluchtungsfehler wirksam vermieden werden können, **Bild 2**.

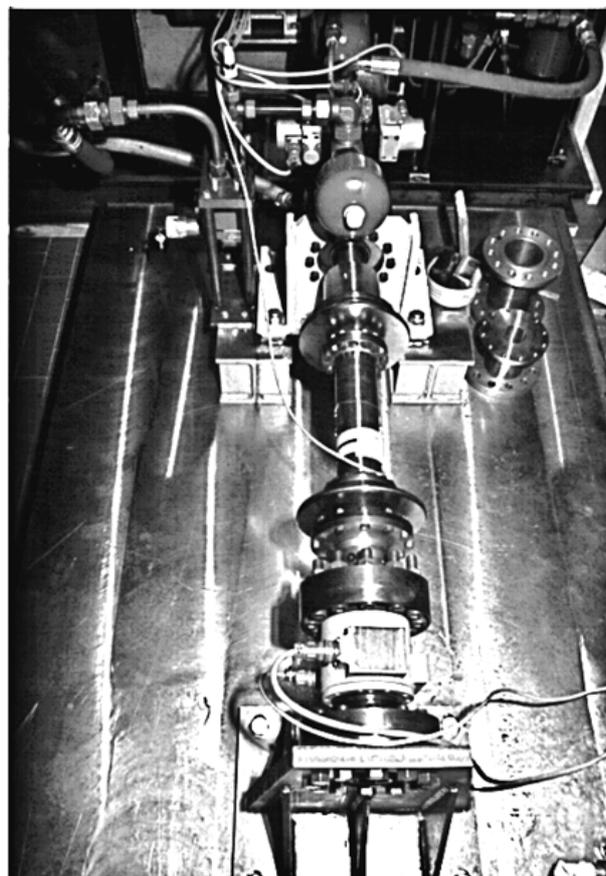


Bild 2: Hydroschwinger mit Membrankupplungen im Antriebsstrang

Die Nabenhalterung besitzt einen Anschluß zur Ölschmierung und Kühlung der zu testenden Zahnwellen-Verbindungen. Durch diese beiden Maßnahmen konnte an den geprüften Zahnwellen-

Verbindungen kein Verschleiß festgestellt werden, alle Verbindungen versagten infolge Dauerbruch. Die Belastungsaufgabe wird über einen externen Frequenzgenerator vorgenommen, die Überwachung des Verdrehbereiches erfolgt über einen eingebauten Winkelaufnehmer. Wird der zulässige Verdrehbereich überschritten, schaltet die angeschlossene SPS den Prüfbetrieb ab. Die Meßwertfassung (Sollsignal, Drehmoment, Verdrehwinkel) geschieht durch einen PC.

Neben Lebensdaueruntersuchungen lautet oftmals die gestellte Prüfaufgabe die Ermittlung des maximal übertragbaren statischen Torsionsmomentes oder die Bestimmung des Verdrehwinkels bei einer vorgegebenen Belastung. Für derartige Untersuchungen wird der in **Bild 3** dargestellte Verspannkasten genutzt.

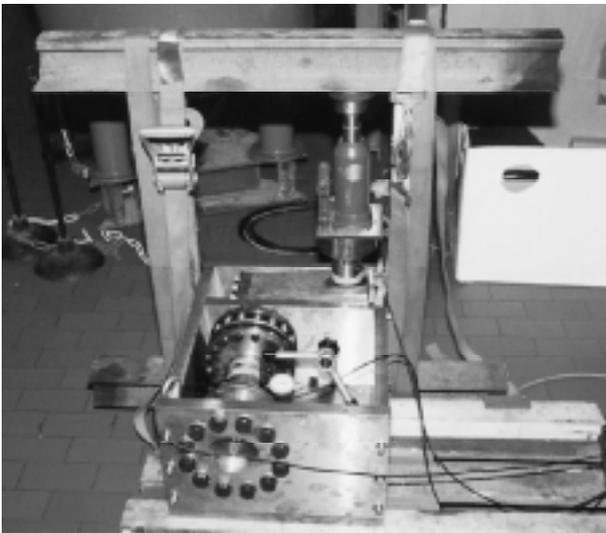


Bild 3: Prüfstand für statische Torsionsuntersuchungen (Verspannkasten)

Die Lastaufgabe auf den Hebel mit angeschlossener Kraftmeßdose kann wahlweise über eine zu verspannende Rahmenkonstruktion oder eine Zugspindel erfolgen. Letztere findet dann ihre Anwendung, wenn die zu untersuchenden Bauteile sehr torsionssteif sind, so daß die Auswertung der lastabhängigen Verdrehwinkel auf der institutseigenen Koordinatenmeßmaschine erfolgen muß. Aufgrund der massiven Kastenbauweise ist der Einfluß der Verspannkastensteifigkeit auf das Meßergebnis äußerst gering. Im Rahmen eines von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) geförderten Forschungsvorhabens wurde mit diesem Prüfstand das Bruchmoment und die Verdrehwinkelsteifigkeit der o.g. Doppel-Membran-kupplungen ermittelt. Die aufzubringenden Torsionsmomente betragen dabei mehr als 15000 Nm.

Für Prüfaufgaben, bei denen vordergründig die Bestimmung des maximal übertragbaren Torsionsmomentes im Mittelpunkt steht, genügt der Einsatz einer handelsüblichen Meßuhr zur Registrierung des Beginns der teilplastischen Bauteilbeanspruchung bzw. des Bruchs oder Durchrutschens der Verbindung bzw. des Bauteils. **Bild 4** zeigt die Prüfanordnung einer im Rahmen einer Industriekooperation untersuchten Längsstift-Verbindung /2/. Dabei erwiesen sich die verwendeten Längsstifte trotz ihrer geringen Größe im Vergleich zum Wellendurchmesser ($d_s/d_w=0,125$) als äußerst tragfähig, der Ausfall der Verbindung trat durch Bruch der Nabe ein.

Trotz der kompakten Bauweise des Verspannkastens können auch größere Bauteile eingehend untersucht werden, die für die Aufnahme der jeweiligen Prüfobjekte notwendigen Anschlußflansche werden dabei entsprechend gefertigt.

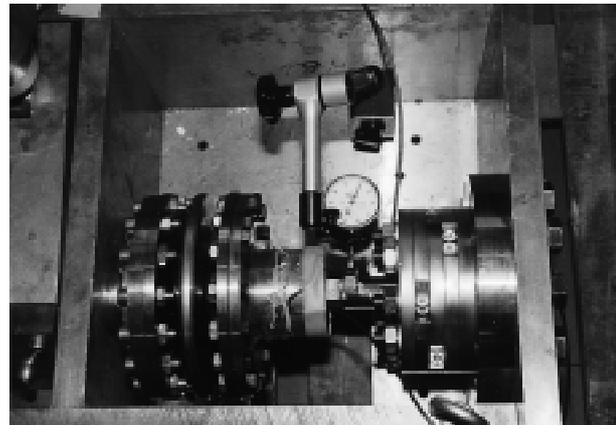


Bild 4: Detailansicht des Verspannkastens mit eingesetzter Meßuhr zur Bestimmung der Deformation

2 Verspannungsprüfstände

Neben Untersuchungen mit reiner Torsionsbelastung ist die experimentelle Erprobung von Maschinenteilen unter kombinierten Belastungen aus Drehmoment, Biegemoment, Querkraft und Axialkraft auf zwei Verspannprüfständen und einem Exzenterprüfstand möglich. Die Prüfstände decken den gesamten Leistungsbereich bis maximal 315 kW umlaufende Leistung ab. Die Prüfstandssteuerung und Meßwertfassung erfolgt mittels speicherprogrammierbarer Steuerungen (SPS) und übergeordneten Meßwertrechnern. Ein typischer Anwendungsfall ist die experimentelle Ermittlung des Verschleißverhaltens von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen, das einen weiteren Forschungs- und Arbeitsschwerpunkt am IMW darstellt. In meh-

renen Projekten, die von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) gefördert wurden, sind umfangreiche Untersuchungen zum Einfluß von Werkstoff, Verzahnungsqualität, Schmierungsverhältnissen, Axialbewegungen und Zentriereigenschaften auf das Verschleißverhalten dieser formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen durchgeführt worden. Charakteristisch war bei diesen Untersuchungen stets die Belastungskombination aus Drehmoment und Querkraft, die auf diese Steckverzahnung einwirkte. Realisiert wurde diese Belastungsart auf zwei verschiedene Möglichkeiten, die zu folgenden zwei Prüfstandskonzepten führten.

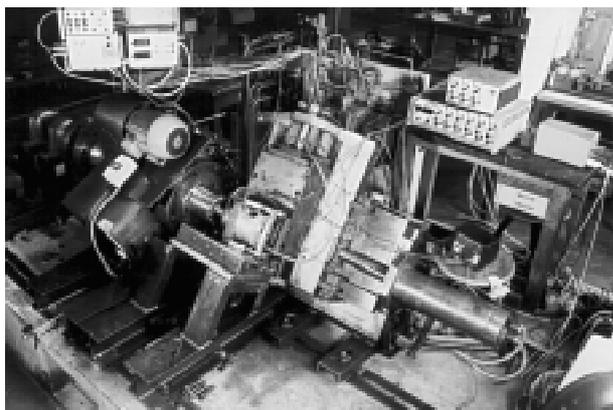


Bild 5: Exzenterprüfstand

Als erstes wurde das Exzenterkonzept in einem entsprechenden Prüfstand (**Bild 5**) realisiert. Dieser Prüfstand erreicht eine Umdrehungszahl von bis zu 760 U/min bei einer Drehmomentbelastung von bis zu 7500 Nm. Das Drehmoment wird über einen Hebelarm von austauschbaren Krafterelementen erzeugt. Für die Erzeugung statischer und quasistatischer Drehmomente werden geregelte Spindelhubgetriebe als Krafterelemente eingesetzt. Sie sind ebenso geeignet zur Mittellastaufbringung. Über Kurbeltriebe werden die dynamischen Drehmomentbelastungsanteile realisiert. Durch diesen modularen Aufbau der Krafterelemente können sämtliche Drehmomentbelastungen im Bereich von ± 7500 Nm statisch, schwellend oder wechselnd aufgebracht werden. Die unter Betriebsbedingungen einwirkende Querkraft wird über eine exzentrische Auslenkung des Antriebsstranges erreicht, die Querkraft bewegt sich relativ gesehen um die Achse des Prüfteils. Üblicherweise ist die Querkraft ortsfest und das Prüfteil rotiert darunter. Der wesentliche Vorteil dieser Umkehrung der Bewegungspartner ist die erheblich vereinfachte Anbringung der Meßsensorik am Prüfteil, da dieses nicht rotiert, sondern nur begrenzte translatorische Bewegungen in den drei Raumachsen ausführt.

Neben der mechanischen Belastungsaufbringung ist auch die Simulation erhöhter Umgebungstemperatur bis ca. 120°C im Prüflingsbereich realisiert worden. Weitere Umweltsimulationen, wie z.B. Feuchte-Wärme oder Salznebel, sind durch den "stehenden" Prüfling, der einfach abzudichten ist, leicht realisierbar.

Das zweite Prüfstandskonzept beruht auf einer mechanisch/hydraulischen Torsionsverspannung eines geschlossenen Antriebsstranges. Diese Prüfstandskonzeption ist auch als Verspannprüfstand bekannt. Das Institut für Maschinenwesen besitzt zwei solcher Verspannprüfstände, die sich in ihren Leistungsdaten unterscheiden (**Bilder 6 und 7**).

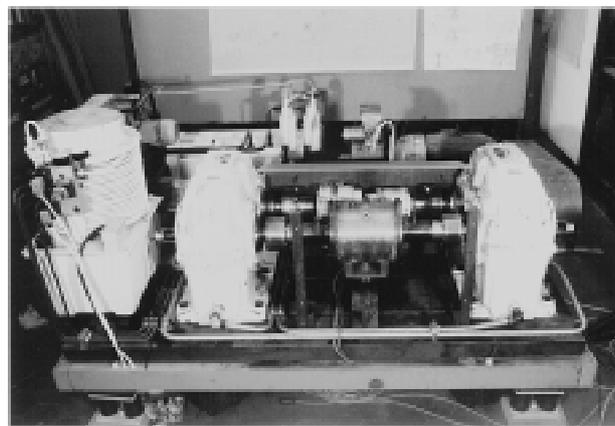


Bild 6: Verspannprüfstand I (210 kW)

Der erste ist in **Bild 6** dargestellt, er hat eine umlaufende Leistung von bis zu 210 kW bei einer Drehzahl im Prüfwellenstrang von 2000 U/min und einem Drehmoment von 1000 Nm. Der Prüfwellenstrang ist der vordere Wellenstrang in **Bild 6**. In dem dahinterliegenden Wellenstrang befindet sich der hydraulische Verspannmotor mit der dazugehörigen hydraulischen Drehdurchführung der Firma GLYCO Antriebstechnik. Für den Schutz der Verspanneinrichtung vor Biegebelastungen sind zusätzlich zwei Membrankupplungen /1/ im hinteren Wellenstrang integriert. Das Hydraulikaggregat für die Verspanneinrichtung ist zur Erzeugung statischer und quasistatischer Drehmomente ausgelegt. Neben der Drehmomentbelastung wird auf diesem Prüfstand eine Radialverschiebung oder Querkraft über ein Spindelhubgetriebe mit angeschlossener Hebelkonstruktion auf den Prüfwellenstrang geregelt aufgebracht. Die mittig im Vordergrund erkennbare Trommel dient zur Simulation unterschiedlicher Schmierzustände an Welle-Nabe-Verbindungen.

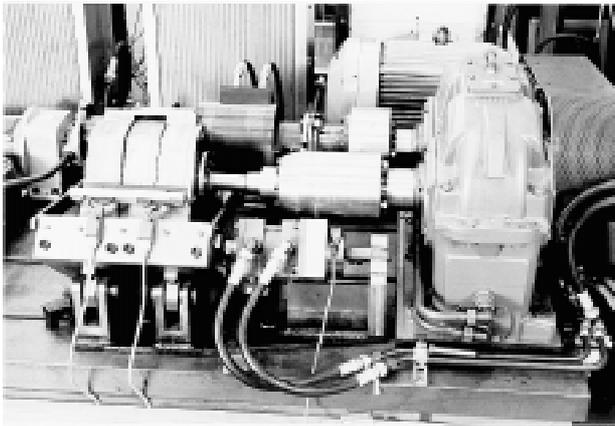


Bild 7: Verspannprüfstand II (315 kW)

Der zweite Verspannprüfstand (**Bild 7**) besitzt eine leistungsfähigere Verspanneinheit. Die maximale Umlaufende Leistung beträgt 315 kW bei einer Drehzahl im Prüfwellenstrang von 2000 U/min und einem Drehmoment von 1500 Nm. Die Verspanneinheit erlaubt in Verbindung mit der vergrößerten Hydraulikversorgung und einer Servo-Ansteuerung neben der erhöhten Belastung auch den Betrieb mit schwelenden Drehmomenten. Wechselmomente sind wegen der eingesetzten Zahnradgetriebe nicht möglich. Die Querkraftaufbringung und Radialverschiebung erfolgt bei diesem Prüfstand hydraulisch. In **Bild 7** ist etwas unterhalb der Bildmitte ein weiterer Hydraulikzylinder zu erkennen, der für die Axialverschiebung im Prüfwellenstrang eingesetzt wird. Auf diese Weise können die bei Kardanwellen und Schieberädern funktionsbedingten Axialverschiebungen innerhalb der Welle-Nabe-Verbindung simuliert werden.

Mit Hilfe dieser Prüfstandsausstattung ist das IMW in der Lage, vielfältige Bauteiluntersuchungen an allen üblichen Bauteilen der Antriebstechnik durchzuführen. In Verbindung mit dem ebenfalls vorhandenen Berechnungs-Knowhow, daß in diesem Heft in weiteren Artikeln dargestellt wird, ist hier eine umfassende Lösungsplattform für antriebstechnische Probleme vorhanden.

3 Prüfstand zur Messung des Querelastizitätsmodul von Drahtseilen

Durch die Entwicklungen neuer Verseilungsarten (verdichtete Litzen; **Bild 8**) hat sich das Steifigkeitsverhalten von Drahtseilen entscheidend verändert. Insbesondere im Hinblick auf die Belastungen von Trommelkörpern, welche mit Drahtseilen dieser Bauart bewickelt werden, erhöhen sich die Beanspruchungen bei gleicher Stranglast.

In den einschlägigen Normen (DIN 1073; DIN 51201; VDI 2358) werden jedoch lediglich Meßvorschriften für die Ermittlung der Längselastizitätsmoduln von Drahtseilen gegeben. In einer Reihe von Dimensionierungen und Bauteilbeanspruchungsanalysen wurde jedoch auf der Basis von Dietz, Bechtloft /3,5/ und durch weiterführende Arbeiten am IMW der unmittelbare Zusammenhang zwischen Querelastizitätsmodul E_{SQ} und den auftretenden Trommelbelastungen nachgewiesen.

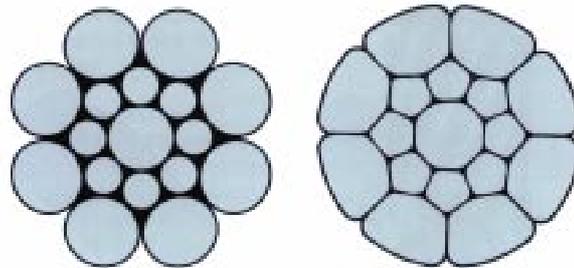


Bild 8: Standardverseilung / verdichtete Litzen

Mit dem Bau eines Prüfstandes wurde das Ziel verfolgt, zuverlässige Kennwerte der Elastizität der Drahtseile in Querrichtung zu ermitteln. Die so ermittelten Kennwerte dienen unter Verwendung einer geeigneten Dimensionierungsmethode zur sicheren Auslegung von Trommelkörpern.

3.1 Grundlagen

Durch eine Vielzahl von Messungen an realen Bauteilen sowie der Dimensionierung von Trommelkörpern mit der Methode der finiten Elemente konnte ein Zusammenhang zwischen der Quersteifigkeit der verwendeten Drahtseile und der Beanspruchungen im Trommelkörper festgestellt werden.

Es wurde festgestellt, daß bei konstanten Seillasten die Beanspruchung im Trommelkörper bei steigendem Querelastizitätsmodul zunehmen. Bestätigt wurden diese Resultate durch die in /4/ und /6/ angeführten Messungen am realen Trommelkörper. Hierbei wurden drei identische Trommelkörper (F_{smax} : 30 kN; 23 Windungen, 5 Lagen) mit identischen Seillasten je Versuch unter Verwendung von Drahtseilen unterschiedlicher Machart im Versuch getestet. Zum Einsatz kamen hier:

1. Drahtseil Bauart Warrington,
2. Drehungsarmes Hubseil,
3. hochfestes Drahtseil (verdichtete Litzen).

In den Versuchen wurden unterschiedliche Trommellasten gemessen. Da lediglich die Seilmachart der variable Parameter war, konnte die Varianz in den Trommellasten hierauf zurückgeführt werden.

Durch die Gegenüberstellung der Resultate analytischer Berechnungen nach /3/, Berechnungen mit der Methode der finiten Elemente und den Ergebnissen der Messungen am realen Bauteil konnte nachgewiesen werden, daß im wesentlichen die Varianz der Seilquersteifigkeiten für die unterschiedlichen Trommelbelastungen ausschlaggebend ist. Hieraus wurde die Forderung abgeleitet, ein geeignetes Meßverfahren zur Ermittlung dieses Kennwertes zu entwickeln.

3.2 Konstruktion des Prüfstandes

Im Folgenden wird die im Institut für Maschinenwesen durchgeführte Entwicklung eines Prüfstandes zur Messung der Querelastizitätsmoduli von Drahtseilen erläutert.

Wie bereits in /3/ von Dietz festgestellt, ist die Quersteifigkeit eines Drahtseiles nicht nur von der Machart, sondern auch von der anliegenden Vorspannung abhängig. Das heißt, eine Varianz der Stranglast hat eine Veränderung des Quersteifigkeitsverhaltens zu Folge. Für die Entwicklung eines Prüfstandes bedeutet dies, daß die Aufbringung einer variablen Vorspannung in Längsrichtung sowie eine Kraftaufbringung in Querrichtung des Drahtseiles realisiert werden muß.

Zur Messung des charakteristischen Kennwertes ist zu bemerken, daß nicht die Durchmesserverringering unter Längsvorspannung den Kennwert repräsentiert, sondern das Elastizitätsverhalten unter zusätzlich wirkender Querkraft den Zielparameter darstellt.



Bild 9: Gesamtansicht Prüfstand

Zu diesem Zweck wurde der Prüfstand vergleichbar einer Zugprüfmaschine aufgebaut. In **Bild 9** ist der betriebsbereite Prüfstand in der Gesamtansicht dargestellt.

Die Stranglast wird über acht Hydraulikzylinder mit einem Betriebsdruck von max. 200 bar erzeugt. Die gewählte Anordnung erlaubt die Aufnahme von bis zu sechs Drahtseilen mit einem Durchmesser von 7 bis 32 mm. Die Seilbefestigungspunkte sind einstellbar ausgeführt. Es wird hierdurch ermöglicht, daß Längenunterschiede von bis zu 70 mm zwischen den Seilen einer Prüfgruppe ausgeglichen werden können.

Die Vorspannung in den Drahtseilen ist stufenlos über ein rechnergesteuertes Proportionalventil bis zur Maximalkraft von $F_{\text{max}} = 1.200 \text{ kN}$ regelbar. Hierbei wird die jeweilige Einzelstranglast als Regelgröße verwendet.

Die Messung der Querelastizitätsmoduli erfolgt bei statischer Stranglast. Die Meßeinrichtung hierfür ist in **Bild 10** dargestellt. Sie besteht im wesentlichen aus einem Hochdruckhydraulikzylinder, welcher über variable Stempelgeometrien die Querkraft in die im Prüfstand befindlichen Drahtseile einleitet. Zur Messung werden die aufgebrachten Kräfte in Querrichtung als auch die Stauchung der Drahtseile unter der eingestellten Last ermittelt. Durch ein horizontales Verfahren des Querprüfgerätes ist es möglich, an einer Charge eingespannter Drahtseile mehrere Messungen innerhalb des Meßraumes (1,50 m) durchzuführen.

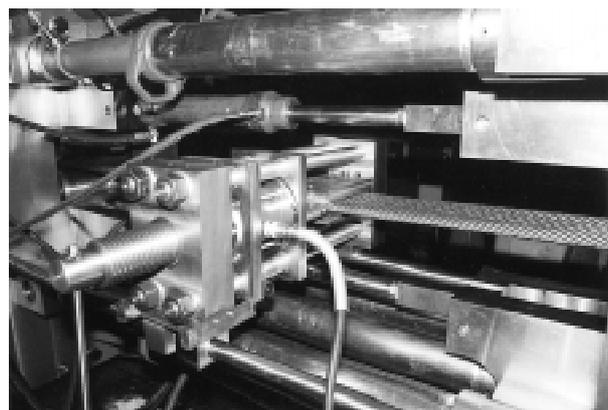


Bild 10: Querprüfeinrichtung

3.3 Messprogramm

Derzeit befinden sich 10 Drahtseile unterschiedlichster Machart mit einem Durchmesser von 14 mm in der Prüfung. In Anlehnung an /3/ wird ein Verhältnis von $\sigma_Q/\sigma_L < 0,3$ mit σ_L von 0 bis 50 % der Nennfe-

stigkeit gefahren. Die Resultate der Messungen werden 1999 präsentiert.

Besondere Beachtung findet auch die Anordnung der Drahtseile im Prüfstand. In der gewählten Ausführung ist es möglich, sowohl parallel liegende Seile als auch pyramidenförmig geschichtete Drahtseile im Hinblick auf ihr Querelastizitätsverhalten zu untersuchen. Ziel der variablen Anordnung der Drahtseilpackung ist die Simulation eines Abschnitts der Bewicklung auf einem Trommelkörper. Die Varianz der Anordnung der Drahtseile wird den Schwerpunkt der zweiten Versuchsreihe darstellen.

3.4 Ausblick und Zusammenfassung

Der am Institut für Maschinenwesen entwickelte Prüfstand zur Messung der Querelastizitätsmoduli von Drahtseilen ist 1998 in Betrieb genommen worden. Mit dem Prüfstand ist es möglich, die Querelastizitätsmoduln von Drahtseilen unter variabler Längsspannung zu messen. Es können Drahtseile in einem Durchmesserbereich von 7 bis 32 mm beliebiger Machart geprüft werden.

Ziel der z.Zt. noch laufenden Untersuchungen ist die Erstellung eines geeigneten, standardisierten Meßverfahrens zur Ermittlung der Querelastizitätsmoduli von Drahtseilen. Die Weiterverarbeitungen der so gewonnenen Ergebnisse wird im Rahmen des Forschungsvorhabens S 407 der Stiftung Industrieforschung zu einem Berechnungsansatz zur Dimensionierung von Trommelkörpern unter Einarbeitung der Einflüsse der Seilparameter zum Ziel haben.

4 Literatur

- /1/ Birkholz, H.; Garzke, M.; Mupende, I.: TWINTORS®-Membrankupplung für Turbomaschinen, Institutsmitteilung Nr. 23, Institut für Maschinenwesen, Clausthal, 1998
- /2/ Burgtorf, U.; Garzke, M.; Schäfer, G.: Spielbehaftete Längsstift-Verbindungen – eine unterschätzte Welle-Nabe-Verbindung?, Institutsmitteilung Nr. 22, Institut für Maschinenwesen, Clausthal 1997
- /3/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln. Dissertation, TH Darmstadt, 1971
- /4/ Henschel, J.: Experimentelle Beanspruchungsanalysen – Vorstellung eines Konzepts und Darstellung der Umsetzung an drei

Beispielen, Institutsmitteilung Nr. 20, Institut für Maschinenwesen, Clausthal 1995

- /5/ Bechtloft, G.: Die Beanspruchung des Drahtseilquerschnittes unter Längslast und ebener Querpressung (II), Draht-Welt 55 (1969) 3, S. 147-158
- /6/ Henschel, J.: Teilbericht zum Forschungsvorhaben „Gestaltung und Dimensionierung von Windentrommeln“, IMW Clausthal 1998

Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 2)

Birkholz, H.; Heider, G.

Am Institut für Maschinenwesen existieren unterschiedliche Prüfstände zur Untersuchung von Bauteilen und Maschinenelementen. Diese ermöglichen statische und dynamische Untersuchungen zur Lebensdauer.

At the Institut for Mechanical Engineering, different test benches are installed. They can be used for static and dynamic fatigue-tests of components and machine elements.

1 Torsionsprüfstand

Neben dem servohydraulischen Torsionsschwingprüfstand /1/ wird für höhere Lasten ein rein mechanischer Torsionsprüfstand eingesetzt, **Bild 1**.

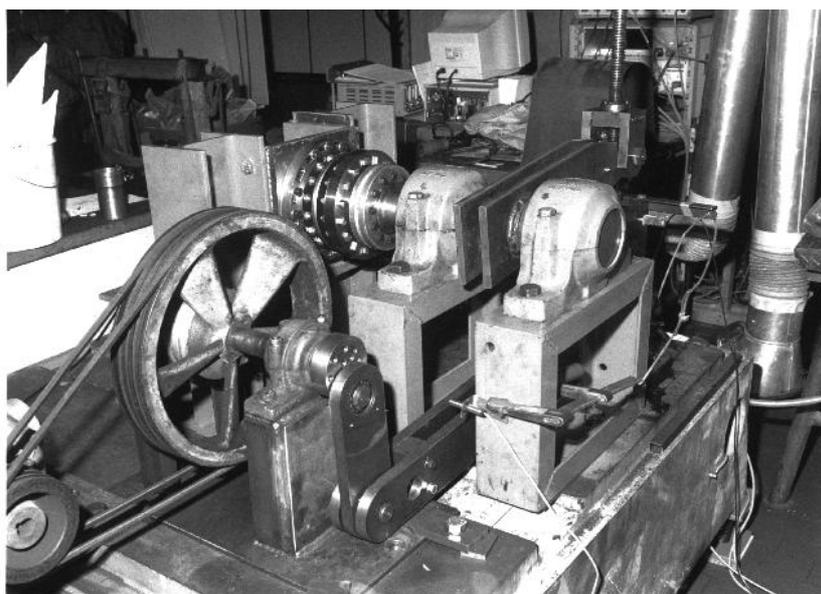


Bild 1: Torsionsprüfstand

Über einen Riementrieb (Untersetzungsverhältnis 3:1) treibt eine Asynchronmaschine einen Exzenter an, der mit einer Hebelübersetzung mit

dem Übersetzungsverhältnis 1:10 eine stufenlos verstellbare Kraft auf den eigentlichen Hebelarm aufbringt. Dieser ist mit einer Welle verschweißt. Die Welle endet in einem Flansch, an dem der Prüfling verschraubt wird. Um einen Biegeeinfluß auszuschließen, wird der Prüfling über eine Membrankupplung der Fa. BHS-Cincinatti entkoppelt. Die Schließung des Kraftflusses erfolgt über einen Gegenlagerbock, der in einer hohen Steifigkeit ausgeführt ist. Durch die Hebelübersetzung wird eine wesentlich geringere Belastung der Lagerungen

auf der Antriebsseite erreicht. Die Einstellung des Momentes erfolgt über einen Stellmotor, der eine Spindel antreibt. Der gesamte Aufbau ist fest auf einer Maschinengrundplatte installiert und mit Federfüßen gegen den Hallenboden entkoppelt.

Mit diesem Prüfstand lassen sich wechselnde und schwellende Belastungen auf den jeweiligen Prüfkörper aufbringen. Bei schwellender Belastung wird mit Hilfe der Spindel eine Mittellast aufgebracht, der Exzenter ermöglicht die Einstellung des Hubs. Dazu sind in der Exzenter Scheibe Bohrungen auf verschiedenen Radien in Form einer Schnecke ausgeführt, um einen breiten Einstellbereich zu gewährleisten. Eine stufenlose Verstellung befindet sich in Vorbereitung. Die Überprüfung des notwendigen Drehmomentes erfolgt mit

Hilfe einer Kraftmeßdose, die unterhalb des Hebelarmes in den Kraftfluß integriert ist. Die Prüffrequenz läßt sich mittels eines Frequenzumrichters von 1-10 Hz stufenlos regeln.

Bei der Untersuchung biegeweicher, extrem torsionssteifer Membrankupplungen wurden Dauerfestigkeitsversuche auf verschiedenen Lasthorizonten gefahren. Die höchste Last wurde mit 15.000 Nm erreicht. Ein weiteres aktuelles Einsatzgebiet besteht in der Prüfung von Welle-Nabe-Verbindungen in Form von Längsstift-Verbindungen,

welche anstelle von Paßfedern ein Übertragen des Drehmomentes ermöglichen /2/.

2 Schleuderprüfstand

Bild 2 zeigt den Schleuderprüfstand. Er befindet sich im Keller des Institutes und ist in zwei Räume, den Überwachungs- und Meßraum, in dem die Steuerung sowie das Meßequipment untergebracht sind, sowie den eigentlichen Prüfstandsraum, in dem die verschiedenen Vorrichtungen zur Bauteilprüfung fest installiert sind, unterteilt. Die eigentlichen Prüfaufbauten sind zwei Meter in den Boden eingelassen, was ein Abdecken des Prüfstandes

bei Durchführung der Versuche ermöglicht. Um eine Zerstörung der Spindeln zu vermeiden, erfolgt eine kontinuierliche Überwachung der Lagertemperatur mit Temperaturmeßfühlern. Zusätzlich werden die Lager mit Druckluft angeblasen, um den Temperaturanstieg in Grenzen zu halten. Die visuelle Überwachung des Prüfraumes erfolgt mit Hilfe einer Videokamera. Es besteht die Möglichkeit, eine mehrkanalige Datenübertragung durchzuführen.

Zur Zeit lassen sich Drehzahlen bis zu 16.000 U/min auf zwei Vorrichtungen verwirklichen. Der Antrieb besteht aus einer Asynchronmaschine und einem Riementrieb mit dem Übersetzungsverhältnis 1:5. Der Motor wird über einen Frequenzumrichter angesteuert, so daß auch hier eine stufenlose Drehzahleinstellung erreicht wird. Um einen Dauerbetrieb in einer für den Motor nicht optimalen Drehzahl zu ermöglichen, ist eine Zwangsbelüftung installiert.

Um noch höhere Drehzahlen verwirklichen zu können, wird an der Entwicklung einer Spindel für 28.000 U/min gearbeitet. Diese wird mit einer Ölnebelschmierung ausgestattet. Als Antrieb ist hier ein 100-Hz-Motor vorgesehen.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 180 „Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen bei besonderen mechanischen, thermischen oder chemischen Belastungen“ wurden auf diesem Prüfstand umfangreiche Untersuchungen zum Verhalten von Sichern und Rotoren /3,4/ bei extremer Fliehkraftbeanspruchung durchgeführt. Zur Zeit werden Meßwellen auf ihre Drehzahlfestigkeit geprüft. Dazu wird die Drehzahl der Meßwellen solange erhöht, bis eine Schädigung eintritt, d.h., bis die Wellen zerplatzen.

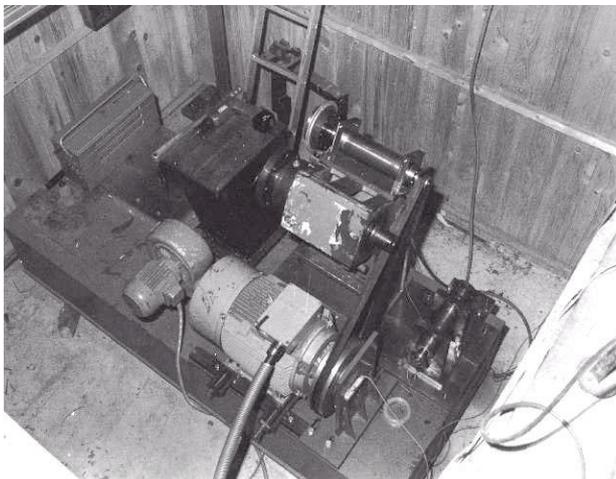


Bild 2: Schleuderprüfstand

3 Literatur

- /1/ Garzke, M., Henschel, J., Schäfer, G.: Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 1). Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU-Clausthal, 1998
- /2/ Burgtorf, U., Garzke, M. und Schäfer, G.: Spielbehaftete Längsstift-Verbindungen - eine unterschätzte Welle-Nabe-Verbindung?. Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1997
- /3/ Rübhelke, L. und Schäfer, H.: Einfluß von Welle-Nabe-Verbindungen auf das dynamische Verhalten von Rotoren. Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU-Clausthal, 1993
- /4/ Jakel, R.: Ein Beitrag zur Berechnung und konstruktiven Gestaltung keramischer Bauteile, angewendet am Beispiel eines keramischen Heißgasventilatorrades. Dissertation, TU Clausthal 1997 in VDI Fortschritt-Berichte Reihe 1: Konstruktionstechnik / Maschinenelemente Nr. 280, Düsseldorf: VDI Verlag

Messdatenrückführung als Ausgangsbasis für Rechnerimulationen

Grünendick, T.; Käferstein, B.; Otto, St.

Das wichtigste Einsatzfeld der am Institut für Maschinenwesen vorhandenen 3D-Koordinatenmessmaschine der Firma ZEISS ist die Messung von Zahnflanken und die Kontrolle der Maßhaltigkeit unterschiedlichster Bauteile. Diese Messungen dienen hauptsächlich der Qualitätssicherung. Dabei werden die Messdaten in der Regel nur in Form eines Messprotokolls erfasst. Der folgende Artikel beschreibt am Beispiel einer Zahnwellen-Messung die prinzipielle Vorgehensweise, um die gewonnenen Messdaten in FEM-Simulationen zu verwenden.

The main application of the instituts 3D-coordinate machine is the measurement of spline fit connections and several other parts. Usually the user gets the data printed in a protocol. This article describes the principle approach to translate the data using them within a finite element analysis simulation.

1 Messen und Digitalisieren

Das Institut für Maschinenwesen verfügt über ein 3D-Koordinatenmessgerät UMM550 der Firma Zeiss, Oberkochen, **Bild 1**. Diese Anlage erlaubt nach einer rechnerischen Ausrichtung des Werkstücks die Messung einfach und komplex gestalteter Körper im Dialog- und CNC-Betrieb. Sie ist ein komplett ausgestattetes Messzentrum mit integriertem Rundtisch zur Messung rotationssymmetrischer Teile; das Koordinatenmessgerät besitzt außerdem einen messenden Tastkopf für Scanning-Betrieb. Die Wiederholgenauigkeit der UMM 550 beträgt bei einer Messlänge von 100mm nur 1µm.

Neben der Grundausstattung mit verschiedenen Messsoftwarepaketen bietet die Universalmessmaschine alle Voraussetzungen für das Digitalisieren von Freiformflächen. Der abzubildende Bereich wird zunächst definiert und anschließend gemäß der festgelegten Mess-Strategie gescannt. Dies läuft in der Regel vollautomatisch ab.

Mit dieser Methode ist es möglich Modelle und Formen mit unbekanntem und bekannten Konturen aufzunehmen. Die Messdaten werden in der Regel in Form eines Messprotokolls ausgedruckt; sie können jedoch auch im standardisierten VDA-Format gespeichert werden. Die parametrisierte

Kontur steht anschließend zur Steuerung von Werkzeugmaschinen oder für die Anwendung des Reverse Engineering zur Verfügung /1/.



Bild 1: Zeiss Koordinatenmessmaschine

Schwerpunkt des in diesem Artikel beschriebenen Anwendungsfalles war die Untersuchung von Zahnwellen-Schäden, die – so die Vermutung – durch eine Umlaufbiegebelastung verursacht wurden. Um den für diese Belastungsart typischen Flankenverschleiß nachzuweisen, erfolgte zunächst die Messung von sechs gleichmäßig über dem Umfang verteilten, repräsentativen Zähnen mit Hilfe eines Linienscans in Achsrichtung.

Im **Bild 2** ist der Formplot eines derartigen Linienscans abgebildet. Dieser zeigt den gemessenen, abweichungsbehafteten Verlauf einer verschlissenen Zahnflanke. Dabei ist der Abtrag am Verbindungsanfang und der Flankenaufrag im Anschlussbereich deutlich erkennbar. Um diesen realen Verschleissverlauf in die Simulationsrechnung berücksichtigen zu können, wurden im Sinne des Reverse Engineering die gemessenen Zahnflankenkonturen digitalisiert und die Koordinatenpunktewolke als VDA-File ausgegeben.

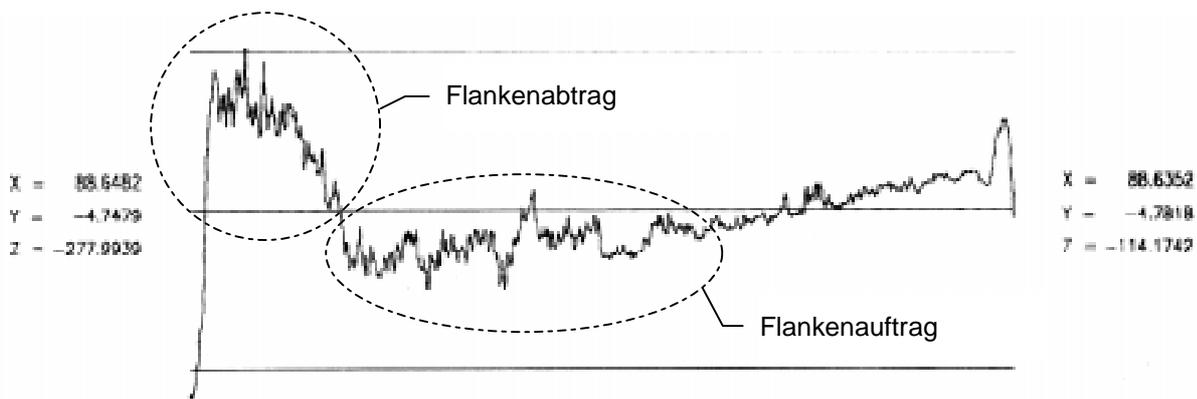


Bild 2: Flankenformabweichung für eine verschlissene Zahnflanke

2 Aufbereitung der Messdaten für das FEM-Modell

2.1 Berechnung der Flankenabweichungen

Um die von der Messmaschine ausgegebenen VDA-Files in ein FEM-Modell zu übernehmen, werden diese zunächst mit der Textverarbeitung WORD formatiert, so dass sie mit den deutschen Dateikonventionen übereinstimmen. Anschließend können die Daten in EXCEL importiert und für jeden Flankenscan eine Ausgleichsgerade durch alle Messpunkte berechnet werden (Gauß'sche Fehlerquadratmethode im 3D-Raum). Mit dieser Vorgehensweise wird ein künstlicher Bezug geschaffen, der sicherstellt, dass nur die Flankenabweichungen aufgrund des Verschleisses erfasst werden. Dies war notwendig, weil keine Referenzmessungen für den unverschlissenen Zustand der Zahnwelle vorlagen.

Für die Ausgleichsrechnung wird zunächst eine Gerade im Raum – festgelegt durch den Anfangspunkt und den Richtungsvektor – vorgegeben. Im Anschluss wird die Differenz zwischen den gemessenen Koordinatenpunkten und den auf Grundlage der Ausgleichsgerade berechneten Punkten gebildet. Durch Aufaddieren der Quadrate der Differenzen erhält man die zu minimierende Fehlerquadratsumme nach Gauß. Mit der eingebauten Solverfunktion¹ von Excel können die Parameter der Geraden durch ein Gradientenverfahren variiert werden bis das Minimum der Fehlerquadratsumme erreicht ist.

¹ Im Gegensatz zur Zielwertsuche, bei der immer nur eine Zelle verändert wird, manipuliert der Solver mehrere Zellen synchron und beachtet dabei auch vorgegebene Randbedingungen

Mit dieser Vorgehensweise wird sichergestellt, dass die Flankenabweichung in Bezug auf ihre „Nulllinie“ von Fehlern, wie absolute Flankenabweichungen oder Schräglagen bzw. Exzentrizitäten der Welle im Werkstückkoordinatensystem nicht beeinflusst werden, **Bild 3**.

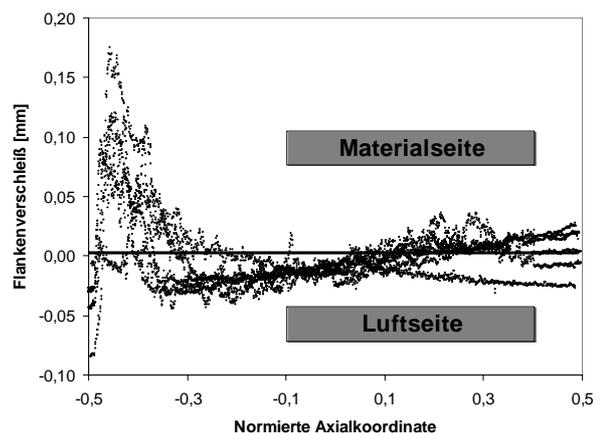


Bild 3: Abweichungen zum Nullniveau für alle sechs Belastungszahnflanken

In der FE-Rechnung wird lediglich ein Keilmodell der Zahnwellen-Verbindung generiert, um Rechenzeit einzusparen. Aus diesem Grund wird aus den gemessenen Flanken eine gemittelte Kontur berechnet. Hierzu werden die Koordinatensysteme der Flankenscans um die Summe aus Profilwinkel und Polarwinkel des Flankenberührungspunktes mit der Tastkugel gedreht. Dies gewährleistet, dass nur der Abtrag senkrecht zur Flanke, also der tatsächliche Verschleiss berücksichtigt wird. Da jedoch die Daten des VDA-Files den Mittelpunkt der Tastkugel angeben und nicht den eigentlichen Berührungspunkt mit der Flanke, wurde eine Hilfskonstruktion mit der 3D-CAD Software Pro/Engineer durchgeführt. In **Bild 4** ist diese Hilfskonstruktion für die Bestimmung des Flankenberührungspunktes dargestellt. Aus

dem am Institut erstellten Berechnungsblatt für Zahnwellen /2/ wurde anschließend der notwendige Drehwinkel für das Koordinatensystem errechnet.

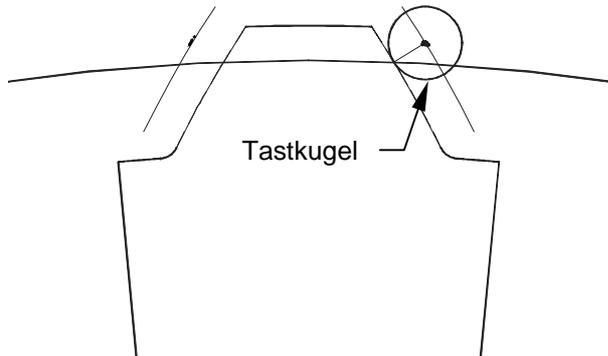


Bild 4: Zahn mit Tastkugel, verschobener Flanke und zugehörigem Messkreisradius in ProE

2.2 Abbildung des Übermaßes im Modell

Die stark streuenden Messwerte werden durch ein Ausgleichspolynom gemittelt. Basierend auf diesem Ausgleichspolynom ist es möglich, für die Elementschichten des FEM-Modells (in Axialrichtung) die zugehörigen Flankenverdrehwinkel zu berechnen, die erforderlich sind, um den gemessenen Flankenverlauf nachzubilden. Hierzu wird in der Excel-Tabelle die axiale Elementierung vorgegeben und anschließend über Polarkoordinatentransformation der Abtrag senkrecht zur Flanke in einen Rotationswinkel um den Achsmittelpunkt umgerechnet, **Bild 5**.

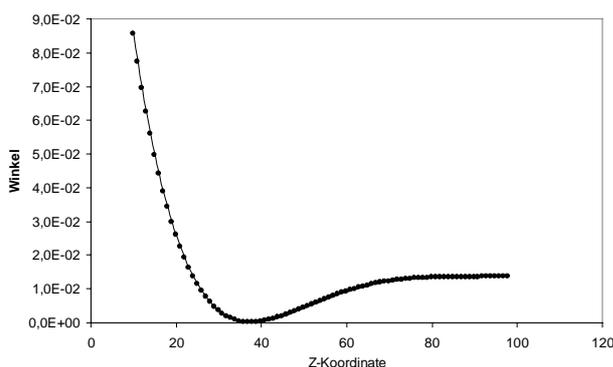


Bild 5: Drehwinkel zum Aufbringen der Flankenabweichung aus dem Ausgleichspolynom

3 Auswertung der FEM-Berechnungen

3.1 Allgemeine Vorbemerkung

Die FEM-Rechnungen für reine Torsionsbelastungen wurden auf Grundlage der am IMW entwickelten Methode für die Abbildung der erforderlichen

Randbedingungen durchgeführt /3/. **Bild 7** zeigt das dreidimensionale Sektormodell der zu untersuchenden Zahnwellen-Verbindung. Deutlich erkennbar ist der fein elementierte Kontaktbereich zur Erhöhung der Konvergenz. Es steht eine abweichungsbehaftete Wellenflanke (vgl. Kap. 2) mit einer idealen Nabenflanke im Kontakt.

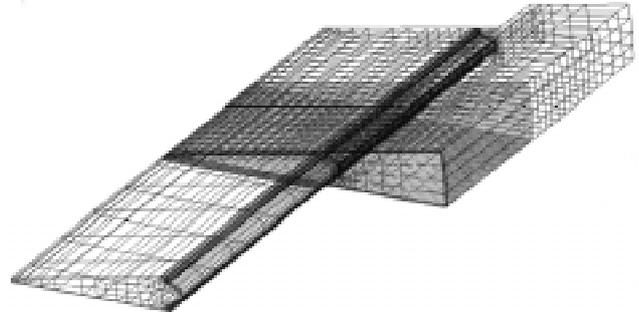


Bild 7: 3D-Keilmodell der Zahnwellen-Verbindung

3.2 Ergebnisse

Bei der Auswertung der FEM-Rechnungen interessierten besonders die Flankenpressungen und die Fußspannungen. Diese Kennwerte wurden aufgrund der Komplexität des Modells mithilfe von automatisierten Abläufen (Procedures) aus den Ergebnisdateien herausgefiltert und mit der Tabellenkalkulation EXCEL visualisiert.

In **Bild 6** sind die Ergebnisse für die Fußspannungen infolge reiner Torsionsbelastung dargestellt. Es wird deutlich, dass bei der Zahnwellen-Verbindung mit idealer Flankengeometrie die höchsten Spannungen am Verbindungsanfang auftreten. Ursache hierfür ist der Steifigkeitssprung in diesem Bereich. Durch den Zahnflankenverschleiß verschiebt sich der Spannungspeak in den Bereich des Flankenaufrags. Dieser axiale Versatz ist in der Gegenüberstellung beider Spannungs-

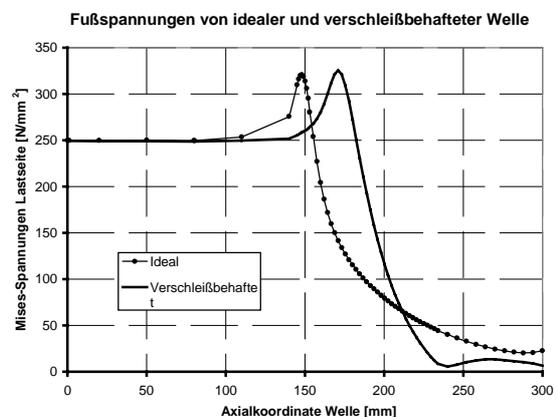


Bild 6: Vergleich der Fußspannungen einer idealen Zahnwellen-Verbindung mit denen der abweichungsbehafteten

verläufe deutlich erkennbar. Die Beträge der Spannungsmaxima stimmen nahezu überein; die Differenz liegt im Bereich der Rechenungenauigkeit. Auf Grundlage der FEM-Berechnungen für reine Torsionsbelastung ist es demnach nicht möglich, den Verschleissauftrag eindeutig als Schadensursache zu bestimmen.

Die Flankenpressungen der idealen Zahnwellen-Verbindung, **Bild 8**, erreichen am Verbindungsanfang sehr hohe Werte, weil die tragende Kontaktfläche mit fortschreitender Annäherung an den Rand der Verbindung kleiner wird und deshalb die äußerste Knotenreihe im FEM-Modell die höchsten Kräfte aufnehmen muss. Da die Rechnung auf ideal elastischem Werkstoffverhalten basiert, werden Pressungswerte von mehr als 800 N/mm^2 erreicht. In der Realität baut der Werkstoff diese Spannungsspitzen durch lokale Plastifizierungen bis auf das Niveau der Fließgrenze von Welle oder Nabe ab. Mit Berücksichtigung des Flankenverschleisses ergibt sich ein Pressungsverlauf der zunächst auf den Bereich des Flankenaufrages begrenzt ist. Mit zunehmender Belastung dehnt sich dieser Bereich in Richtung des Verbindungsanfangs aus; die tragende Fläche ist im Gegensatz zur idealen Flankenengeometrie belastungsabhängig. Bei voller Nennlast ergibt sich ein maximaler Pressungswert von ca. 140 N/mm^2 .

Um ein vollständiges Schadensmodell aufzustellen, ist die Generierung eines Vollmodells der Zahnwellen-Verbindung notwendig, mit dem der Einfluss von Querkräften berücksichtigt werden kann. Nur durch die Simulation der durch die Querkräfte verursachten Biegeeffekte ist eine abschließende Aussage zur Schadensursache möglich.

4 Zusammenfassung

Zur Untersuchung der Schadensursache an einer Zahnwellen-Verbindung war es erforderlich, den realen, verschlissenen Flankenverlauf im FEM-Modell abzubilden. Basierend auf diesem Anwendungsfall wurde die Konvertierung der Messdaten in ein für Rechnerimulationen anwendbares Format erläutert. Mit Hilfe der Messdatenrückführung war es ebenfalls möglich, systematische, bei der Messung entstehende Fehler zu kompensieren.

5 Literatur

- /1/ Die Realität in den Computer holen, Hightech Report, Daimler Benz AG, Stuttgart 1998
- /2/ Burgtorf, U.: Tabellenkalkulationsprogramm zur Tragfähigkeitsberechnung von Zahnwellen-Verbindungen. Institutsmitteilung Nr. 21, IMW TU Clausthal 1996
- /3/ Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung. Dissertation TU-Clausthal 1996

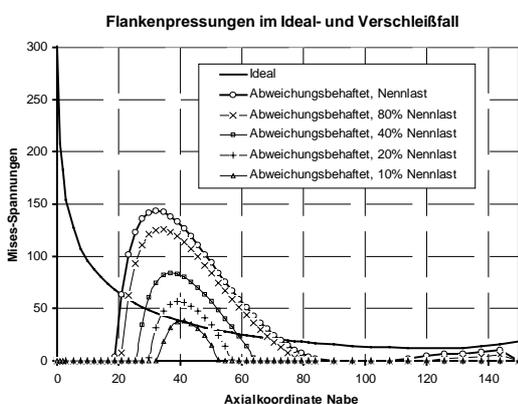


Bild 8: Vergleich der Flankenpressungen einer idealen Zahnwellen-Verbindung mit denen der abweichungsbehafteten

Entwicklung lärmarmer Produkte – Rechnergestützte Beratungshilfen für den Konstrukteur

Dietz, P.; Haje, D.

Die maschinenakustischen Eigenschaften eines Produkts werden weitgehend in der Konstruktion festgelegt, Konstrukteure besitzen aber im allgemeinen keine Ausbildung als Akustiker. Der Beitrag stellt eine rechnergestützte Methode zur Beurteilung und Beeinflussung des akustischen Verhaltens von Maschinenbaustrukturen dar, das auf dem Modell der Schallflußkette aufbaut und mit Konstruktionsregeln nach der Systematik der ISO/TR 11 688 den Konstrukteur während der frühen Phasen der Produktentwicklung unterstützt.

The acoustic behaviour of technical products has to be defined in the design stage, although designers mostly have no education as acousticians. In this contribution a computer aided method is described how to analyse and influence the acoustic characteristics of machine structures. This method bases on the concept of the „sound flowchart“ of structures, contents design rules after ISO/TR 11 688 and supports the designer in the early stages of the design process.

1 Einführung

Durch zunehmende Verschärfung maschinenakustischer Produkthanforderungen aus gesetzlichen Vorschriften oder Wettbewerb sehen sich viele Unternehmen bei der Produktentwicklung mit der Problematik der Lärminderung konfrontiert. Das akustische Verhalten wird, wie eine Vielzahl anderer Eigenschaften auch, in der Entwicklungsphase des Produktes festgelegt, die Entscheidungen der Konstrukteure zu Wirkprinzipien, Gestaltung und Werkstoffen sind damit auch entscheidend für die Lärmentwicklung des Produktes. Die daraus abzuleitende Forderung nach einer maschinenakustisch kompetenten Begleitung des Konstruktionsprozesses führt aber auf zwei entscheidende Schwierigkeiten

- Die Forderung nach Lärmarmut stellt nur eine der vielen, oft als Restriktionen bezeichneten Nebenforderungen dar und besitzt oft eine gegenüber anderen Kriterien wie Funktionssi-

cherheit, Ergonomie, Kosten usw. niedrigere Priorität.

- Wenn man den Energieumsatz der Lärmentwicklung mit dem Energieumsatz der Maschine vergleicht, so kommt man auf Verhältnisse von 10^{-4} bis 10^{-7} („Akustischer Wirkungsgrad“). Das heißt, daß der in Energieflüssen und Energiewirkungsgraden denkende Ingenieur die Auswirkung konstruktiver Maßnahmen auf die maschinenakustischen Eigenschaften praktisch nicht abschätzen kann. Zudem ist die Lärmentwicklung von vielen kaum beeinflussbaren Erscheinungen wie Werkstoffdämpfung oder Fügestellendämpfung bei verschieden stark angezogenen Schrauben oder unterschiedlich hergestellten Oberflächen, von Spalten infolge Fertigungsabweichungen oder Verschleiß usw. abhängig, die auch durch Zufälligkeiten bei Fertigung, Montage und Handhabung bestimmt sind und einem Konstruktionsmerkmal nicht zugeordnet werden können.
- Konstrukteure sind in der Regel im Bereich der Maschinenakustik unzulänglich ausgebildet. Die Akustik ist ein Fachgebiet der Physik, das sich bezüglich ihrer relevanten Wissensbereiche und des methodischen Vorgehens stark von den Inhalten der Ingenieurausbildung unterscheidet. Konstrukteure besitzen nach einer europaweiten Umfrage /1/ allenfalls akustisches Grundwissen, **Bild 1**.

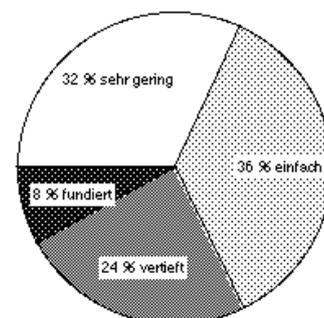


Bild 1. Maschinenakustischer Wissensstand von Konstrukteuren. Ergebnis einer europaweiten Befragung 1993 /1/

Die Konsequenz dieses Mangels einer genügenden Berücksichtigung maschinen-akustischer Erkenntnisse bei der Entwicklung von Produkten sind oft schalltechnisch unausgereifte Prototypen, an denen meist mit großem Aufwand sekundäre Maßnahmen in Form von kostenintensiven Kapselungen oder den Einsatz zusätzlicher Dämpfer nachträglich vorgenommen werden. Kostengünstigere Primärmaßnahmen, die an der Schallentstehung ansetzen, sind in dieser Phase kaum mehr möglich, da sie tiefgreifende Änderungen der bereits auskonstruierten Struktur bedeuten würden.

Gegenstand einer Reihe von Forschungsprojekten ist die Verbindung der beiden Fachgebiete Konstruktion und Akustik mit der Erarbeitung von Methoden zur Konstruktion lärmarmere Produkte. Ziel einer solchen methodischen Vorgehensweise bedeutet damit auch, den konstruktionsrelevanten Teil maschinenakustischen Wissens in eine für Konstrukteure verständliche Form aufzubereiten und einen kontextorientierten Zugriff zu gewährleisten /2,3/.

2 Konstruktionsmethodik und Maschinenaustik

Bild 2 zeigt die mögliche Einflußnahme maschinenakustischen Wissens auf den allgemeinen Konstruktionsprozeß nach /4/. Während die Klärung der Aufgabenstellung durch Anforderungen aus gesetzlichen Regelwerken, Wettbewerbsvergleichen usw. unterstützt werden kann, erfolgt in der Phase der Konzeption meist eine Konzentration auf die Hauptfunktionen – maschinenakustische Aspekte dienen hier meist nur als Bewertungskriterien bei überwiegend unscharfen Informationen. Erst die relativ hohe Informationsdichte zu Einzelheiten der Konstruktion in der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase führt zu kompetenten Aussagen zur Lärmentwicklung, zu Vergleichsrechnungen oder zu Messungen an Modellen. In vielen Fällen können Informationen zu den Geräuschquellen und Übertragungswegen erst aus Messungen am Prototyp gewonnen werden.

Unter den Informationsmitteln für den liefern Normen, Richtlinien und Zulieferinformationen meist Aussagen zu Anforderungen und Teilaspekten, die meisten Konstruktionsregeln, Beispiele, Ähnlichkeitsgesetze oder Schätzformeln stellen aber Informationen dar, deren Inhalt oft allgemein gehalten ist und zu einer verlässlichen Aussage detaillierte Kenntnisse der zu entwickelnden Produktstruktur

und Arbeitsweisen benötigen. Von besonderer Bedeutung ist, daß der Konstrukteur – ausgehend von Strukturen oder Wirkprinzipien zu den Hauptfunktionen seines Entwurfs – die dem Konstruktionsstadium entsprechende relevante maschinenakustische Information erhält. Grundsätzlich gilt, daß – obwohl das akustische Verhalten des Produktes während der Konstruktion am nachhaltigsten beeinflusst werden kann – die Informationen meist aus Erfahrungen stammen, die nur aus den der Konstruktion nachgelagerten Lebensphasen des Produktes gewonnen werden können.

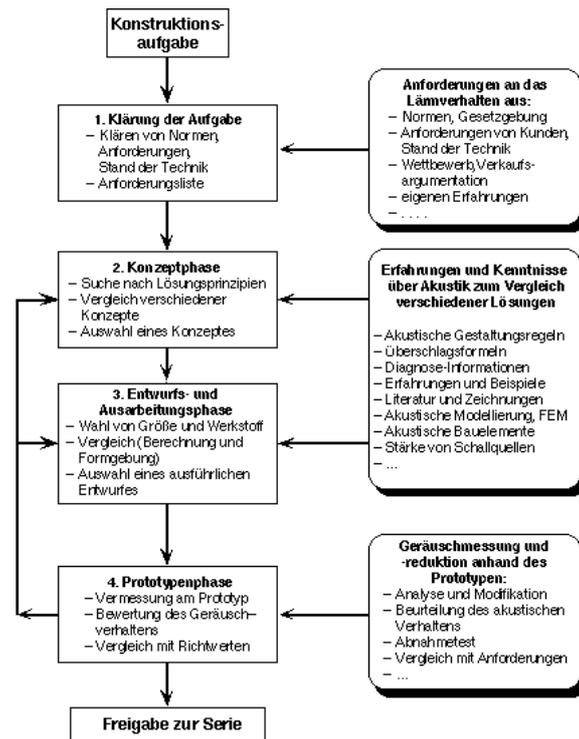


Bild 2. Verknüpfung maschinenakustischen Wissens mit der allgemeinen Konstruktionsmethodik nach /3/

3 Schallentstehungskette und akustische Modellierung

Zur Detektierung und Beeinflussung von Geräuschen in Produktstrukturen – seien sie nun bereits vorhanden oder nur gedanklich im Produktmodell während der Entwicklung angedacht – dient nach /5/ das Vorgehen der Schallentstehungskette, die den „Weg“ des Schalls von der Erzeugung bis zur Abstrahlung an der Oberfläche beschreibt und der Gedankenwelt des Konstrukteurs näher kommt als die theoretischen Ableitungen der Akustik. Die Vorstellung der Schallentstehungskette erlaubt die Zuordnung von Geräuschmechanismen zu Maschinenstrukturen (**Bild 3**) und eröffnet damit die Mög-

lichkeiten einer gezielten Beeinflussung des Maschinengeräuschs durch konstruktive Maßnahmen an den Strukturen. Zu beachten ist allerdings, daß die hier zugrundeliegenden vereinfachten Betrachtungen nur qualitative Aussagen erlauben und die frequenzabhängigen Betrachtungsweisen nicht ersetzen können:

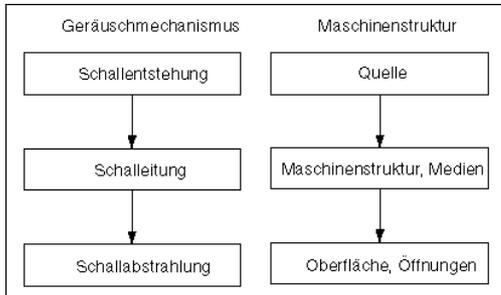


Bild 3. Zuordnung von Geräuschmechanismen zu Maschinenstrukturen nach der Schallentstehungskette

Schallentstehung: Zeitlich veränderliche Betriebskräfte wirken auf eine Maschinenstruktur oder einen Arbeitsort ein. Die Größe der erzeugten Schallenergie ist abhängig von Frequenzen, Zeitverlauf, Kraftgrößen, Geschwindigkeiten usw. Ort der Anregung und Mechanismus können in der Maschinenstruktur liegen (Körperschallquelle) oder in einem in der Maschine befindlichen Arbeitsort (z.B. Luftschall, Flüssigkeitsschall).

Schallübertragung: Durch die zeitlich veränderlichen Betriebskräfte wird die Struktur zur Weiterleitung der Signale und zu Eigenschwingungen angeregt. Parameter einer Schallübertragung sind Frequenzanteile, Elastizität, Masse, Dichte, Dämpfung und Steifigkeit der Struktur. Dabei kann eine Wandlung der Schallarten (z.B. Flüssigkeitsschall in Körperschall) eintreten.

Abstrahlung: Körperschall kann von den Oberflächen an die Umgebung abgestrahlt werden, Luftschall wird durch Öffnungen abgestrahlt. Die Größe der abgestrahlten Schalleistung ist von den Frequenzanteilen, der Geometrie, der Schwingung der abstrahlenden Oberflächen usw. abhängig.

Entsprechend dieser Vorstellung wird zur Analyse der Schallsituation folgende Vorgehensweise empfohlen:

- Zunächst sind die hauptsächlichen Schallquellen einer Konstruktion zu definieren.
- Diese Schallquellen sind auf die möglichen Geräuschemechanismen zu untersuchen.

- Danach ist die Geräuschübertragung innerhalb der Maschinenstruktur und bis zum Empfänger zu analysieren
- Im letzten Schritt wird die Geräuschabstrahlung an der Maschinenoberfläche untersucht.

Die Reduktion der Maschinenstruktur auf eine physikalisch beschreibbare Geräuschemechanismenstruktur gestattet eine Analyse der Geräuschemechanismen, wie sie in **Bild 4** gezeigt wird. Das Bild enthält eine vollständige Übersicht über die physikalischen Geräuschemechanismen-, -fortleitungs- und -abstrahlmechanismen. Ausgehend von einer solchen physikalischen Beschreibung können auch Maßnahmen oder Berechnungen zur Schallentwicklung abgeleitet werden, die anschließend wieder konstruktiv umgesetzt werden müssen.

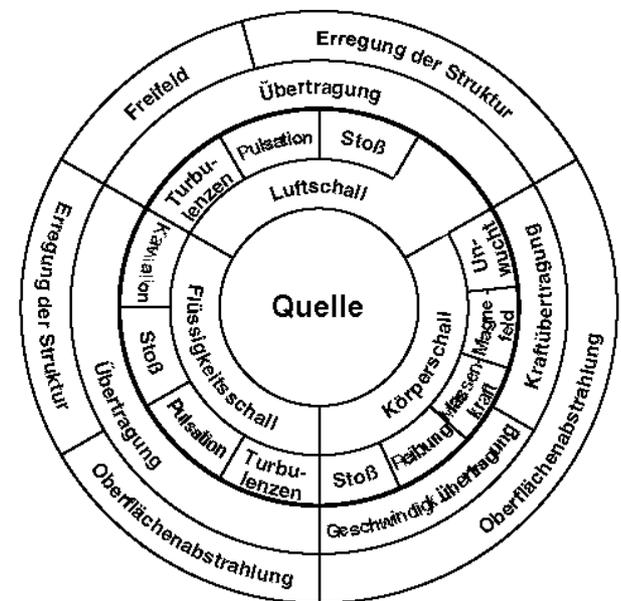


Bild 4. Grundmodell der Geräuschemechanismen in Maschinen nach /3/

Um eine Maschine mit unterschiedlichen Quellen und Übertragungswegen zu beschreiben, ist die Untersuchung des gesamten Schallwegs durch Aufstellung eines Schallflußmodells notwendig. Die Grundlagen und die Vorgehensweise hierzu seien an einem Beispiel erläutert, dabei sei von der Analyse einer auskonstruierten Baugruppe ausgegangen:

Der in **Bild 5** gezeigte Kältemittelkompressor für Haushaltskühlschränke wird zunächst anhand seiner Stückliste nach maschinenakustisch relevanten Baugruppen untersucht (**Tabelle 1**), dabei werden mögliche Schallquellen (aktive Komponenten) und Schallübertragungsstrukturen (passive Komponenten) definiert. Danach erfolgt eine Suche nach

Aktiv	Passiv
Kompressor	Rohre
Elektromotor	Federn
	Gehäuse

Tabelle 1. Aktive und passive Elemente des Kältemittelkompressors

möglichen Schallentstehungsmechanismen in den aktiven Komponenten, d.h. die Rückführung auf maschinenakustische Grundlagen gemäß **Bild 4**. Ergebnis ist eine tabellarische Übersicht (**Tabelle 2**), die Quellen, Übertragungswege und Abstrahlorte – getrennt nach Luft-, Flüssigkeits- und Körperschall – enthält und die Ausgangspunkt für ein Schallflußmodell ist, das neben den Elementen auch die Verknüpfungen enthält (**Bild 6**) /6/.

Die in **Bild 6** gewählte Darstellungsart in der Beschreibungssprache EXPRESS-G /7/ deutet bereits darauf hin, daß man die von den Komponenten (Stücklistenpositionen) und ihren Verknüpfungen ausgehende Suche nach Geräuschmechanismen

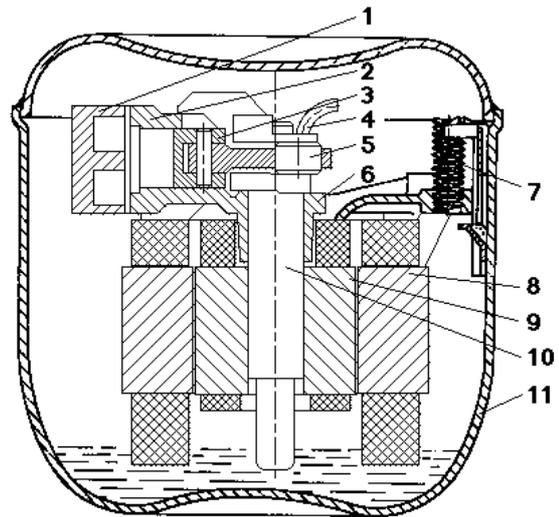


Bild 5. Beispiel für Schallflußmodell: Kältekompressor. 1 Zylinderkopf; 2 Zylinder; 3 Kolben; 4 Schmiereinrichtung; 5 Pleuellager; 6 Pleuellager; 7 Federn; 8 Stator Elektromotor; 9 Rotor Elektromotor; 10 Welle; 11 Gehäuse.

	Komponente	Bauteil / Baugruppe / Konstrukti-	Schallquelle	L	K	F
Quelle	Kompressor	Verdichtungs-einheit	Pulsation	X	X	
		Kurbeltrieb	Massenkräfte		X	
		Ventil	Stoß		x	
		strömungführende Bauteile	Turbulente Strömung	x		
	Elektromotor	Rotor / Stator	Elektromagn. Anziehung		x	
		Stator	Magnetostriktion		x	
		Rotor	Unwucht		x	
		Gleitlager	Festkörperreibung		x	
		Schmiermittel	Gehäuse	Tropfen		x
	Ölvorrat	Tropfen			x	
Übertragung	Komponente		Pfad	L	K	F
	E-Motor / Komp.	feststehende Bauteile	Innere Struktur	x	x	
		Kurbelwelle / Rotor	Welle	x	x	
		Armaturen	Rohranschlüsse		x	
		Kühlmittel	Medium	x		
		Schalldämpfer	Schalldämpfer	x	x	
		Rohr	Rohr		x	
		Rohr	Medium	x		
	Schwingungsisolierung	Federn	Befestigungsstellen		x	
	Gehäuse		Befestigungsstellen innen		x	
			Medium innen		x	
			Befestigungsstellen			x
			Rohranschlüsse innen			x
		Rohranschlüsse außen			x	
		Ölvorrat			x	
Abstrahlung	Komponente		Oberfläche	L		
	Kältemittelkompressor	Gehäuse	Gehäuseoberfläche	x		

Tabelle 2. Möglicherweise schallrelevante Komponenten des Kältemittelkompressors. L Luftschall; K Körperschall; F Flüssigkeitsschall

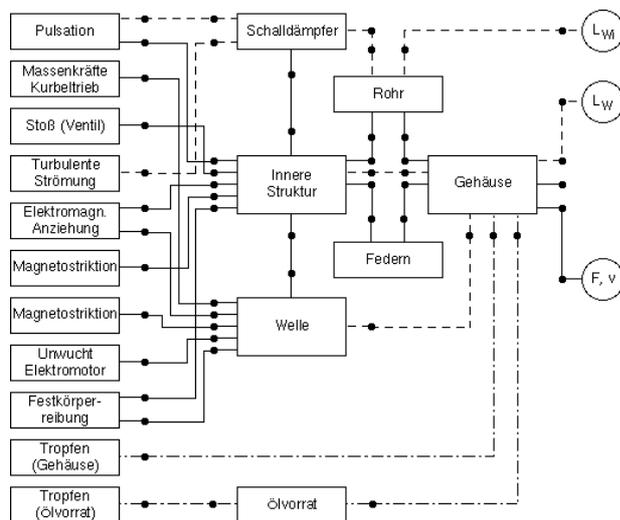


Bild 6. Schallflußmodell des Kältemittelkompressors. L_{wi} Abstrahlpegel des Luftschalls aus Zuführungsteilen; L_w Abstrahlpegel des Luftschalls aus dem Kompressorgehäuse; F, v Weiterleitung von Körperschall aus dem Kompressorgehäuse.

durch ein System unterstützen kann, das sowohl Informationen zu den maschinenbaulichen Komponenten als auch zu ihren zugehörigen Geräuschenstehungs- bzw. -fortleitungsmechanismen enthält – jede Komponente und jeder Koppelpunkt kann nach weiteren Informationen (Konstruktionsbeispiele, Abschätzformeln, Meßdaten in Datenbanken usw.) abgesehen werden.

Bild 6 enthält eine durch die Nutzung eines solchen Systems bedingte, sehr ausführliche Darstellung, der erfahrene Akustiker würde „von Hand“ ein etwas einfacheres Modell durch integrierte Bewertung der einzelnen Schallquellen und –wege erstellen.

4 Beratungssystem zur Konstruktion lärmarmen Produkte

4.1 Anforderungen

Schon aufgrund der zahlreichen und durch den Konstrukteur nur sehr schwierig handhabbaren Informationen der Maschinenakustik erscheint eine Konstruktionsunterstützung durch konventionelle Hilfsmittel wie Konstruktionskataloge, Konstruktionsregeln, Konstruktionsbeispiele usw. nur schwer realisierbar, der Zugriff zu diesen (vorhandenen ?) Informationen ist sehr zeitaufwendig und erfordert ein erhebliches Maß an maschinenakustischem Grundwissen. Als Lösungsansatz bietet sich die Erstellung eines wissensbasierten Systems an, dessen Kernfunktionalität die Verknüpfung des

Methoden- und Faktenwissens aus den Gebieten der Konstruktionswissenschaften und der Maschinenakustik ist. Methodisch muß ein solches System die Erstellung des Schallflußmodells unterstützen, um damit die Rückführung auf maschinenakustische Grundlagen zu gewährleisten. Im zweiten Schritt steht dann die Bereitstellung akustischen Wissens durch Beispielsammlungen, Formeln, Konstruktionsregeln, Meßdaten usw. an, dies betrifft meist die Anwendung von Erfahrungen aus bestehenden Produkten auf die hier vorliegende Entwicklungsaufgabe /1/.

Aus diesen Vorgaben wird klar, daß einerseits eine Methodik der Vorgehensweise zur Konstruktion lärmarmen Produkte erarbeitet werden muß, die sich an den Abläufen nach VDI 2221 /4/ orientiert und die Rückführung maschinenbaulicher Maßnahmen auf akustische Prinzipien erlaubt. Andererseits ist ein Informationsmodell zur Verfügung zu stellen, in dem Daten nach maschinenakustischen Kriterien semantisch eindeutig und objektorientiert abgelegt sind.

4.2 Entwicklung der Vorgehensweise (Konstruktionsmethodik)

Das rechnerunterstützte Handlungssystem wurde mit Hilfe der SADT-Methode (Structured Analysis and Design) /8, 9/ aufgearbeitet und beschrieben. Als Beispiel hierzu zeigt **Bild 7** die Beschreibung des akustischen Modells (dessen rechnergestützte Erstellung in einer weiteren Detaillierung aufgeführt werden kann), es zeigt auch, wie aus einem ersten Modell (A31) durch Hinzunahme weiterer Daten über Komponenten (A32, A34) oder durch Messungen an Prototypen (A33) der Wissensstand in einer Schleifenbildung (Ergebnisse von A35 fließen in A31 wieder ein) verbessert werden kann bis zu einer – vom Wissensstand der jeweiligen Konstruktionsphase abhängigen – befriedigenden Beschreibung des akustischen Verhaltens. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise ist in /6/ dargestellt.

Die Methodik wurde in mehreren Industriefirmen anhand von firmeninternen Beispielen erläutert und diskutiert. Dabei fand die Vorgehensweise bei allen Konstrukteuren wegen ihrer Kompatibilität mit VDI 2221 weitgehende Akzeptanz, es wurde aber die Wichtigkeit eines leistungsfähigen, benutzerfreundlichen wissensbasierten Systems zur Unterstützung der Methodik und insbesondere zur Erstellung des Schallflußmodells zum Ausdruck gebracht.

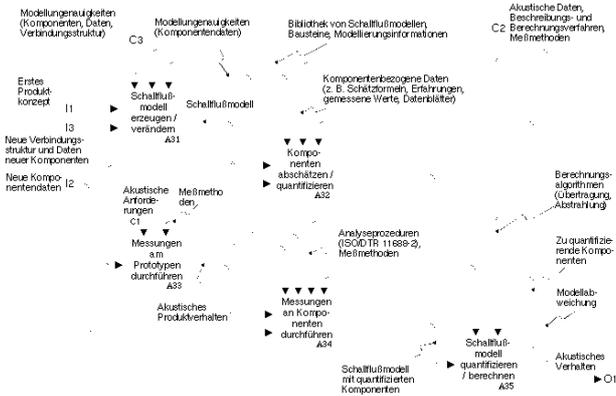


Bild 7. Unteraktivitäten A31 bis A35 der Aktivität A3 „Akustisches Produktverhalten beschreiben“ in SADT-Darstellung

4.3 Entwicklung des Informationsmodells

Die Ausführung der im vorhergehend aufgeführten Handlungsmodell beschriebenen Aktivitäten benötigt maschinenakustische Informationen, die eindeutig und formal abgelegt werden müssen. Das hierfür notwendige Informationsmodell beinhaltet alle maschinenakustisch relevanten Komponenten und Schallentstehungsmechanismen, maschinenakustische Produkthanforderungen mit den dazugehörigen Dokumenten, Konstruktionsregeln, Rechenregeln, Konstruktionsbeispiele usw. Für den Konstrukteur besonders wichtig ist die Verbindung zwischen Maschinenstruktur und Geräuschmechanismen, das heißt die Information darüber, welche Schallentstehungsmechanismen für seine Konstruktion wichtig sind und in welchen Komponenten sie auftreten. Im Rahmen eines Projektes /10/ wurden 12 grundlegende Körperschallquellen und 16 grundlegende Luft- und Flüssigkeitsschallquellen beschrieben. Die Modellierung für diese Informationen geschieht mit EXPRESS /7/, eine für den internationalen Standard zum Produktdatenaustausch STEP (Standard for the Exchange of Product Data) entwickelte Sprache /11/.

Die Entwicklung des Modells erfolgt durch Sammlung und Klassifizierung von Komponenten und Schallentstehungsmechanismen, durch den Aufbau einer Hierarchie dieser Klassen und durch die Ausführung aller für die maschinenakustische Beschreibung wesentlichen Attribute. Damit können die komponenten- und mechanismenspezifischen Informationen an die Hierarchie gekoppelt werden. Damit ist die Beschreibung eines Objektes (z.B. einer bestimmten Komponente) durch seine Position in der Hierarchie und seine zugehörigen Attributwerte sichergestellt. **Bild 8** zeigt als Beispiel für die Untergliederung einer Hierarchie die Unterklas-

sen von elektrischen Maschinen, **Bild 9** die Unterklassen von Körperschall, wie sie aus **Bild 4** ableitbar sind.

Die Elemente werden mit Hilfe von Koppelpunkten miteinander verbunden, um so die Schalleitung und Interdependenzen zu beschreiben. Hierzu wird eine Klasse NPM_ports (Noise Path Model ports) eingerichtet, die das Interface jedes Elements beschreiben. Die Koppelpunkte werden durch eine Instanz der Klasse NPM_ports für jede Instanz eines Elements beschrieben. In diese Instanz werden Werte der Attribute der Schallübertragung eingetragen, die bereits für die Elemente vordefiniert sind. Danach werden die Koppelpunkte miteinander verbunden, wobei eine Überprüfung bezüglich der Art der Schallübertragung vorgenommen wird.

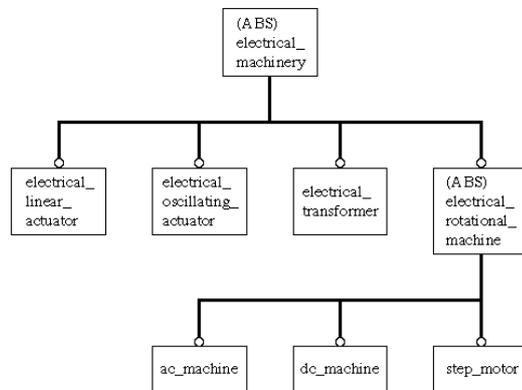


Bild 8. Unterklassen von electrical_machinery /13/

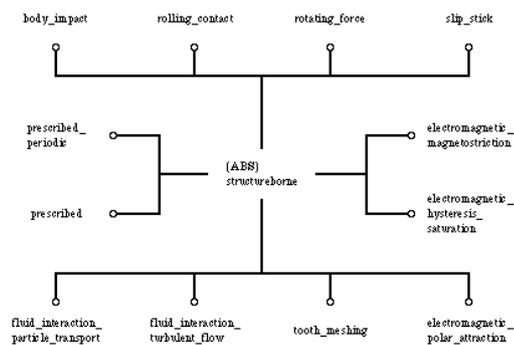


Bild 9. Unterklassen von structureborne /13/

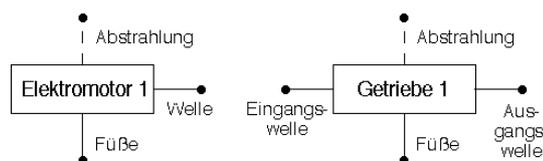


Bild 10. Darstellung zweier Instanzen mit ihren Koppelpunkten zur Aufstellung des Schallflußmodells. Element Elektromotor 1 entwickelt aus der Unterklasse ac_machine, **Bild 8**, Element Getriebe 1 entwickelt aus einer Unterklasse gear_box

Die Vorgehensweise sei an einem Beispiel näher erläutert: Zur Verbindung eines Elektromotors mit einem Getriebe wird je eine Instanz aus den entsprechenden Klassen gebildet. Das System kopiert die zugehörigen Informationen zu den Koppelpunkten in die Instanz. Die entsprechenden Repräsentationen zeigt **Bild 10**, diese Bilder erscheinen auch auf dem Bildschirm.

Instanz „Elektromotor 1“	
Attributname	Wert
number_of_ports	3
name_of_port [1]	Welle
kind_of_port [1]	Körperschall
connected_to_port [1]	
connected_to_component [1]	
name_of_port [2]	Füße
kind_of_port [2]	Körperschall
connected_to_port [2]	
connected_to_component [2]	
name_of_port [3]	Abstrahlung
kind_of_port [3]	Luftschall
connected_to_port [3]	
connected_to_component [3]	

Tabelle 3. Vorgabewerte der Koppelpunkte für Elektromotor 1, entwickelt aus der zum Elektromotor 1 gehörenden Instanz von NPM_ports

Instanz „Getriebe 1“	
Attributname	Wert
number_of_ports	4
name_of_port [1]	Eingangswelle
kind_of_port [1]	Körperschall
connected_to_port [1]	
connected_to_component [1]	
name_of_port [2]	Füße
kind_of_port [2]	Körperschall
connected_to_port [2]	
connected_to_component [2]	
name_of_port [3]	Ausgangswelle
kind_of_port [3]	Körperschall
connected_to_port [3]	
connected_to_component [3]	
name_of_port [4]	Abstrahlung
kind_of_port [4]	Luftschall
connected_to_port [4]	
connected_to_component [4]	

Tabelle 4. Vorgabewerte der Koppelpunkte für Getriebe 1, entwickelt aus der zum Getriebe 1 gehörenden Instanz von NPM_ports

Tabelle 3 und **4** enthalten die Attribute der Koppelpunkte dieser Instanz. Zur Herstellung der Verbindung greift der Konstrukteur interaktiv ein: Im vorliegenden Beispiel soll es sich um ein angeflanshtes Getriebe handeln. Er führt also beim Elektromotor einen vierten Koppelpunkt „Flansch“ ein und ersetzt beim Getriebe die „Füße“ (Port 2) durch „Flansch“. Danach werden die Verbindungen hergestellt, **Bild 11**.

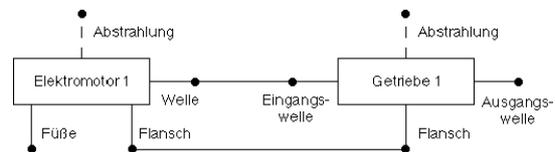


Bild 11. Darstellung der beiden Instanzen nach der Herstellung der Verbindung

Mit dieser Modellierung ist der Weg frei für eine Quantifizierung auch hinsichtlich der Schallübertragung und Abstrahlung, wenn die Werte der jeweiligen Instanzen vollständig bekannt sind. Ein vollständiges Schallflußmodell der beschriebenen Art enthält **Bild 6**.

Durch die Definition weiterer Klassen können Formeln, Konstruktionsbeispiele oder weitere Informationen eingebunden werden, die bei der Instanziierung aktiviert werden. Hierdurch sind einerseits Berechnungen des gesamten Schallflußmodells möglich, andererseits können die kontextsensitiven qualitativen Informationen den Konstrukteur zu neuen Problemlösungsmöglichkeiten führen oder ihn z.B. anhand von Beispielen über ausgeführte schalltechnische Maßnahmen informieren. **Bild 12** zeigt die Präsentation eines solchen Beispiels mit Zuordnungsfunktionen.

5 Zusammenfassung

Die maschinenakustischen Eigenschaften eines Produkts werden weitgehend in der Konstruktion festgelegt, Konstrukteure besitzen im allgemeinen aber keine Ausbildung als Akustiker. In diesem Beitrag wird die Entwicklung einer rechnergestützten Methode und eines Informationssystems beschrieben, das unter Wahrung der generellen Vorgehensweise der Produktentwicklung nach VDI 2221 die Einbindung maschinenakustischen Wissens in den Konstruktionsprozeß ermöglicht. Kernpunkt der Vorgehensweise zur Entwicklung lärmarmere Produkte ist die Kopplung der Maschinenstrukturen mit den physikalischen Geräuschensteherungsmechanismen mit Hilfe eines Schallflußmodells.

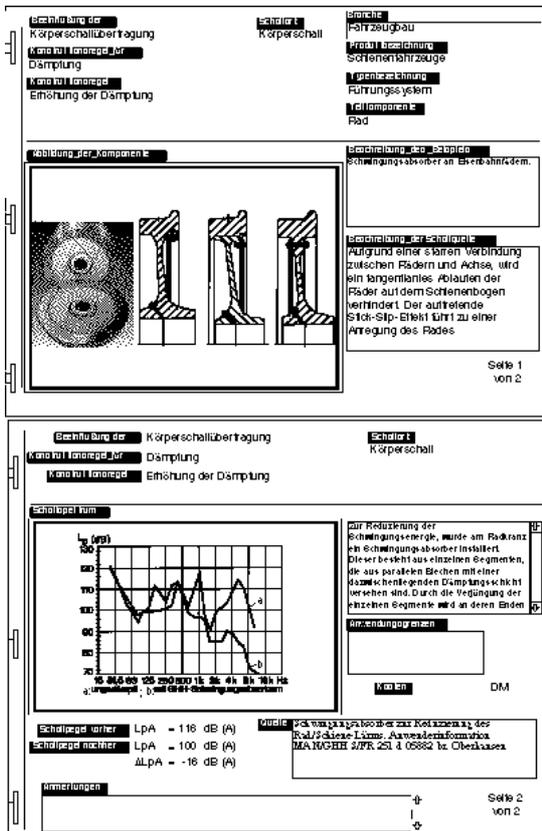


Bild 12. Darstellung eines Beispiels mit entsprechenden Zuordnungen im wissensbasierten System zur Konstruktionsberatung

Die Darstellung enthält zwei Modelle: Eines, welches dem Beratungssystem zugrundeliegt und damit auch die Grundlage der Wissensbasis darstellt. Im zweiten, dem Informationsmodell, das der Benutzer nach seinen eigenen Vorgaben aufbauen kann (vergl. Beispiel Bild 10 ff), werden die für die Entwicklung lärmarmen Produkte benötigten Informationen und ihre Beziehungen untereinander in einer Analyse beschrieben.

6 Literatur

- /1/ Haje, D.; Gummersbach, F.; Schmidt, A.: Inquiry Results about Low Noise Design. Bericht zum BRITE-EURAM II Project No. 5983, „EQUIP“. 1993. Unveröffentlicht.
- /2/ Kurtze, G.; Dietz, P.: Lärmarm Konstruieren XIII – Schalltechnische Regeln und Konstruktionsmethodik. Forschungsbericht Nr. 424 der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung. Bremerhaven: Wirtschafts-verlag Nordwest, 1985
- /3/ ISO/TR 11688: Acoustics –Recommended Practice for the Design of Low-Noise Machinery and Equipment. Part 1: Planning, Part 2: Introduction into Physics of Low-Noise

Design. International Standardisation Organisation. Genf, März 1995.

Dieser internationale Fachbericht ist z.T. mit Entwurf vom Juni 1997 als Normentwurf DIN 45685-1 Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen Maschinen und Geräte, Teil 1: Planung unverändert übersetzt worden

- /4/ VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Hersg. VDI. Düsseldorf, 1993
- /5/ Müller, H.W.: Praxisreport Maschinenakustik. Berechnungs- und Abschätzverfahren für Maschinengeräusche. Forschungsberichte FKM 102. Darmstadt 1983
- /6/ Haje, D.: Lärmarm Konstruieren XVII. Entwicklung eines Informationssystems zur Konstruktion lärmarmen Produkte. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin – Forschung- Fb 768. Dortmund/Berlin 1997
- /7/ ISO 10303-11: Product Data Representation and Exchange. Part 11: The EXPRESS Language Reference Manual. International Standardisation Organisation. Genf, 1994
- /8/ Specifications for INTEGRATION DEFINITION FOR FUNCTION MODELLING (IDEFO). Federal Information Processing Systems, USA, 1992
- /9/ Marca, D.A.; McGowan, C.L.: SADT, Structured Analysis and Design Technique. McGraw-Hill Book Company, New York 1986
- /10/ Dittrich, M.: Help on NGMs. Brief Description of EQUIP Noise Generation Mechanisms. EQUIP international document. TNO-TPD Delft, August 1996
- /11/ Dietz, P.; Ort, A.: Überführung einer Spezifikation in EXPRESS in die Entwicklungsumgebung KAPPA. Institutsmitteilungen Nr. 20 , IMW Clausthal 1995.
- /12/ Dietz, P.: Konstruieren – Kunst oder Handwerk. Institutsmitteilungen Nr. 21 , IMW Clausthal 1996
- /13/ Haje, D.; Gummersbach, F.; Isranuri, I.; Pico, M.; Pelletier, P.: EQUIP Technical Report – Subtask II.3. Structuring of Information. EQ-TR-II.3e. Abschlußbericht II.3, Clausthal, Januar 1996, unveröffentlicht.

Ansätze zur Schallminderung am Beispiel einer elektrisch angetriebenen Transporteinheit

Gummersbach, F.; Käferstein, B.

Am Institut für Maschinenwesen wurden Untersuchungen zur Lärminderung an einer linearen elektrisch angetriebenen Transporteinheit durchgeführt. Dazu wurde nach ISO 11688-1 vorgegangen und mithilfe von Luft- bzw. Körperschallmessungen die stärksten Schallquellen identifiziert. Entsprechende Maßnahmen wurden erarbeitet und konnten erfolgreich durchgeführt werden.

At the IMW research on an electrical driven linear motion unit were carried out to reduce noise emission. The well known technical rules in ISO 11688-1 were applied as working to identify the main noise sources by air and structure borne noise measurements. Appropriate methods to decrease sound emission were suggested and successfully applied.

1 Einleitung und Problemstellung

Neben wirtschaftlichen und mechanischen Produktanforderungen gewinnen auch maschinenakustische Ansprüche aufgrund verschärfter gesetzlicher Bestimmungen des Arbeits- und Immissions-schutzes sowie steigender Marktanforderungen an Bedeutung.

Zur Erweiterung der Produktpalette elektrisch angetriebener Transporteinheiten wurde eine kleine und leichtere Variante entwickelt. Nach Fertigung des Prototypen stellte sich heraus, daß diese im Betrieb einen um 5 dB(A) höheren Schalldruckpegel aufwies als die größte Variante.

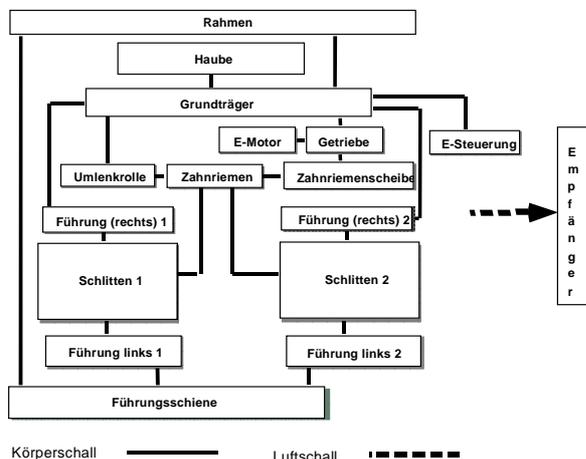


Bild 1: Schallflußmodell der Transporteinheit

Daher wurde eine schalltechnische Untersuchung durchgeführt, die eine Geräuschminimierung am Antrieb der Transporteinheit zum Ziel hatte.

Vereinbart wurde folgende Vorgehensweise:

- Theoretische Untersuchungen der Schallerzeugung, -weiterleitung und -abstrahlung aufbauend auf der „Schallentstehungskette“
- Akustische Analyse des Ist-Zustandes an der Transporteinheit auf Basis von Körper- und Luftschallmessungen und Erarbeitung von primären und sekundären Schallminderungsmaßnahmen.

2 Analyse der Transporteinheit

In einer schalltechnischen Analyse wurde die Transporteinheit einer qualitativen und quantitativen Betrachtung unterzogen. Die qualitative Analyse erfolgte, entsprechend ISO 11688-1 /1/, anhand eines Schallflußmodells, welches komponentenorientiert aufgebaut ist und die Sichtweise des Konstrukteurs repräsentiert. Es entspricht somit einer abstrahierten Darstellung seines Konstruktionsobjektes und enthält keine quantitativen maschinenakustischen Angaben, sondern bildet die gesamte Schallentstehungskette (Quelle, Übertragungswege und Abstrahlung) ab. Eine quantitative Beurteilung des akustischen Verhaltens der Transporteinheit erfolgt anhand der durchzuführenden Körper- und Luftschallmessungen.

2.1 Schallflußmodell

Die Erstellung eines Schallflußmodells erfolgt durch die Auswahl der vorhandenen Komponenten, z.B. mittels einer Stückliste, und der möglichen Schallübertragungswege, die sich im vorliegenden Fall in Körperschall und Luftschall untergliedern. Den „Empfänger“ repräsentiert letztendlich der Mensch, auf den der Luftschall einwirkt, siehe **Bild 1**.

2.2 Qualitative schalltechnische Beurteilung der Schallentstehungskette

Zur weiteren Detaillierung und Beurteilung der im Schallflußmodell enthaltenen Schallquellen, Schallleitungswege und der Abstrahlungsmöglichkeiten erfolgte eine komponentenorientierte Auflistung mit den zugehörigen Schallentstehungsmechanismen.

Schallentstehungsmechanismus	Komponente / Bauteil	Bewertung	Kommentar
Zahneingriff (K)	1. Übersetzungsstufe (Getriebe)	A	Zahneingriff (bei Zahnradern) stellt in der Regel immer einen starken Körperschallerreger dar. Geräuschverhalten hängt stark von Zahnform, -breite, Riemengeschwindigkeit und der zu übertragenden Leistung ab.
	2. Übersetzungsstufe (Getriebe)	A	
	Zahnriemen-Zahnriemenscheibe (Getriebe)	A/B	
	Zahnriemen-Zahnriemenscheibe (Umlenkung)	A/B	
Stoß (Spiel) (K)	Reversiervorgang (Getriebe)	A	Stellt in der Regel starke Körperschallerreger dar, gerade dann wenn dabei hohe Kräfte entstehen.
Rollgeräusche (K)	Rollenführung (oben)	A	Stark abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit und der Materialsteifigkeit.
	Lagerung 1 (Getriebe)	B	
	Lagerung 2 (Getriebe)	B	
	Lagerung (Umlenkung)	B	
Lagerung (oben)	B		
...

(L: Luftschall, K: Körperschall) / A : sehr relevant; B: weniger relevant; C: vernachlässigbar

Tabelle 1 Auflistung (ausschnittsweise) der Schallentstehungsmechanismen

Dies soll im weiteren nicht näher dargelegt werden, da nur primäre Lärminderungsmaßnahmen im Vordergrund stehen sollen. Diesbezüglich sei nur abschließend das Ergebnis in Form eines Schallflußmodells gezeigt, **Bild 2** Die hervorgehobenen Komponenten und Schalleitungspfade geben die relevantesten Ansatzmöglichkeiten zur Ermittlung von Lärminderungsmaßnahmen an.

Tabelle 1 gibt eine subjektive Einschätzung des Beitrags zum Gesamtgeräusch wieder.

Die Auflistung zeigt, daß bis auf zwei Luftschallquellen nur Körperschallquellen im System vorhanden sind. Als Luftschallquellen können der Zahnriemen wegen der pulsierenden Luftverdrängungsprozesse während des Zahneingriffs, sowie Turbulenzen aufgrund von Relativbewegungen zwischen Luft und Festkörpern gesehen werden, die aber aufgrund der relativ geringen Geschwindigkeiten zu vernachlässigen sind.

Als wesentliche Schallquellen können unter Berücksichtigung der Bewertung, die Übersetzungsstufen des Getriebes, der beim Reversiervorgang auftretende Stoß, die Rollgeräusche der Lastenführung sowie prinzipiell die Verfahrwegbegrenzungen des Schlittens genannt werden. Des weiteren muß beim Zahnriemen der Zahneingriffsstoß in Betracht gezogen werden. Die Steuereinheit kann mittel- und unmittelbarer Schallerzeuger sein. So können einige Bauteile der Steuerung aufgrund von Schaltprozessen Geräusche abgeben (z.B. Relais) und sie ist auch für die auftretenden Massenkkräfte beim Reversiervorgang der Schlitten verantwortlich, welche die Drehmomente des Motor vorgeben. Entsprechend der Auflistung und Beurteilung der Schallquellen erfolgte analog die Betrachtung der Schalleitungswege und der luftschallabstrahlenden Komponenten.

3 Nähere Betrachtung der Antriebseinheit

Nach einer quantitativen schalltechnischen Analyse der Transporteinheit konnte eindeutig die Hauptschallquelle ermittelt werden. Aus den aufgelisteten aktiven Komponenten mit deren Schallentstehungsmechanismen stellte sich die zugekaufte Antriebseinheit (Getriebemotor) als der hauptsächliche Geräuschverursacher heraus. In einem Versuch wurde die Antriebseinheit vom großflächigen Grundträger komplett entkoppelt, so daß die Körperschallübertragung unterbunden wurde. Der Erfolg der Maßnahme zeigte sich durch eine Schalldruckpegelminderung von $L_{pA} = 17 \text{ dB(A)}$. So konnte klar gezeigt werden, daß für eine effiziente Geräuschminderung als sekundäre Maßnahme die Schwingungsisolierung und für den primären Bereich weitere schalltechnische Betrachtungen der involvierten Schallentstehungsmechanismen der Antriebseinheit notwendig wurden.

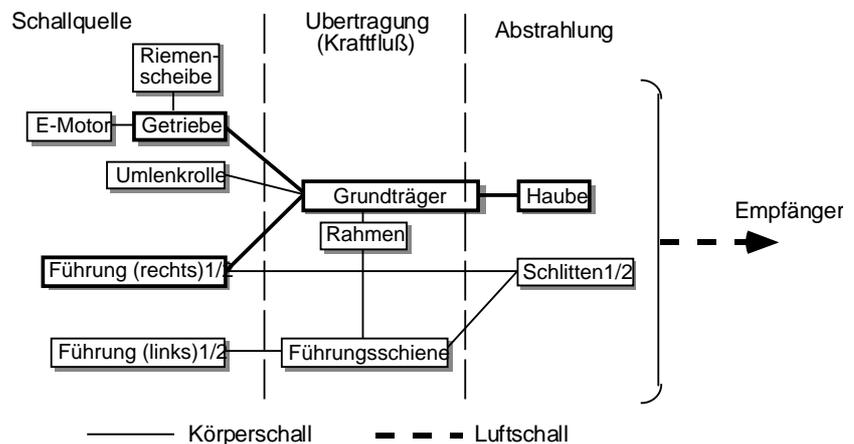


Bild 2: Schallflußmodell entsprechend der Schallentstehungskette

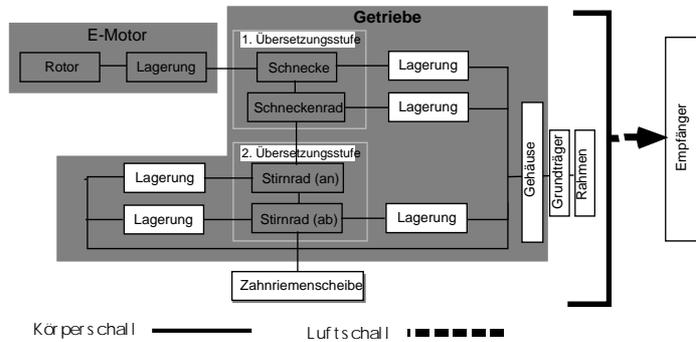


Bild 3: Schallflußmodell der Antriebseinheit (E-Motor und Getriebe im Detail)

3.1 Schallflußmodell der Antriebseinheit

In **Bild 3** wurde die Antriebseinheit näher betrachtet und in Form eines Schallflußmodells dargestellt, das die Schallübertragungswege als Körper- und Luftschall enthält.

Das detaillierte Schallflußmodell des Antriebs stellt schalltechnisch gesehen auch den Versuchsaufbau dar. Zur Analyse der Schallquelle (Getriebe) reichte ein vereinfachter Versuchsaufbau aus, der aus schalltechnischer Sicht die wesentlichen Komponenten (Motor mit Getriebe, Grundträger bzw. Kämpfer und Haube) beinhaltet.

Eine nähere Betrachtung des Schallflußmodells läßt als grundsätzliche Geräuschquellen die Zahneingriffsverhältnisse sowie die Rollgeräusche der Lagerungen erkennen, wobei die 2. Übersetzungsstufe des Getriebes (Stirnradverzahnung) als hauptsächli-

cher Geräuschverursacher angesehen werden kann.

4 Lärminderungsmöglichkeiten

Basierend auf den vorherigen Betrachtungen erfolgte eine nähere Berücksichtigung der Maßnahmen zur Beeinflussung des Zahneingriffs.

Bild 4 verdeutlicht die Anregungsmechanismen beim Zahneingriff und unterteilt diese in 3 Kategorien.

So können der Zahnfedersteifigkeitsverlauf, die Weganregung durch Flankenformabweichungen und Störungen aufgrund des Eingriffsstoßes als die wesentlichen Anregungsmechanismen angesehen werden

	Beeinflussung der Quelle	Kurzbeschreibung der Maßnahme	Bewertung
1	Erhöhung der Eingriffsdauer	Erhöhung der Gesamtüberdeckung durch Hoch- und/oder Schrägverzahnung	A
2	Verwendung von Schrägverzahnung	Einsatz einer Schrägverzahnung mit möglichst ganzzahliger Sprungüberdeckung	A
3	Erhöhung der Zähnezahl	z.B. durch Verkleinerung des Moduls	B
4	Verbesserung der Qualität	Zahnform, Zahnteilung etc. mit sehr geringen Fehlern anfertigen, da diese auch bei schwachen Belastungen zu hohen Geräuschanteilen führen können	A
5	Verwendung von Kunststoffzahnradern bei geringen Belastungen	Ersatz des Stahlzahnrades durch ein Kunststoffzahnrad	A/B
6	Kopf- und Fußrücknahme	Flankenkorrektur	B
7	Verringerung der spezifischen Zahnkraft	Verwendung von breiteren Zähnen (nur bei geringen Teilungsfehlern sinnvoll)	B
8	Verwendung weicherer Zähne zur deutlichen Verringerung des Eingriffstoßes	Höhere Zähne und Verwendung von Kunststoffzahnradern	A/B

A : sehr relevant; B: weniger relevant; C: vernachlässigbar

Tabelle 2: Maßnahmen zur Beeinflussung des Zahneingriffs

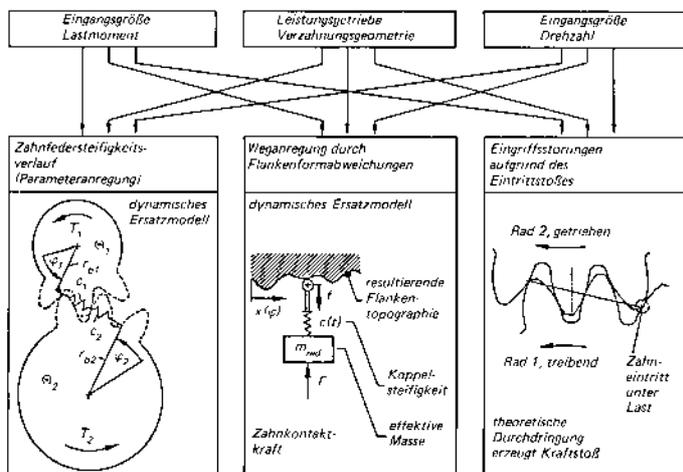


Bild 4 Wesentliche Anregungsmechanismen beim Zahneingriff /2/

Für die Beeinflussung der Körperschallquelle (Zahneingriff) ergeben sich nach ISO/TR 11688-1 /1/ die in **Tabelle 2** aufgeführten Maßnahmen. Unter Berücksichtigung der jeweils vorliegenden Randbedingungen, können die möglichen Maßnahmen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten einer Bewertung unterzogen werden, um somit die günstigste Lösung auszuwählen. Hierzu ist eine quantitative Analyse der Zahneingriffsverhältnisse notwendig um den genauen Grund der Geräuschregung zu ermitteln.

Dazu wird in den folgenden Kapiteln auf die schallmeßtechnische Analyse eingegangen.

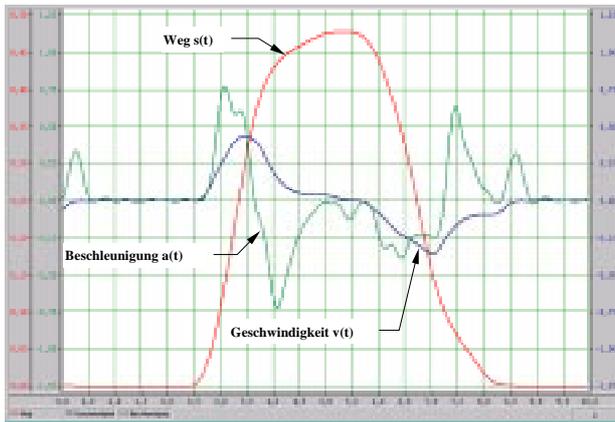


Bild 6: Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Schlittens in Abhängigkeit von der Zeit während eines Transportzyklus

5 Mögliche Messungen zur Identifikation von Körperschallquellen

5.1 Fahrbewegung und Beschleunigungskurven

Es ist allgemein bekannt, daß eine unstetige Beschleunigungskurve aufgrund der wirkenden Kraftsprünge zu Geräuschanregungen führt. Deshalb ist man bestrebt, eine Bewegung stoß- und ruckfrei auszuführen um die zeitliche Änderung der Kräfte stetig zu gestalten. Zur Beurteilung der Dynamik der Transporteinheit, wurden Wegmessungen über den Fahrzyklus vorgenommen und diese nach der Zeit differenziert, **Bild 6**. Man erkennt deutlich die Spitzen in der Beschleunigungskurve,

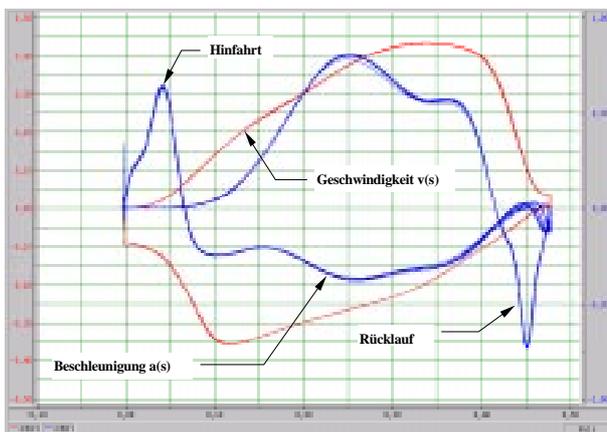


Bild 7: Geschwindigkeit und Beschleunigung über den Weg aufgetragen

die man glätten muß, indem man das Motorverhalten oder die Kinematik ändert. Im vorliegenden Fall ist der Motor schon aus anderen Gründen geregelt, so daß man die notwendigen Einstellungen ohne Zusatzaufwand vornehmen kann.

Da eine Interpretation der Beschleunigungskurve meist einfacher ist, wenn man nicht zeitliche Verläufe betrachtet, sondern sich auf die jeweilige Po-

sition bezieht, wurde die Geschwindigkeit und die Beschleunigung auch über den Weg aufgetragen, **Bild 7**. Dort sind lokale Ereignisse wie z.B. das Fahren an einen Anschlag oder Erhöhung der Transportkraft leichter zu erkennen und mit den Meßdaten in Beziehung zu setzen.

5.2 Luftschallpegel in Abhängigkeit von kinematischen Kenngrößen

Zur weiteren Analyse wurde der Luftschallpegel aufgenommen und über Bewegungskenngrößen aufgetragen:

- Aus der Darstellung über den Weg können positionsabhängige Schallereignisse erkannt werden wie z.B. Stick-Slip-Effekte, Rattern, Anfahren an einen Anschlag, Einrasten von Sperrklinken etc.
- Die Abhängigkeit des Pegels von der Geschwindigkeit läßt Aussagen über Geräusche zu, die mit steigender Drehzahl lauter werden, z.B. Lüftergeräusche, unwuchterregte Geräusche oder Strömungsgeräusche.
- Durch ein Luftschallpegel-Beschleunigungsdiagramm, **Bild 5**, lassen sich bei Maschinen mit dynamischen Massen, wie bei der untersuchten Lineartransporteinheit, trägheitskraftabhängige Geräusche auffinden, z.B. leistungsabhängige Schallereignisse beim Hochfahren und Abbremsen, Kupplungsgeräusche, Spiel oder Anfahrgeräusche in Elektromotoren. Dabei ist es immer das Ziel, bei möglichst hoher Dynamik eine geringe Geräusentwicklung hervorzurufen, so daß beim Vergleich unterschiedlicher Varianten die Kurven für die bessere Lösung breiter und flacher werden müssen.

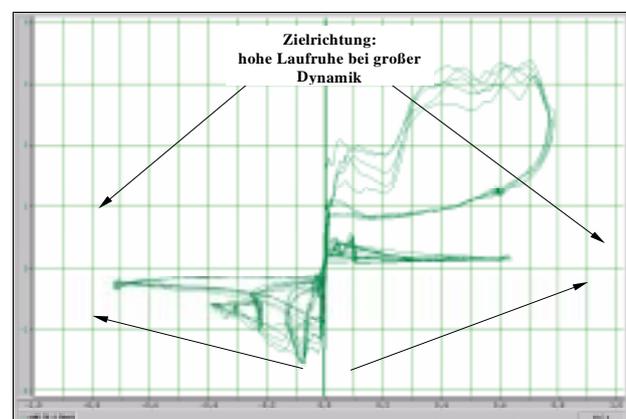


Bild 5: Schallpegel über die Beschleunigung aufgetragen.

5.3 Tragbildanalyse des Antriebsgetriebes

Wie schon in Kapitel 3 erläutert, hat sich schnell die Antriebseinheit als relativ starke Schallquelle herauskristallisiert. Neben der Analyse der idealen Verzahnungsdaten hinsichtlich Sprungüberdeckung, Gesamtüberdeckung und Fertigungsqualität kann anhand einer Tragbildanalyse zumindest qualitativ auf die Schallentstehungsmechanismen durch den Zahneingriff geschlossen werden, **Bild 8**. Abweichungen im Tragbild können durch folgende Störgrößen auftreten und Körperschallquellen bilden /2/:

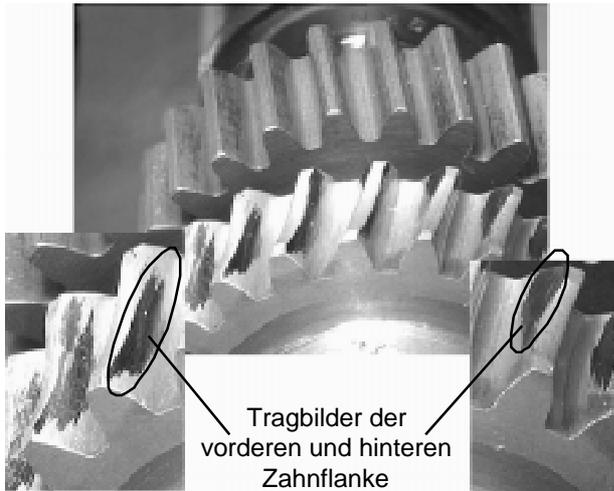


Bild 8: Tragbilder der Schnecken- und Stirnradstufe der Antriebseinheit

- lastbedingte Deformationen der im Eingriff befindlichen Zahnpaare
- lastbedingte Deformationen und Verlagerungen der im Kraftfluß liegenden Wellen-, Lager- und Gehäuseteile
- fertigungsbedingte Verzahnungsabweichungen,
- fertigungs- und montagebedingte Einbau- und Einstellabweichungen
- betriebsbedingte thermische Deformationen und Verlagerungen.

5.4 Körperschallmessungen am Getriebe

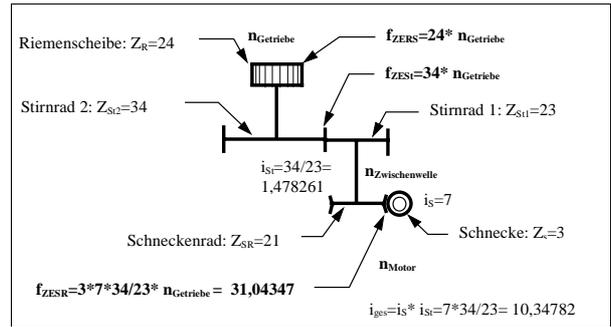


Bild 10: Vielfache der Eingriffsfrequenzen für ein zweistufiges Getriebe mit Zahnriemenantrieb und Elektroantrieb

Zur Beurteilung der Getriebegeräusche werden Körperschallmessungen mit Beschleunigungsaufnehmern durchgeführt und in einer Selektivanalyse mit Hilfe einer Fouriertransformation das Frequenzspektrum untersucht. Da verschiedene Betriebspunkte angefahren werden, wird die Drehzahl mit aufgenommen, und die Frequenzachse durch sie geteilt und so normiert, **Bild 9**. Sollten drehzahlabhängige Geräusche im Signal vorhanden sein, so sind diese auf der normierten Frequenzachse ortsfest. Überrollgeräusche in Lagern oder aus dem Zahneingriff treten fast immer als Harmonische des Produktes aus Drehzahl und Überrollfrequenz bzw. Zahneingriffsfrequenz auf. Zu einer einfachen Beurteilung eines formschlüssigen Getriebes kann man dann die Summenpegel der einzelnen Harmonischen für eine Körperschallquelle bei verschiedenen Betriebsdrehzahlen bilden und vergleichende Betrachtungen anstellen, wenn die Verzahnungs- und Lagerdaten bekannt sind, **Bild 10**. Die akustischen Eigenschaften, für die im wesentlichen auch für das Eigenschwingungsverhalten der Struktur verantwortlich ist, müssen immer unter Beachtung der Randbedingungen interpretiert werden. Diese sind durch die Impedanz festgelegt, also den Teilgrößen Steifigkeit und Masse des angrenzenden Körpers. Durch sie wird bestimmt, wie

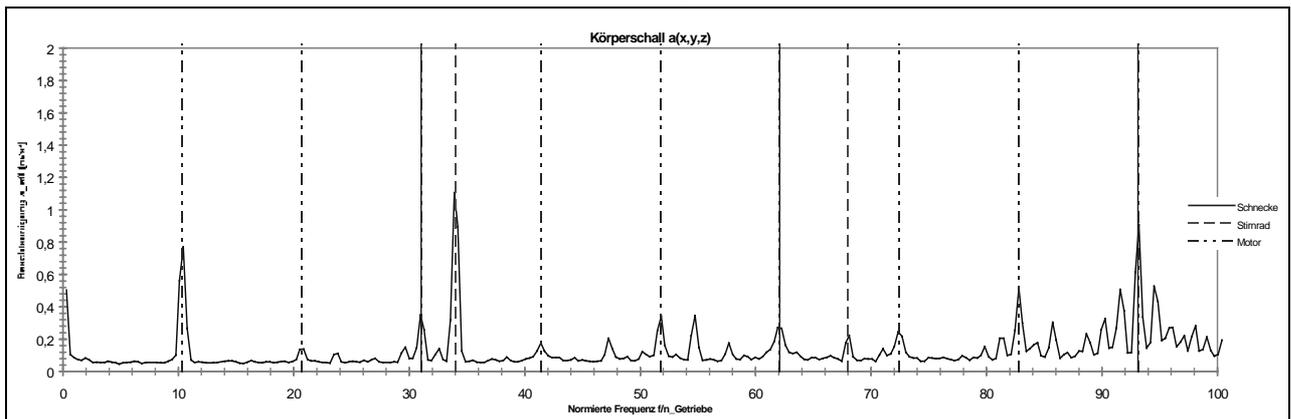


Bild 9: Drehzahlnormiertes FFT-Spektrum mit Linien der Harmonischen für unterschiedliche Schallquellen

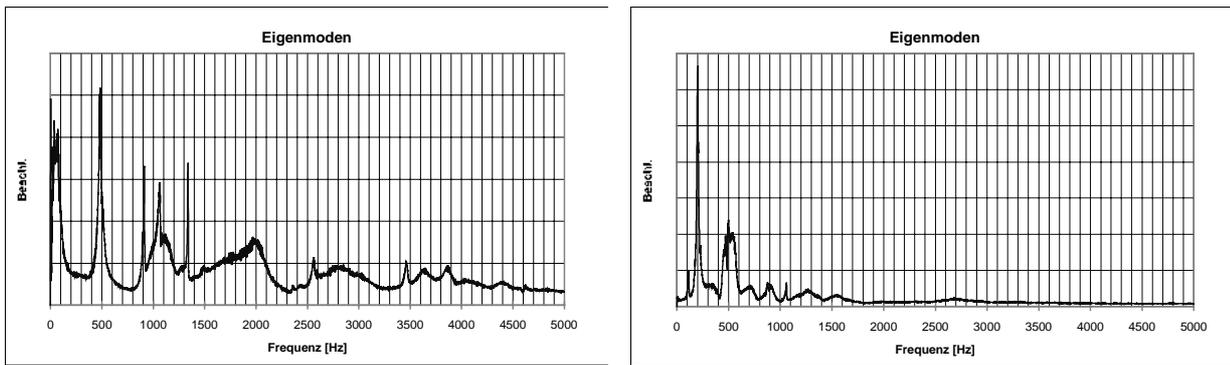


Bild 11: Eigenschwingungsformen der Antriebseinheit frei hängend (links) und an einem großen Betonklotz befestigt (rechts) bei Impulsanregung

die Glieder im Schallflußmodell bei Kraft- oder Geschwindigkeitserregung reagieren und welche Frequenzen besonders gut angeregt werden. Die Beeinflussung der Randbedingungen kann meist durch Änderung an der Einspannung vorgenommen werden, **Bild 11**. Impedanzsprünge durch Querschnittsänderungen oder Steifigkeitsänderungen bieten die Möglichkeit die Eigenfrequenzen eines Systems soweit zu verlagern, daß sie nicht mehr mit den Anregungsfrequenzen zusammentreffen und eine ungünstige Verstärkung auftritt, **Bild 13**.

Dabei ist zu beachten, daß im Gegensatz zu Maßnahmen zur Dämpfungserhöhung Impedanzänderungen als sogenannte Dämmmaßnahmen immer nur frequenzselektiv nutzbar sind, da die Schallenergie zwar reflektiert, aber nicht dissipiert wird. Ein entsprechender Abgleich ist daher immer für jedes System individuell auszuarbeiten, **Bild 12**.

6 Zusammenfassung

Die Vorgehensweise nach ISO 11688-1 erweist sich für den Praxiseinsatz als hervorragendes Mittel, Lärminderungsaufgaben strukturiert und geordnet durchzuführen. Sie bietet nicht nur die Mög-

lichkeit anhand des Schallflußplans die Übertragungswege zu verbildlichen, sondern vereinfacht auch die Vorgehensweise zur Aufstellung eines übersichtlichen Meßplans. Die Suche nach der Hauptschallquelle gestaltet sich messtechnisch nicht immer einfach, und der Erfolg von durchgeführten Maßnahmen zur Schallminderung hängt von Randbedingungen ab, die meist nur schwer zu erfassen sind. Letztendlich entscheidet nicht die absolute erreichte Pegelminderung über eine Realisierung der Maßnahmen, sondern das Verhältnis aus Aufwand und Erfolg.

7 Literaturverzeichnis

- /1/ ISO/TR 11688: Acoustics - Recommended practice for the design of low-noise machinery and equipment. Part 1: Planning, International Standardisation Organisation. Genf, März 1995.
- /2/ VDI-Richtlinie VDI 3720-9 Lärmarm Konstruieren -Zahnradgeräusche-; Blatt 9.1 VDI-Verlag Düsseldorf 1990

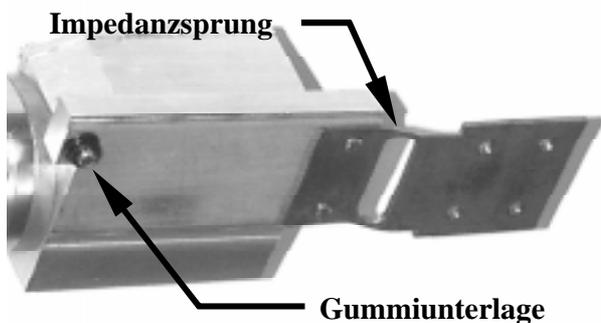


Bild 13: S-förmig gebogenes Blech mit Nut als Impedanzsprung

Luftschallpegel in Abhängigkeit vom Betriebszustand mit Zusatzblech

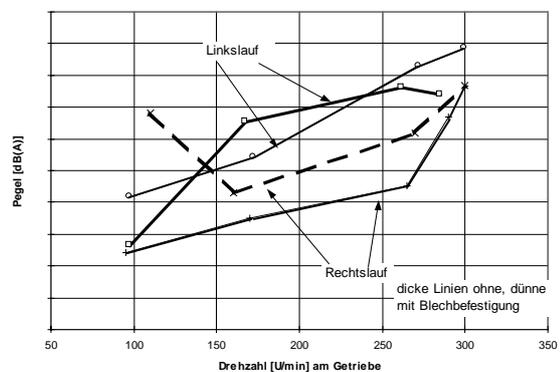


Bild 12: Pegeländerung durch Eingangsimpedanzänderung

Tradition und Zukunft: Die Clausthale Konstruktionswoche – CKW'99

Müller, N.

Das Institut für Maschinenwesen möchte eine alte Tradition wieder aufleben lassen und wird die bereits in den dreißiger Jahren vom damaligen Institutsdirektor Prof. Süchting veranstalteten Sommerkurse in einer anderen, neuen Form durchführen: Die Clausthale Konstruktionswoche – CKW'99

Following the old tradition of the summer courses of the former director of the institute Professor Süchting, the Institute of Mechanical Engineering will organize a design course called the Clausthale Konstruktionswoche – CKW'99. Within the run of one week, the participants will gain information about new tendencies in design, material, computer aided techniques, machine elements, metrology and other subjects related to design and their relevant research.

Der langjährige Direktor des Instituts für Maschinenkunde und Elektrotechnik der damaligen Bergakademie Clausthal, Prof. Fritz Süchting, führte in den frühen dreißiger Jahren mehrtägige Sommerkurse durch, in denen die Teilnehmer, die aus den verschiedensten Firmen und Branchen kamen, ihren Kenntnisstand in ausgewählten technischen Fachdisziplinen erweitern und vertiefen konnten. Diese Sommerkurse fanden bei der Industrie ein positives Echo und wurden als Weiterbildungsangebot dankend angenommen.

Diese Idee möchte das IMW nach über 60 Jahren wieder aufgreifen und wird im kommenden Jahr vom 20.9.-24.9.1999 die Clausthale Konstruktionswoche (CKW'99) durchführen. Die Veranstaltung richtet sich an alle Ingenieure und Techniker, die in der Entwicklung und Konstruktion von Produkten tätig sind. Darüber hinaus sind auch Fertigungstechniker, Arbeitsvorbereiter u.a. angesprochen, die ihre Kenntnisse im Umfeld der Produktentwicklung auffrischen und neue Möglichkeiten kennenlernen wollen. Die Tagungsthemen sind breitgefächert und werden von Dozenten aus der Industrie und von der TU Clausthal vorgetragen. In den Kaffeepausen und den begleitenden Abendveranstaltungen wird zudem genügend Gelegenheit sein, neue Kontakte zu anderen Tagungsteilnehmern und Dozenten zu

knüpfen und auf spezielle Fragestellungen vertieft einzugehen.

Jeder Tag der CKW'99 wird thematische Schwerpunkte haben, so daß den Interessierten auch die tageweise Teilnahme an der Clausthale Konstruktionswoche ermöglicht werden kann. Fest geplant sind Vorträge, Übungen und Praktika zu folgende Themen:

C-Techniken: C-Technik-Anwendungen mit der Darstellung der neuesten Entwicklungen, dem Nutzen und dem effektiven Einsatz in einer integrierten Produktentwicklung. Dazu dienen 3D-CAD-Systeme wie z. B. Pro/Engineer und Solid Works, aber auch PDM-Systeme und die Integration in Richtung Fertigung. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Problematik der CAD-Schnittstellen, die beim Einsatz unterschiedlicher CAD-Systeme oder beim Datenaustausch mit weiteren CAX-Systemen notwendig sind.

Forschungsförderung: Hier wird z.B. das System der Forschungsförderung durch die Europäische Union oder nationaler Institutionen vorgestellt, sowie auf zu beachtende Randbedingungen, die mögliche Zusammensetzung eines Projektteams, die Höhe der Förderung, die Projektlaufzeiten usw. eingegangen.

Werkstoffe: Der allgemeinen Entwicklung Rechnung tragend, wird schwerpunktmäßig in diesem Tagungsblock auf Eigenschaften und die Anwendungsmöglichkeiten jüngerer Konstruktionswerkstoffe wie Keramik, Aluminium und Magnesium eingegangen.

Maschinenelemente/Konstruktionstechniken: Infolge der steigenden Leistungsdichten von Maschinen und Antriebssystemen werden neue Konstruktionsformen und Berechnungsmöglichkeiten (u.a. elastisch-plastische Auslegung) für Maschinenelemente sowie Entwicklungstendenzen vorgestellt. Das Einsparpotential bei Variantenkonstruktionen wird durch Baukasten- und Baureihensysteme demonstriert.

Meßtechnik: Die Vor- und Nachteile der am IMW eingesetzten Verfahren zur drahtgebundenen und

drahtlosen Übertragung von Meßwerten werden dargestellt und anhand der gestellten Meßaufgaben erläutert.

Internet/Intranet: Als Werkzeuge zur Informationsbeschaffung und -verwaltung und zur Möglichkeit der Produkt- und Firmenwerbung sind Netzwerke kaum mehr wegzudenken. Der wirkungsvolle Einsatz von Internet und der Aufbau eines firmeninternen Intranet wird erklärt sowie die Erstellung und Gestaltung einer eigenen Homepage demonstriert.

SAP: Die betriebswirtschaftliche Standardsoftware wird im Institut seit 3 Jahren für die Lehre und zunehmend für Forschungsvorhaben eingesetzt. In Vorträgen und Übungen am System können Interessierte erste Einblicke erlangen, besonders unter dem Blickwinkel der Konstruktion.

Rapid Prototyping: Im Rahmen der schnellen und zuverlässigen Produktentwicklung hat in den letzten Jahren die Technik des Rapid Prototyping an Bedeutung zugenommen. An der am IMW vorhandenen Selective-Laser-Sintering-Maschine (SLS) wird die Verfahrenskette zur Erzeugung von Lasersinterteilen im Bereich Kunststoff- und Metallprototypenbau gezeigt. Desweiteren werden die Prozessschritte von der Konstruktion bis zum fertigen Bauteil anhand eines Beispiels vorgestellt.

Weitere Seminarpunkte werden sein: Patentwesen, Normung, Projektmanagement und Virtual Reality.

Nähere Informationen zur Clausthaler Konstruktionswoche – CKW'99 können ab Februar 1999 unter <http://www.imw.tu-clausthal.de/ckw/> abgerufen werden.

Programm der Clausthaler Konstruktionswoche 1999

	Montag 20.09.1999	Dienstag 21.09.1999	Mittwoch 22.09.1999	Donnerstag 23.09.1999	Freitag 24.09.1999
9:00 - 12:45	Anmeldung, Begrüßung	C-Techniken	Werkstoffe	Maschinenelemente/ Konstruktionstechniken	Patentwesen
	C-Techniken				
13:45 - 17:00	Meßtechnik	Meßtechnik	Projektmanagement	Projektmanagement	Virtual Reality
	Internet/ Intranet	Internet/ Intranet			
	Schnittstellen	Podiumsdiskussion	SolidWorks	Podiumsdiskussion	Ende
					Pro/Engineer

Das Praktikum "Konstruktion technischer Produkte"

Große, A.

Im Rahmen der Lehre bietet das Institut für Maschinenwesen seit mehreren Jahren das Praktikum „Konstruktion technischer Produkte“ an. Aufgabe ist dabei die Lösungsfindung und Grobgestaltung einer technischen Aufgabenstellung aus der industriellen Praxis. Im folgenden Artikel sollen die Durchführung des Praktikums, die konstruktionsmethodische Vorgehensweise sowie die Arbeiten und Ergebnisse durchgeführter Projekte vorgestellt werden.

The Institute for Mechanical Engineering offers the practical course "Design of Technical Products" within its teachings for several years. The aim is thereby the finding of suitable solution principles and the embodiment design for a technical task from industrial companies. In the following article the realisation of the practical course, the systematic approach of engineering design as well as the work and results of projects of the past are presented.

1 Einführung

Das Praktikum „Konstruktion technischer Produkte“ wurde in diesem Jahr zum vierten Mal erfolgreich abgeschlossen. Aufgrund der Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen verschiedenster Branchen sind immer wieder interessante Aufgabenstellungen gefunden worden.

Zu Beginn des Praktikums wird das Unternehmen besucht und den Studenten die Aufgabe vorgestellt. Da es sich bei den Aufgaben stets um Neukonstruktionen handelt, wird die konstruktionsmethodische Vorgehensweise zur Lösungsfindung angewendet. Die Vorteile eines systematischen Vorgehens werden im folgenden Kapitel erläutert. Nachdem eine Prinziplösung festgelegt worden ist, beginnt die Grobgestaltung mit Hilfe des 3D-CAD-Systems Pro/ENGINEER der Fa. Parametric Technology Corporation. Am Ende des Praktikums wird eine Abschlußpräsentation und Diskussionsrunde mit einigen Angestellten unterschiedlicher Disziplinen des Unternehmens durchgeführt.

Das Praktikum findet im Sommersemester statt und hat einen Umfang von 2P, d.h. von insgesamt 21 Zeitstunden. Voraussetzung für die Teilnahme am Praktikum sind die Vorlesungen Konstruktionsele-

mente I-III und Konstruktionslehre I /1, 2/. Die Teilnehmerzahl liegt erfahrungsgemäß bei ca. 6...15 Studenten, wobei eine Gruppengröße von max. 5 nicht überschritten werden sollte. Je nach Gruppenanzahl entstehen auch unterschiedlich viele Lösungsvorschläge.

2 Konstruktionsmethodische Vorgehensweise

Der Konstrukteur bestimmt die technischen und wirtschaftlichen Produkteigenschaften maßgeblich. Zusätzlich erfordert die Entwicklung technischer Produkte entsprechend der Problem- und Aufgabenvielfalt äußerst vielseitige konstruktive Tätigkeiten. Um zu guten Lösungen zu gelangen ist ein Vorgehen erforderlich, das planbar, flexibel, optimierbar und nachprüfbar ist /3/. Hierfür stellt die Konstruktionsmethodik Hilfsmittel zur Verfügung, die neben konkreten Handlungsweisen zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme auch Methoden zur Lösung einzelner Konstruktionsprobleme oder -teilaufgaben beinhalten.

Bild 1 zeigt das generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren gemäß der VDI-Richtlinie 2221. Der dargestellte Entwicklungsprozeß läßt sich grundsätzlich in 4 Phasen (**Bild 1**, rechts) mit der entsprechenden Festlegung am Ende jeder Phase aufteilen, **Tab. 1**.

Phase	... Festlegung
I Planen und Klären der Aufgabe	informative ...
II Konzipieren	prinzipielle ...
III Entwerfen	gestalterische ...
IV Ausarbeiten	herstellungstechnische ...

Tab. 1: Phasen des Entwicklungsprozesses

2.1 Planen und Klären der Aufgabe

Ausgangspunkt ist die zu erfüllende Aufgabe bzw. die Produktidee. In einem ersten Schritt ist die Aufgabenstellung zu klären und zu präzisieren und in Form von Anforderungen in einer Anforderungsliste festzuhalten. Nachdem die Produkthanforderungen zusammengetragen sind, erfolgt die Freigabe zum Konzipieren. Die Anforderungsliste ist zu diesem Zeitpunkt keinesfalls endgültig, sondern während

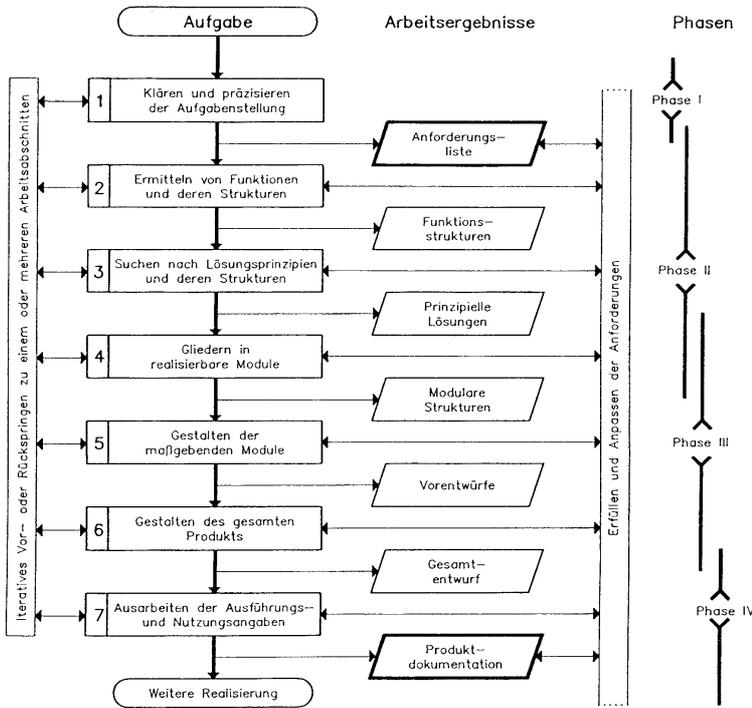


Bild 1: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 /4/

und deren Kombination in einer Wirkstruktur. Die Konkretisierung der Wirkstruktur liefert die prinzipielle Lösung. In **Bild 2** sind Beispiele für eine Funktions- und Wirkstruktur aufgezeigt.

Die Konzeptphase ist entscheidend für das Konstruktionsergebnis, denn durch die nachfolgenden Arbeiten des Entwerfens und Ausarbeitens können grundlegende Mängel des Lösungsprinzips nicht oder nur sehr schwer ausgeglichen werden. Der Erfolg einer Konstruktion wird i.a. durch die Wahl des zweckmäßigsten Prinzips und nicht durch kleine konstruktive Details bestimmt.

Aufgrund der geschilderten hohen Bedeutung des Konzipierens sollen im folgenden die einzelnen Arbeitsschritte zur Erarbeitung der prinzipiellen Lösung näher erläutert werden.

Zusammenhänge	Elemente	Struktur	Beispiel
Funktions-zusammenhang	Funktionen	Funktions- struktur	<p>Schaltkraft F_S in Normalkraft F_N ändern T_1 einleiten → F_U erzeugen → T_2 ausleiten → T_2 zu entwickelndes techn. Gebilde</p>
Wirk-zusammenhang	Physikalische Effekte sowie geometrische und stoffliche Merkmale ↓ Wirkprinzipien	Wirk- struktur	<p>Hebeleffekt: $F_0 \cdot a = F_b \cdot b$ $F_0 = F_N ; F_b = F_S$</p> <p>Reibungseffekt: $R = F_U$ $R = \mu \cdot F_N$</p>

Bild 2: Zusammenhänge in technischen Systemen /3/

des Entwicklungsprozesses stets zu verifizieren, zu ergänzen und zu aktualisieren.

2.2 Konzipieren

Die Phase des Konzipierens umfaßt die Erarbeitung der prinzipiellen Lösung. Zu den Aufgaben zählt das Abstrahieren auf die wesentlichen Probleme, das Aufstellen von Funktionsstrukturen sowie das Suchen nach geeigneten Wirkprinzipien

2.2.1 Abstrahieren

Ziel der Abstraktion beim Entwickeln und Konstruieren ist das Auflösen von Vorfixierungen oder konventionellen Vorstellungen. Beim *Abstrahieren* sieht man vom Individuellen und vom Zufälligen ab und versucht das Allgemeingültige und Wesentliche hervorzuheben /3/. Durch die Formulierung der Gesamtaufgabe mit Hilfe von technischen Funktionen wird eine Verallgemeinerung erreicht. Dabei bleibt die Problematik erkennbar, ohne daß schon eine bestimmte Art der Lösung festgelegt wird.

2.2.2 Funktionsanalyse und -struktur

Aus der Gesamtaufgabe läßt sich die Gesamtfunktion ableiten. Je nach Komplexität der zu lösenden Aufgabe wird die sich ergebende Gesamtfunktion ebenfalls mehr oder weniger komplex sein. Üblicherweise gliedert man die Gesamtfunktion in Teilfunktionen niedrigerer Komplexität auf. Durch die Verknüpfung der einzelnen Teilfunktionen ergibt sich die Funktionsstruktur, die die Gesamtfunktion darstellt. Der zweckmäßige Auflösungsgrad einer Gesamtfunktion in Teilfunktionen wird im wesentlichen durch den Neuheitsgrad der Aufgabenstellung bestimmt. Bei

Neukonstruktionen sind sowohl die einzelnen Teilfunktionen als auch deren Verknüpfung größtenteils unbekannt, d.h. hier gehört das Suchen und Aufstellen einer optimalen Funktionsstruktur zu den wichtigsten Teilschritten in der Konzeptphase.

Positiv wirkt sich das Aufstellen von Funktionsstrukturen bei der anschließenden Lösungssuche aus. Der Vorteil liegt in der klaren Trennung von Teilsystemen. Damit kann man bekannte Teilsysteme eines Produktes oder neu zu entwickelnde Teilsysteme gut voneinander abgrenzen und getrennt bearbeiten.

2.2.3 Suche nach Wirkprinzipien

Zu den einzelnen, bereits gewonnenen Teilfunktionen müssen Wirkprinzipien gefunden werden, die später zu Wirkstrukturen zusammengefügt werden. Das Wirkprinzip enthält den für die Erfüllung einer Funktion erforderlichen physikalischen Effekt sowie die geometrischen und stofflichen Merkmale. Zur Suche nach Wirkprinzipien werden verschiedene Hilfsmittel und Methoden angeboten. Hierbei kann eine Gliederung in konventionelle, intuitiv betonte und diskursiv betonte Methoden vorgenommen werden. Im folgenden sind einige Methoden und Hilfsmittel zur Suche nach Wirkprinzipien aufgezählt und den oben genannten Kategorien zugeteilt:

Konventionelle Methoden

- Literaturrecherchen
- Analyse natürlicher Systeme
- Analyse bekannter technischer Systeme
- Analogiebetrachtungen
- Messungen, Modellversuche

Intuitiv betonte Methoden

- Brainstorming
- Methode 635
- Galeriemethode
- Delphi-Methode
- Synektik
- kombinierte Anwendung

Diskursiv betonte Methoden

- systematische Untersuchung des physikalischen Zusammenhangs
- systematische Suche mit Hilfe von Ordnungsschemata (morphologischer Kasten)
- Verwendung von Katalogen

Die konventionellen Methoden umfassen u.a. Recherchen zum Stand der Technik, Analysen von bestehenden Produkten oder der Natur (Bionik) und Übertragung der Ergebnisse auf technische Systeme sowie Messungen an ausgeführten Systemen und Modellen.

Intuitiv betonte Methoden basieren auf der zufälligen Idee. Üblicherweise setzt sich eine Gruppe von Fachleuten verschiedener Erfahrungsbereiche zusammen und sammelt spontane Lösungen, die später weiter verfolgt und ergänzt werden können.

Bei den diskursiv betonten Methoden werden Lösungen durch bewußt schrittweises Vorgehen erarbeitet. Hierzu zählt z.B. das systematische Untersuchen des physikalischen Zusammenhangs bei bekannter physikalischer Gleichung durch Variation der einzelnen Einflußgrößen. Weitere Möglichkeiten des systematischen Erarbeitens von Lösungen stellen Ordnungsschemata (ein Beispiel hierfür ist in **Bild 9** zu sehen) und Konstruktionskataloge mit vorgefertigten Lösungen dar.

Die einzelnen Vorgehensweisen schließen sich gegenseitig nicht aus, sondern werden häufig miteinander kombiniert angewendet.

2.2.4 Lösungskombination und Wirkstruktur

Nachdem die Lösungen für die Teilfunktionen vorliegen müssen diese anschließend kombiniert werden, um zu Lösungen für die Gesamtaufgabe bzw. Gesamtfunktion zu kommen. Der Schwerpunkt liegt beim Kombinieren auf dem Erkennen von Verträglichkeiten und Kollisionsfreiheit zwischen den verbindenden Teillösungen. Ein weiteres Problem liegt bei der Auswahl technisch und wirtschaftlich günstiger Kombinationen aus dem Feld theoretisch möglicher Kombinationen, **Bild 3** (Gesamtlösungskombination 1: $E_{11} + E_{22} + \dots + E_{n2}$; Gesamtlösungskombination 2: $E_{11} + E_{21} + \dots + E_{n1}$).

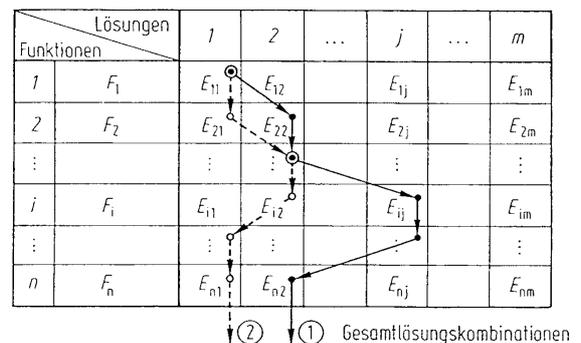


Bild 3: Kombination von Teillösungen zu Gesamtlösungen (Prinzipkombinationen) /3/

Durch Auswählen einer Gesamtlösung aus dem Feld der Teillösungen (Wirkprinzipien) und deren Verknüpfung entsteht die Wirkstruktur (System-synthese).

2.2.5 Auswahl und Bewertung

Beim Suchen nach Wirkprinzipien ist ein möglichst großes Lösungsspektrum erwünscht. Zur Reduzierung der Zahl der Lösungsvorschläge bietet sich nach Ausschluß der absolut ungeeigneten Lösungen eine Auswahlliste mit Kriterien wie beispielsweise *Verträglichkeit gegeben, Forderungen der Anforderungsliste erfüllt, grundsätzlich realisierbar, Aufwand zulässig, unmittelbare Sicherheitstechnik gegeben* an /3/. Dadurch lassen sich ohne großen Aufwand die als verfolgungswürdig erkannten Lösungsvarianten herausstellen, die nun einem detaillierteren Bewertungsverfahren zu unterziehen sind. Zu den gängigen Verfahren zählt die Nutzwertanalyse und die Bewertung nach VDI-Richtlinie 2225 /5/, die in jeder Phase des Entwicklungsprozesses angewendet werden können. Für beide Verfahren müssen zunächst Bewertungskriterien technischer und wirtschaftlicher Art festgelegt werden. Dabei ist darauf zu achten, daß die entscheidungsrelevanten Anforderungen vollständig erfaßt werden, daß die Bewertungskriterien unabhängig voneinander sind und, daß die Erfüllung der Zielvorstellungen mit den Bewertungskriterien quantitativ ausgedrückt werden kann. **Bild 4** zeigt die Wertskala für die beiden Bewertungsverfahren. Zusätzlich kann eine Gewichtung der Bewertungskriterien entsprechend der Bedeutung des Kriteriums erfolgen.

Wertskala			
Nutzwertanalyse		Richtlinie VDI 2225	
Pkt.	Bedeutung	Pkt.	Bedeutung
0	absolut unbrauchbare Lösung	0	unbefriedigend
1	sehr mangelhafte Lösung	1	gerade noch tragbar
2	schwache Lösung		
3	tragbare Lösung	2	ausreichend
4	ausreichende Lösung		
5	befriedigende Lösung	3	gut
6	gute Lösung mit geringen Mängeln		
7	gute Lösung		
8	sehr gute Lösung	4	sehr gut (ideal)
9	über die Zielvorstellung hinausgehende Lösung		
10	Ideallösung		

Bild 4: Wertskala für Nutzwertanalyse und VDI-Richtlinie 2225 /3/

Mit Abschluß des Bewertungsverfahrens steht das am besten erscheinende Lösungsprinzip fest. Der Konstruktionsprozeß wird nun auf der gestalterischen Ebene, dem Entwerfen, fortgesetzt.

2.3 Entwerfen

Beim Entwerfen wird ausgehend von der Wirkstruktur bzw. der prinzipiellen Lösung die Baustruktur nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eindeutig und vollständig erarbeitet. Häufig werden mehrere maßstäbliche Entwürfe angefertigt, um zu einem besseren Informationsstand über Vor- und Nachteile der Varianten aus der Konzeptphase zu gelangen. Die Entwurfsvarianten sind dann mit den neu gewonnenen Erkenntnissen abermals zu bewerten.

Der endgültige Gesamtentwurf stellt den Abschluß der Entwurfsphase dar. Als nächster Schritt erfolgt die Freigabe zur Ausarbeitung.

2.4 Ausarbeiten

Die Ausarbeitungsphase wird gekennzeichnet durch endgültige Vorschriften für Form, Bemessung und Oberflächenbeschaffenheit aller Einzelteile, Festlegen aller Werkstoffe, Überprüfung der Herstellmöglichkeit sowie der endgültigen Kosten. Ergebnis der Ausarbeitung sind Zeichnungen, Stücklisten und Arbeitspläne.

3 Projekte

In den nächsten Kapiteln werden die vier durchgeführten Projekte näher erläutert. Dabei werden neben der Aufgabenstellung und den erarbeiteten Lösungen auch Ergebnisse von Schritten der konstruktionsmethodischen Vorgehensweise vorgestellt.

3.1 Vorsatzgerät zur Verpackung von KB-Filmmaterial in Plastikboxen

Die erste Praktikumsdurchführung erfolgte in Zusammenarbeit mit der Fa. Stoppel in Goslar. Das Unternehmen betreibt neben dem Handel von Fotoartikeln ein Fotoentwicklungslabor. Grundgedanke, der zu der Praktikumsaufgabe geführt hat, war das Verpacken von Kleinbild-Fotonegativen und der Abzüge in Plastikboxen für eine bessere Archivierung.

Ziel des Praktikums war die Entwicklung eines Vorsatzgerätes, das den Verpackungsvorgang in die

Plastikboxen automatisch vornimmt. Dazu sind die Schritte Öffnen der Plastikbox, Zuführen der Negative, Zuführen der Fotoabzüge, Schließen und Verpacken der Box in die Auftragstasche erforderlich. Das Vorsatzgerät war für die Installation an die vorhandene Schneidemaschine vorzusehen.

Als Lösung sind eine konventionelle, konstruktiv aufwendigere Lösung und zwei ähnliche Drehtischkonzepte entstanden. Letztere haben sich für die gegebene Aufgabenstellung als besser geeignet herausgestellt. Daher soll deren Funktionsweise kurz beschrieben werden.

Bei der Zuführung der Plastikbox aus dem Vorratsmagazin auf den Drehtisch wird diese gleich geöffnet. Durch Drehung wird die Box unter den Negativauswurf gefahren und befüllt, unter den Abzugsauswurf bewegt und mit den Fotos bestückt. Beim weiteren Verfahren des Drehtisches sorgt ein Hebelmechanismus für das automatische Schließen der Plastikbox. Abschließend wird die Box in die durch Saugnäpfe aufgehaltene Auftragstasche befördert.

3.2 Vorsatzgerät zur Trennung von Auftrags-tasche und KB-Film

Die Durchführung des zweiten Praktikums erfolgte wieder gemeinsam mit der Fa. Stoppel.

Die angelieferten KB-Filme werden zu Endlosstreifen zusammengeklebt, entwickelt und weiterverarbeitet. Die Belichtung erfolgt ebenfalls auf Endlosfotopapier. Über ein Datenerfassungssystem und eine Steuerung werden Bilder und Negative nach dem Schneiden auftragsgebunden sortiert und aus einer Schneidemaschine ausgeworfen.

Aufgabe in diesem Praktikum war es, ein Vorsatzgerät für die Trennung der Auftragstasche und der Filmpatrone, für die Zuführung der Filmpatrone zur Entwicklungseinheit (APS) und für die Zuführung der Auftragstasche zu einem Drucker zu konstruieren. Eine wesentliche Anforderung an das Vorsatzgerät war dabei die unveränderte Nutzung der bereits vorhandenen Komponenten im automatisierten Fotoentwicklungsprozeß.

Aus der durchgeführten Funktionsanalyse haben sich die Baugruppen Magazin, Taschenöffner, Entpacker, Sortierer, Dosenöffner und Rückspuler ergeben. Für die einzelnen Funktionen bzw. Baugruppen wurden mögliche Wirkprinzipien erarbeitet und bewertet. Die beste Prinziplösung wurde dann

mit dem 3D-CAD-System Pro/ENGINEER gestalterisch umgesetzt.

Bei der entstandenen Konstruktion sind die Filmtaschen seitwärts in die Fächer eines Magazins zu stecken. Dabei ist darauf zu achten, daß alle Laschen der Auftragstaschen in die gleiche Richtung zeigen. Die Magazine werden mit den "Füßen" auf ein Förderband gestellt, sie können auch gestapelt werden. Zum Entleeren des Magazins ist die Bodenplatte zu entfernen. Durch das Anfahren des Förderbandes wird das Magazin vorwärts bewegt. Hierdurch werden die Filmtaschen über eine Führung bis zu einer schlitzartigen Öffnung geschoben, wo die Taschen hereinfallen und über eine Rutsche dem Taschenöffner zugeführt werden. Nach vollständiger Entleerung eines Magazins kann, wenn Magazine gestapelt wurden, die nächsthöhere Klappe geöffnet und dieses Magazin entleert werden. Dazu muß die Bewegungsrichtung des Förderbandes umgekehrt werden.

Nachdem die Tasche dem Öffner zugeführt wurde, werden eine Öffnerklinge und eine Förderwalze heruntergefahren. Die rotierende Förderwalze zieht die Tasche nach hinten, wodurch die Öffnerklinge unter die Lasche gedrückt wird und diese öffnet. Durch kontinuierliches Weiterführen der Tasche wird sie mit Hilfe eines Abstreifers entleert.

Während die Tasche dem Drucker zugeführt wird, fällt der Inhalt (Filmdose oder Film) in die Sortierrinne. Hier wird aufgrund verschiedener Durchmesser die Filmdose dem Dosenöffner zugeführt, der Film gelangt dagegen direkt durch den Bodenschlitz über einen Trichter in den Rückspuler.

Die Filmdose fällt in die Greifervorrichtung des Dosenöffners hinein. Der Hebel an der Greifervorrichtung klappt herunter und dient zur Fixierung der Filmdose in der Greifervorrichtung beim Schneidvorgang. Auf beiden Seiten werden Luftlanzen in die Filmdose hineingedrückt. Die Greifervorrichtung dreht sich um 540°. Da die Schneide mit leichtem Druck aufliegt, wird die Filmdose aufgeschnitten. Die Greifervorrichtung fährt nun ein wenig auseinander, so daß der in der Dose enthaltene Film unter Mithilfe eines kleinen Luftstoßes, der aus der Lanzenspitze austritt, herausfällt und über einen Trichter dem Rückspuler zugeführt wird. Während die Greifervorrichtung erneut ein kleines Stück auseinanderfährt, werden die Luftlanzen aus den Dosenhälften wieder herausgezogen. Nach Öffnen der Hebel fallen die Filmdosenhälften nach unten in einen dafür vorgesehenen Sammelbehälter. Die

Greifervorrichtung dreht sich dann um weitere 180°, damit der nächste Film nachrücken kann.

Wenn der Film über den Trichter in den Rückspuler zugeführt wurde, wird der Revolver, in dem sich der Film befindet, sofort um eine Position (90°) gedreht. Hier wird die Lage der Patrone (horizontal/vertikal) über optische oder mechanische Sensoren erfaßt und damit die Drehrichtung zum Rückspulen eingestellt. Im nächsten Takt wird zurückgespult. Dabei wird die Patrone im Revolver pneumatisch über Hebelmechanismen zentriert und festgehalten. Zugleich wird der Rückspuler von unten in die "Patronennabe" eingeführt und die Patrone zurückgespult. Danach wird die Patrone losgelassen und der Revolver dreht eine Position weiter. Die Patrone befindet sich jetzt über dem ersten Auswurfschacht, der für Patronen vorgesehen ist, die noch gedreht werden müssen, um dem APS zugeführt zu werden. Eine Klappe oder ein Schieber löst hier den freien Fall der Patrone durch den ersten Auswurfschacht aus. Die nächste 90°-Drehung befördert die Patrone über den zweiten Auswurfschacht, durch den die Patrone direkt zur APS zugeführt wird.

3.3 Vorrichtung zum automatisierten Entgraten von Einbauwaschbecken

Das dritte Praktikum erfolgte in Zusammenarbeit mit der Fa. Alape in Goslar. Zur Produktpalette zählen u.a. Einbauwaschbecken aus Stahl und Email. Der beim Stanzen der Ventil-, Hahn- und Überlauflöcher entstehende Grat ist zur Vermeidung von Abplatzungen der Emailsicht an diesen Stellen vor dem Emaillieren zu entfernen. Der Entgratvorgang wurde bislang von Hand mit Hilfe rotierender Kegelfräser ausgeführt.

Die Aufgabe des Praktikums bestand in der Entwicklung einer Vorrichtung zum automatisierten Entgraten der oben genannten Löcher. Die Hauptfunktionen der Vorrichtung sind:

- Werkstück aufnehmen und fixieren
- Ventil-, Hahn- und Überlaufloch entgraten (Ausführen des Arbeitsganges)

Bei der Integration der Vorrichtung in die bestehende Fertigungskette waren die vorgegebenen kurzen Taktzeiten und das Zusammenspiel von Handhabungsrobotern und Vorrichtung zu beachten. Ein weiterer wichtiger Punkt war die Anpassung an verschiedene Modelle von Einbauwaschbecken ohne großen Umrüstaufwand.

Nach dem Klären der Aufgabenstellung wurde nach verschiedenen Möglichkeiten des Entgratens gesucht. Hier wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, die durch Anfragen bei Firmen aus dem Bereich Entgratungstechnik ergänzt wurde. Eine anschließende Bewertung der einzelnen Entgratverfahren führte wie gehabt zum Entgraten mit Kegelfräsern.

In **Bild 5** und **Bild 6** sind die beiden entstandenen Lösungen dargestellt.

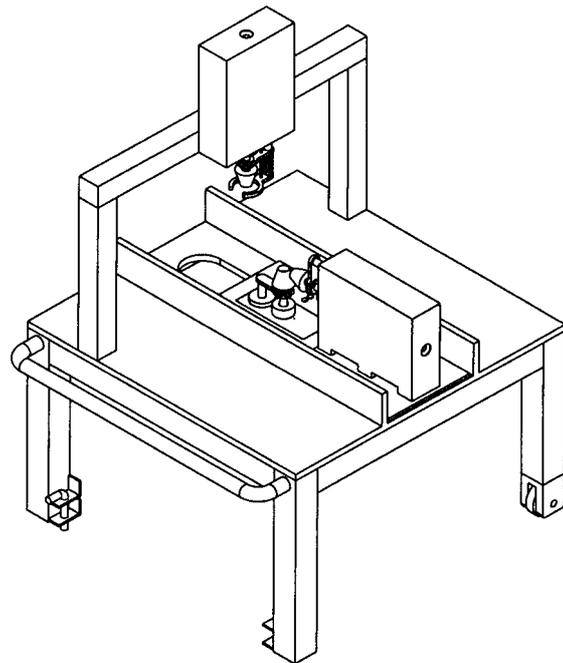


Bild 5: Entgratvorrichtung, Lösung 1

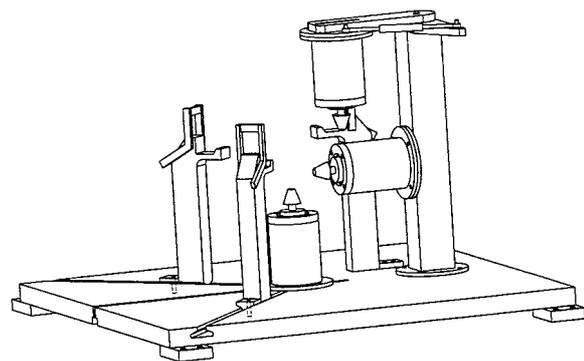


Bild 6: Entgratvorrichtung, Lösung 2

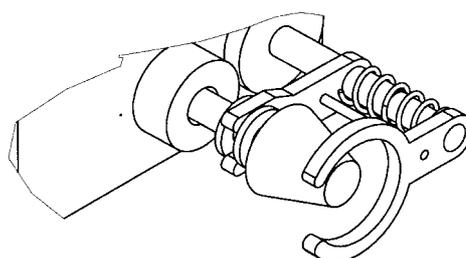


Bild 7: Vorschub- und Fixiereinheit

Bei der ersten Lösung wird das Einbauwaschbecken mit der Oberseite nach unten mit dem Handhabungsroboter eingelegt. Eine Zentrierung wird durch den unteren Kegelfräser gewährleistet, die Fixierung erfolgt durch die beiden gummibeschichteten Leisten und die Haltevorrichtungen am Kegelfräserkopf, **Bild 7**. Durch die Vorschubbewegung des Kegelfräasers wird gleichzeitig die Fixierung an das Waschbecken geführt.

Die zweite Lösung nimmt das Waschbecken in Einbaulage auf. Die obere Fräseinheit wird über einen Schwenkarm dem zu entgratenden Loch zugeführt. Als Besonderheit weisen die Fräseinheiten eine Kugellagerung auf. Dadurch wird eine Selbstzentrierung des Waschbeckens erreicht.

Beide Konstruktionen weisen Verstellrichtungen für die Halterungen und Fräseinheiten zur Anpassung an verschiedene Modelle auf. Bei der Entwicklung wurde darauf geachtet möglichst viele Gleichteile zu verwenden. Bei beiden Entgratvorrichtungen werden jeweils die gleichen Fräseinheiten für alle drei zu entgratenden Löcher verwendet.

3.4 Fahrerloses Transportsystem

Bei der letzten Praktikumsdurchführung wurde mit der Fa. Landert Motoren AG, Sparte Vitax Handling aus der Schweiz zusammengearbeitet. Im Programm von Vitax Handling sind Geräte aller Art der Handhabungstechnik. Neu hinzugekommen ist ein fahrerloses Transportsystem japanischen Ursprungs, das auf dem europäischen Markt vertrieben werden soll. Die Vorgabe der Fahrstrecke erfolgt durch ein selbstklebendes Magnetband, das direkt auf den Boden geklebt wird und die Einbindung von Stops, Wendepunkten und dergleichen ermöglicht.

Neben der Neuentwicklung des Transportsystems war die Erstellung eines Anforderungsprofils mit Berücksichtigung sämtlicher sicherheitstechnischer Aspekte für den europäischen Markt ein wesentlicher Schwerpunkt der Aufgabe. Ein Ausschnitt der Anforderungsliste ist in **Bild 8** gezeigt. Die Anforderungen zur Sicherheit sind aus der prEN 1525 "Sicherheit von Flurförderzeugen - Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme", der Unfallverhütungs-

Praktikum SS 98 Konstruktion Technischer Produkte		Anforderungsliste für SmarCar	Blatt 2 von 3 Blatt
Änderung	(F) W	Anforderungen	Verantwortlich Bemerkungen
14.7.1998		<i>bei manuellem Fahrbetrieb:</i> <ul style="list-style-type: none"> - selbsttätiges Bremsen beim Loslassen der Bedienungseinrichtung - Höchstgeschwindigkeit 6 km/h in der Ebene - Fußverletzungen durch Antriebsräder und Schwenkrollen ausschliessen - Nottastschalter, bei Betätigung Fahrzeug stillsetzen 	s. auch prEN 1525
24.9.1998		<i>Anforderungen aus Richtlinie für fahrerlose Flurförderzeuge (7/95)</i> <ul style="list-style-type: none"> - selbsttätig wirkende Bremsen - angepaßte Geschwindigkeit, jedoch 6 km/h nicht ohne Zusatzmaßnahmen überschreiten - bei Verlassen des Fahrkurses zwangsläufige Abschaltung und bremsen bis zum Stillstand - Auffahrsicherung in Fahrtrichtung (Umfang s. 2.10) - Anzeige der Fahrbewegung durch Warneinrichtung - rechtzeitige selbsttätige Anzeige von Fahrtrichtungsänderungen - Fußverletzungen vermeiden - Fabrikschild (erforderliche Angaben s. 2.1) 	s. auch UVV s. auch UVV s. auch prEN1525 (5.9.5) s. auch prEN 1525
	W	- keine hervorstehenden Bauteile	s. auch UVV

Bild 8: Auszug aus der Anforderungsliste

Änderung Anzahl der Räder							
3							
4							
5							
6	"	"	"	"	"	"	"
Kette (1)							
Walze (3)							

Bild 9: Morphologischer Kasten für Anordnung und Anzahl der Räder

vorschrift UVV Flurförderzeuge und der Richtlinie für fahrerlose Flurförderzeuge vom Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften entnommen.

Im Vordergrund der Konstruktion standen die Kosten sowie eine Variabilität im Aufbau des fahrerlosen Transportwagens. Durch einfache Lösungen sollten die Kosten gering gehalten werden. Gleichzeitig sollte das Qualitätsempfinden bei dem Transportwagen gesteigert werden. Die variable Aufnahme für verschiedene Transportgüter wurde über ein Baukastensystem realisiert.

Bei der Suche nach Wirkprinzipien wurde zusätzlich zur methodischen Lösungsfindung der bestehende Transportwagen eingehend analysiert. **Bild 9** zeigt einen morphologischen Kasten, der eine systematische Zusammenfassung der Anordnung und Anzahl der Räder enthält (ausgefüllte Punkte bedeuten angetriebene Räder). Der Kinematik des Trans-

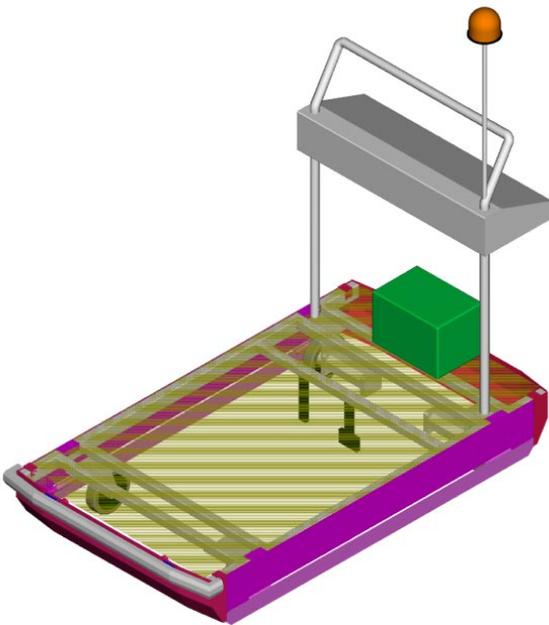


Bild 10: Fahrerloses Transportsystem

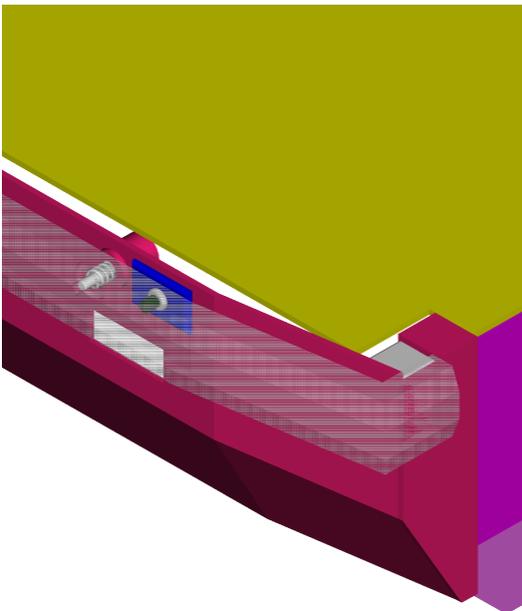


Bild 11: Frontschutzleiste und Kontaktgeber

portwagens kam große Bedeutung zu, da der Transportwagen einen kleinen Wendekreis (eventuell sogar Drehen auf der Stelle) haben und mit Motoren angetrieben werden sollte, die nur zwei Geschwindigkeitsstufen aufweisen.

In **Bild 10** ist die ausgearbeitete Lösung dargestellt. Das Blech für die Lastaufnahme ist transparent gemacht worden, damit der Unterbau des Wagens erkennbar ist. Bei der Bauweise handelt es sich um ein Rahmenkonzept. Auf den Rahmen können ohne Probleme die Aufsätze für verschiedenste Transportgüter angebracht werden. Außerdem ist

noch eine Lösung ohne Rahmen entstanden, wo zwei Bleche zusammengefügt werden und tragende Funktion übernehmen.

Bild 11 zeigt ein Detail der Schutzleiste an der Front des Transportwagens, die neben einer sensorischen Erkennung erforderlich ist. Bei Kollision wird der Wagen über einen mechanischen Kontaktgeber umgehend zum Stillstand gebracht. Im Rahmen des Praktikums wurden auch Kraftmessungen an dem Transportwagen vorgenommen.

3.5 Abschlußpräsentation und Umsetzung der Ergebnisse

Nach Abschluß der Praktikumsarbeiten wurden die erarbeiteten Lösungen in den jeweiligen Unternehmen vorgestellt. Dabei stieß man stets auf große Begeisterung. Die Ausarbeitung bis zur Fertigungszeichnung und die Herstellung wurde dann von den Unternehmen ausgeführt. Wenn auch nicht immer die vorgeschlagenen Lösungen komplett übernommen wurden, waren doch stets interessante Teillösungen dabei, die in die endgültige Umsetzung eingeflossen sind.

4 Zusammenfassung

Nach einer kurzen Vorstellung des Praktikums "Konstruktion technischer Produkte" wurde die konstruktionsmethodische Vorgehensweise beschrieben. Desweiteren wurden einige Methoden zur Lösungsfindung und Bewertungsverfahren aufgezählt und erläutert. Dabei kann ein intuitiv betontes Vorgehen sicher zu der einen oder anderen interessanten, unkonventionellen Lösung führen. Abschließend wurden die in Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Unternehmen durchgeführten Projekte und Ergebnisse dargestellt.

5 Literatur

- /1/ Dietz, P.: Konstruktionselemente I-III, Vorlesungsumdruck, IMW
- /2/ Dietz, P.: Konstruktionslehre I, Vorlesungsumdruck, IMW
- /3/ Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung, 3. Auflage, Springer-Verlag 1993
- /4/ VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, 1986
- /5/ VDI-Richtlinie 2225: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, 1977

Forschungsförderung durch die Europäische Kommission - Ein Angebot für kleine und mittelständische Unternehmen

Klomp, E.

Anwendungsnahe Forschungsergebnisse sind nicht nur für große Unternehmen notwendig, besonders für kleine und mittelständische Unternehmen sind sie von existentieller Bedeutung. Die Europäische Kommission fördert im Rahmen von CRAFT diese Projekte, bei denen Klein- und mittelständische Unternehmen Zugang zu Forschung erhalten. Das ab Anfang 1999 beginnende 5. Rahmenprogramm der EU wird den KMU verstärkt die Möglichkeit bieten, Forschungsprojekten zu initiieren und daran teilzunehmen - dabei ist das IMW ein möglicher Partner, der im Rahmen eines Projektes die Forschungsdienstleistung erbringt.

In order to survive on the market, it is vital for small and middle enterprises to carry out industrial research. Within the four's framework, the European Commission supported SME's and is increasing their activities within the new framework starting in the beginning of 1999. The IMW is a reliable partner for carrying out the research in a SME's initiated project.

1 Einleitung

Kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) verfügen im Gegensatz zu großen (und finanzstarken) Unternehmen meist über keine ausreichenden finanziellen Ressourcen, Personal und Ausrüstung, um eigene Forschungen und Entwicklungen zu betreiben. Um auch - und gerade - den KMU die Möglichkeit zu geben, Forschungen zu betreiben (und letztlich die Wirtschaft der Europäischen Gemeinschaft zu erhalten und zu stärken) hat die EU in den vergangenen Jahren die Teilnahme der KMU an Forschungsprojekten verstärkt gefördert. So wurden im jetzt auslaufenden 4. Rahmenprogramm der Europäischen Kommission im Rahmen der TSME anwendungsnahe Projekte gefördert, die den KMU's die Möglichkeit boten, Forschungsergebnisse zu initiieren und zu nutzen, die sich direkt umsetzen lassen.

Da den meisten Unternehmen die Beantragung solcher Projekte meist sehr schwierig und aufwendig erscheint, wurden vergleichsweise wenig Projektanträge bei der EG eingereicht. Da das IMW als Forschungsdienstleister in einem solchen Projekt eine sehr hilfreiche Position einnehmen kann, soll in diesem Artikel gezeigt werden, daß ein Forschungsprojekt für die beteiligten von großem Nut-

zen ist. Zum Abschluß wird ein grober Überblick über den Stand beim zum 5.ten Rahmenprogramm gegeben, welches zu Beginn 1999 starten soll.

2 Beantragung eines CRAFT - Projektes

Um ein Forschungsprojekt bei der Europäischen Kommission erfolgreich zu beantragen, gilt es, die von der EU vorgeschriebenen Regeln zu kennen und zu beachten, denn es werden natürlich nur solche Projektvorschläge zugelassen und gefördert, welche alle Formalien erfüllen.

Neben den rein rechtlichen und organisatorischen Regeln, wie zum Beispiel dem Anteil der Industriepartner aus einem Land, der finanziellen Ausgeglichenheit und der Beteiligung verschiedener Staaten an einem Projekt, ist ein klar formuliertes Projektziel notwendig, welches im Laufe der Projektlaufzeit erreicht werden soll und kann. Hier ist es gerade bei den CRAFT Projekten notwendig, daß ein Nutzen für die KMU ersichtlich ist, denn sie sind schließlich diejenigen, die als Anwender das projekt ebantrag haben und - aufgrund der rechtlichen Rahmenbedingungen - die Besitzer der Forschungsergebnisse. Das IMW hat in den vergangenen Jahren bei mehreren CRAFT Projektanträge zusammen mit KMU mitgewirkt, sie ausgearbeitet und erfolgreich bei der EG eingereicht, denn gerade die Beantragung erfordert viel Zeit und Erfahrung, die bei den meisten KMU nicht vorliegt.

3 Forschungsförderung für KMU

3.1 Vorteile für die beteiligten Unternehmen

Die Vorteile für die an einem Forschungsprojekt beteiligten Unternehmen besteht hauptsächlich darin, daß die anwendungsnahe Forschungsergebnisse direkt in die Praxis umgesetzt werden können, denn die KMU erlangen durch Teilnahme an einem solchen Projekt einen technologischen und marktwirtschaftlichen Vorteil. Neben diesen erst am Ende des Projekts zu erwartenden Vorteilen, ist das IMW bemüht, während der gesamten Projektlaufzeit als kompetenter Partner zur Verfügung zu stehen. Daher werden unter Zuhilfenahme der am Institut zur Verfügung stehenden Ressourcen u.a. Fallstudien ausgearbeitet, Recherchen betrieben, aber auch maschinenbauliche Fragestellungen in Zusammenhang mit dem Projekt bearbeitet. Dazu zählt beispielsweise die Durchführung

von Festigkeitsuntersuchungen oder der Bau von Prototypen. Letztendlich dienen alle am IMW ausgeführten Arbeiten dem positiven Verlauf des Projektes und damit dem KMU.

Um allerdings die gewünschten Ergebnisse erzielen zu können, es ist notwendig, daß das Unternehmen mit seiner Problemstellung und Vorstellungen an das IMW herantritt, damit dann anhand des bestehenden Problems eine Lösung gefunden werden kann. Aus dieser Anwendungsorientierung ergibt sich auch der Nutzen für den FTE- Dienstleister, denn er kann praxisnah forschen und die Ergebnisse werden verifiziert und genutzt – daneben ist natürlich die Erstattung der Kosten insbesondere der Personalkosten für die FTE- Dienstleister ein großer Vorteil.

Da der Nutzen und die Ergebnisse den allen am Projekt beteiligten Unternehmen zur Verfügung stehen soll und auch rein rechtlich gehören, ist es notwendig, daß das Konsortium, welches in dem Projekt zusammenarbeitet, auch „zueinander paßt“, und daß zwischen den Partnern keine Konkurrenzsituation herrscht. Dazu ist es notwendig, in einem Konsortium zusammen zu arbeiten, bei dem die Partner vertikal in der Wertschöpfungskette zueinander angeordnet sind.

In dem Projekt RPTOOL, welche als Ziel die Anwendung des Verfahrens des Rapid Tooling verfolgt, sind beispielsweise Rapid Prototyping Dienstleister und Formbauer gemeinsame Partner. Hier ist es durchaus denkbar (und gewollt), daß beide von den Projektergebnissen dahingehend profitieren, daß der eine Partner Prototypen herstellt, der andere Partner diese Vorgehen als Vorlage für den Formbau verwendet. Die im Laufe des Projektes gewonnenen Ergebnisse sollen dazu dienen, daß die Prototypen und Prototypenwerkzeugherstellung auf die Bedürfnisse des Formbauers angepaßt werden. Der Formbauer erhält damit Prototypen, die keiner oder nur geringer Nacharbeit bedürfen und der Prototypenhersteller kennt schon im Vorfeld über die Besonderheiten des Bedarfs seines Kunden.

3.2 Ziele von CRAFT Projekten

Die Europäische Gemeinschaft erhofft sich von der Durchführung und der finanziellen Unterstützung solcher Forschungsvorhaben, daß ein Europäischer Mehrwert geschaffen wird, der darin besteht, daß Lösungen für Probleme geschaffen werden, die mehrere Mitgliedsstaaten betreffen, also eine Europäische Dimension entsteht.

Das Hauptziel ist es allerdings letztendlich, die Europäische Wettbewerbsfähigkeit zu stärken, damit das wissenschaftliche Potential für Innovationen zu vergrößern.

4 Ausblick auf das 5. Rahmenprogramm der EU

Mit Ablauf des Jahres 1998 endet auch das 4. Rahmenprogramm der Europäischen Union. Das ab 1999 beginnende und bis 2002 dauernde 5. Rahmenprogramm ist mit seinen 4 vertikalen Programmen deutlich schmäler als das vorhergehende (16 Leitaktionen), die Zielsetzungen bezüglich der Integration von KMU sind jedoch deutlich verstärkt worden. So sind in jedem der 4 spezifischen Programme jeweils 3 horizontale Programme vorgesehen, die insbesondere im Bereich „Förderung der Innovation unter Einbeziehung von KMU“ deutliche Akzente hinsichtlich der Beteiligung KMU setzen.

Da mit den ersten Ausschreibungen bereits im ersten Drittel 1999 zu rechnen ist, müssen sich potentielle Projektantragsteller schon zum jetzigen Zeitpunkt zu Konsortien zusammenfinden, um einen Antrag konkret vorzubereiten.

Gegenüber dem 4. Rahmenprogramm wird es vermutlich Änderungen bei den Teilnahmebedingungen geben. So dürfen in Zukunft KMU auch damit rechnen, einen Teil ihrer Kosten (voraussichtlich 20%) von der EG erstattet zu bekommen, ein Manko, welches sehr deutlich im letzten Programm bemängelt wurde. Diese Kostenerstattung ist in sofern wichtig, daß damit ein Teil der Kosten gedeckt werden kann, der durch rein organisatorische Arbeit anfällt, denn die Erfahrung hat gezeigt, daß sich ein administrativer Aufwand bei der Projektbeantragung und –durchführung nicht vermeiden läßt. Weitere Änderungen gegenüber den Vorjahren werden sein, daß die EG in verstärktem Maße darauf achten wird, daß die beantragten Projekte Bottom-up Projekte sind, das heißt die Entstehung von Forschungsprojekten soll von den Unternehmen initiiert werden. Die maximal erlaubten Projektkosten werden bis zu 2 Mio. ECU betragen dürfen.

5 Zusammenfassung

Für KMU bestehen bei der EU gute Möglichkeiten, Förderungen für F&E Leistungen zu erhalten – dabei dienen Universitäten als F&E Dienstleister. Im Rahmen dieser Projekte wird von den KMU anwendungsnahe Forschung initiiert und die Ergebnisse direkt genutzt, ohne daß für sie ein großer finanzieller Aufwand entsteht, denn die Kosten für die Forschung trägt größtenteils die EU.

Modularisierung von Studiengängen

Dietz, P.; Wächter, M.

Ein Verbundprojekt der Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung (BLK) zur Modularisierung von Studiengängen wird seit dem 1. Oktober 1998 von der TU Clausthal mitbearbeitet. Prof. Dr.-Ing. Dietz ist Senatsbeauftragter für dieses länderübergreifende Projekt mit einer Laufzeit von 3 Jahren.

Since 1 st of October the Technical University of Clausthal is a member of a network project of the Commission for educational planning and research promotion (BLK) for the modularity of courses of studies. Professor Dr.-Ing. Dietz is the senate representative for this landspreading project with a run time of 3 years.

1 Einleitung

Die heutige akademische Ausbildung weist im Regelfall ein Studium von 8 bis 10 Semestern unmittelbar im Anschluß an die schulische Ausbildung auf und schließt mit einem berufsqualifizierenden Abschluß ab. Die Absolventen verlassen in der Regel die Hochschule und starten ihr Berufsleben in der freien Wirtschaft.

Die Anforderungen an die Qualifikation akademisch gebildeter Mitarbeiter verändert sich laufend. Für die Hochschule ergibt sich daraus die Notwendigkeit, ihr Lehr- und Ausbildungsangebot vollständig zu überarbeiten, zumal die Aufgabe der Hochschulen neben der Durchführung eines Präsenzstudiums auch in einer Weiterqualifikation von Interessenten, der Möglichkeit eines Fern- oder berufs begleitenden Studiums zu sehen sein wird.

Die zukünftigen Ausbildungsinhalte müssen einerseits das notwendige Basiswissen beinhalten und andererseits auf aktuelle Erfordernisse eingehen.

Den Studierenden soll bei größtmöglicher Freizügigkeit in der Wahl der Schwerpunkte und der Gestaltung des Studienablaufes ein straff organisiertes Studium gewährleistet werden und durch das Angebot von studienbegleitenden Einzelnachweisen ein Minimieren der Studienzeiten ermöglichen.

Diese Anforderungen führen zu den Überlegungen die Studiengänge zu modularisieren. Im Projekt werden die Rahmenbedingungen für den Studiengang Maschinenbau geschaffen.

2 Grundlagen und Motivation zur Inangriffnahme des Projektes

Die Aufgaben und Kompetenzen des Ingenieurs wenden sich ab vom tayloristischen Prinzip hin zu einer simultanen Ingenieur Tätigkeit. In der Produktentwicklung z.B. ist für ein effektives Arbeiten eine gegenseitig beeinflussende Kommunikation über alle Phasen eines Abwicklungsprozesses unerlässlich. Der "Konstrukteur" wird zum "Konstruktionsmanager", der "Erfinder" wird zum "Koordinator", der gemeinsam mit seinem Team den Erfolg bestimmt.

Diese neue Betrachtungsweise des Berufsbildes für den Ingenieur führt zur Forderung nach mehr Kompetenz in übergreifenden Aufgaben und damit auch zu einer entsprechenden Forderung nach Ausbildung und Wissen in den Bereichen des Managements, der Methoden der rechnergestützten Hilfsmittel und der gesellschaftlichen Zusammenhänge.

Die logische Forderung nach einer Ingenieurausbildung, die den Anforderungen des künftigen Arbeitsmarktes genügt, kann aus den oben dargestellten Zusammenhängen nur in einer Umstrukturierung der Studiengänge bestehen, die eine abgestimmte Ausbildung in den genannten Kompetenzfeldern (**Bild 1**) ermöglicht.

Die Umstrukturierung muß verschiedenen Grundsätzen gerecht werden.

- Einbindung von mehr Sozialkompetenz in das Studium, dabei ist eine seminaristische Ausbildung mit anschließender Anwendung bei den Fachveranstaltungen im ersten Abschnitt des Studiums anzusetzen.
- Aufnahme von Lehrveranstaltungen, die den Studierenden in die betriebliche Praxis eines Unternehmens einführen.

Fachkompetenz

- Naturwissenschaftliche und Angewandte Grundlagen
 - Frühzeitige Einbindung von Entwicklungstrends
 - Vermittlung neuester Techniken mit neuesten Methoden
 - Einbindung des angewandten Grundlagenwissens der Informationsverarbeitung
 - Einbindung betriebswirtschaftlicher Grundlagen
-

Methodenkompetenz

- Methoden zur Marktanalyse und Produktinnovation
 - Methoden der Qualitätssicherung
 - Methoden zur systematischen Entwicklung von Produkten
 - Systematisches Erschließen und Nutzen vorhandenen Fachwissens, systematische Dokumentation von Arbeitsergebnissen
 - Methoden des Kostenmanagements
 - Ökologische Technikbewertung, Umweltmanagement
 - Methoden der Kommunikation in Unternehmen, Struktur und Controlling
 - Methoden der Modellbildung, Planung, Simulation und Bewertung komplexer Systeme
-

Systemkompetenz

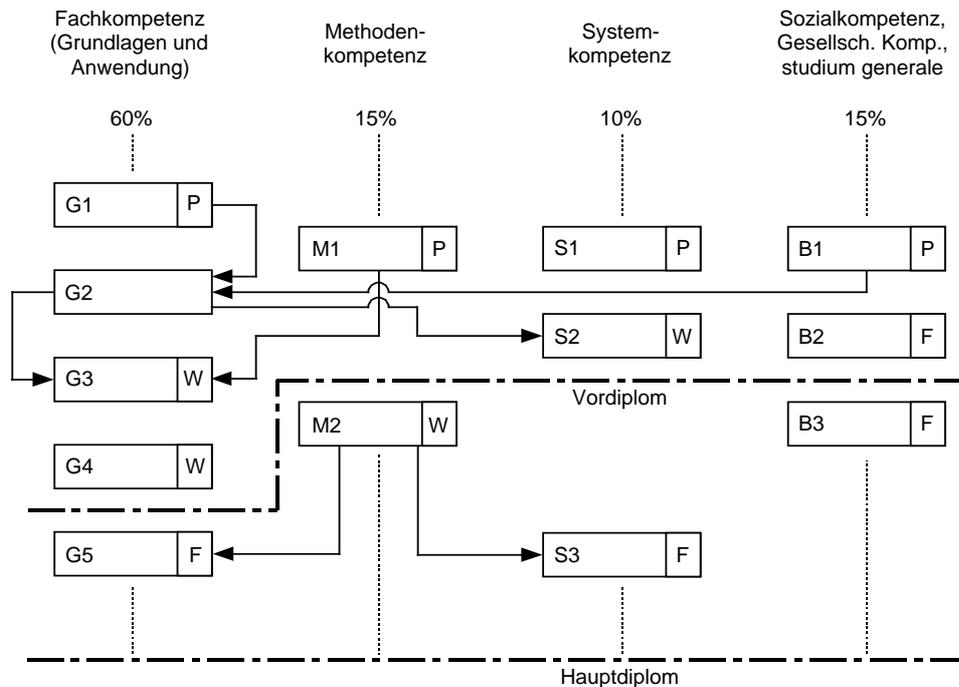
- Überblickwissen über angrenzende Fachgebiete, die für die Gestaltung von Systemen wichtig sind
 - Fachübergreifendes, systemorientiertes Denken
 - Entwickeln interfakultativer Szenarien und Visionen
-

Sozialkompetenz und gesellschaftsbezogene Qualifikationen

- Projektmanagement, Arbeitstechniken, Durchsetzungsvermögen
- Lernvermögen, Mobilität und Flexibilität
- Sprachkenntnisse, fremde Kulturen und Mentalitäten
- Kommunikation, Teamwork, Präsentation, Moderation, Verkaufstechnik
- Prozeßorientierte Vorgehensweisen unter Zeit- und Kostengesichtspunkten
- Erkennen und Analyse gesellschaftlicher Bedürfnisse, Schnittstellen technischer Problemstellungen zur Gesellschaft

Bild 1: Kompetenzfelder eines Ingenieurstudiums

- Ausgewogenheit von Grundlagen- und Methodenfächern gegenüber den fachspezifischen Fächern.
- Verstärkung von Fächern, die einen Überblick auch über angrenzende Fachgebiete und C-Techniken geben.
- Zeitliche Umstrukturierung der Lehrfächer, die ein ausgewogenes Nebeneinander von theoretischen Grundlagen und Anwendungen ermöglicht.
- Anteile des Studiums generale sind für die persönliche Entwicklung der Studierenden unbedingt notwendig und sollten nicht geschmälert werden.



Inhalte z.B.:

- G1 = Mathematik I
- G2 = Technisches Zeichnen, CAD
- G3 = Konstruktionselemente I
- M1 = Betriebswirtschaftliche Grundlagen I
- S2 = Elektrische Antriebe I
- B1 = Kommunikation und Teamwork

Gewichtung:

- P = Pflichtfach, zeitlich eingeordnet
- W = Wahlfach, Auswahl aus einem begrenzten Katalog von Alternativen
- F = Fakultatives Fach, freie Wahl aus dem Programm der Hochschule oder Fakultät

Bild 2: Struktur eines modular aufgebauten Maschinenbaustudiums unter Berücksichtigung der zu erwerbenden Kompetenzen

Bild 2 zeigt schematisch ein Konzept zur Gestaltung eines universitären Studiums im Maschinenbau, das den genannten Anforderungen näher kommt als der bisherige Aufbau. Ein Modulsystem gestattet eine außerordentlich flexible Gestaltung von Ausbildungsangeboten. Aus einer Vielfalt kombinierbarer Angebote kann ein Bachelor- oder Masterstudium geschaffen werden, das bei Nutzung der gleichen Einheiten einen berufsfähigen Abschluß des Studiums oder des Studienabschnittes ermöglicht.

Grundlage zur Bestimmung dieser Module ist in einer Untersuchung der TU Clausthal (Projekt ODIN) das ECTS-System der Europäischen Gemeinschaft, mit dem ein Einheitssystem aufgebaut wird, das international anerkannt ist.

3 Projektbeschreibung

Das Projekt dient der Entwicklung modularisierter Studienangebote, die der aktuellen Situation eines Studiums im internationalen Umfeld unter Berücksichtigung unterschiedlicher berufsqualifizierender Abschlüsse und dem Trend zum lebenslangen Lernen gerecht werden.

Das länderübergreifende Projekt ist eine Kooperation folgender Universitäten und Fachhochschulen:

- Technische Universität Ilmenau
- Technische Universität Clausthal
- Fachhochschule Hamburg
- Fachhochschule Aachen
- Universität Hannover
- Bauhaus-Universität Weimar
- Friedrich-Schiller Universität Jena
- Fachhochschule Ingolstadt.

Die Teilnehmer haben sich in ihrem Projektantrag "Länderübergreifende Entwicklung und Erprobung integrierter modularer Studienangebote unter Einbeziehung informations- und kommunikationstechnischer Medien am Beispiel der Ingenieurwissenschaften" auf folgende Arbeitspakete konzentriert:

1. Organisatorische Bildung von Modulen
2. Qualifikationsspektrum der Absolventen
3. Hochschulwechsel, Studium, Beruf und lebenslanges Lernen
4. Internationalisierung
5. Studierendenbetreuung
6. Studienorganisation
7. Sozialwissenschaftliche Begleitung
8. Virtuelle Hochschule / Gemeinsame Studiengänge

Die TU Clausthal bearbeitet federführend das Arbeitspaket "Internationalisierung". Projektpartner ist die Fachhochschule Aachen, die wiederum federführend im zweiten beteiligten Arbeitspaket "Organisatorische Bildung von Modulen" ist.

Die Teilnehmer des Projektes haben sich zum Ziel gesetzt, ein national wie international die Hochschulen überspannendes modularisiertes Bildungsangebot (**Bild 3**) zu schaffen. Deutlich werden die unterschiedlichen Einstiegsmöglichkeiten, anhand derer als Ergebnis der jeweiligen Bewertung und

des angestrebten Abschlusses sich individuelle Studienpläne in Form von auszuwählenden und erfolgreich abzuschließenden Module ergeben. Die Zusammenstellung einzelner Module zu sinnvollen Ausbildungsgängen richtet sich einerseits nach den Vorkenntnissen der Studierenden und andererseits nach dem angestrebten Abschluß. Grundlage eines Studienplans ist die abgestimmte Ausbildung in den Kompetenzfeldern (**Bild 1**).

4 Zusammenfassung

Auf der Basis eines von allen beteiligten Hochschulen anerkannten Credit-Systems ist die Flexibilität nicht nur innerhalb einer Hochschule gegeben sondern erweiterbar auf Hochschulen unterschiedlichen Typs und unterschiedlicher Länder. Damit läßt sich die Durchgängigkeit zwischen Fachhochschule und Universität, die Einbindung von Aufbaustudiengängen bei erfolgter erster Berufsqualifikation im nationalen und auch im internationalen Verbund und die Ergänzung der Lehrangebote zum lebenslangen Lernen erreichen. Voraussetzung ist ein gemeinsames Anerkennungsverfahren, wobei sich bei den bisherigen internationalen Austauschprogrammen das ECTS (European Credit Transfer System) als sehr einfach handhabbar erwiesen hat.

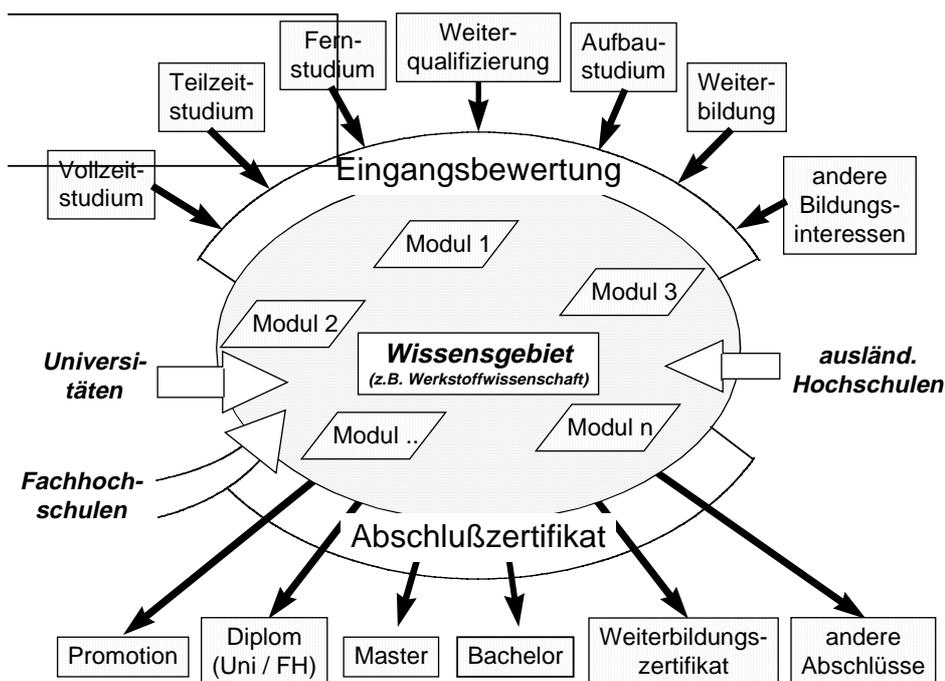


Bild 3: Schematische Darstellung unterschiedlicher Eingangs- und Abschlussmöglichkeiten in einem umfassenden modularisierten Bildungsangebot

SOKRATES/ERASMUS - europäisches Studenten- und Dozenten-Austauschprogramm

Brandt, A.; Dietz, P.

Das SOKRATES/ERASMUS-Programm wurde im Juni 1987 in Form eines Aktionsplanes der Europäischen Union verabschiedet, um die Zusammenarbeit zwischen Hochschuleinrichtungen der Mitgliedsstaaten, der EFTA-Länder und seit 1998 auch die MOEL-Länder zu fördern.

Die Hauptziele dieses Programms sind eine Steigerung der Studenten- und Dozentenmobilität zwischen europäischen Hochschulen und die Förderung des Aufbaus weitreichender und dauerhafter Hochschulkooperationen. Das Institut für Maschinenwesen (IMW) der TU Clausthal ist seit der ersten Stunde dieses Programms dabei. Unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz wurden bis heute über 300 Studenten gefördert und konnten so einen Teil ihres Studiums im europäischen Ausland absolvieren.

The SOKRATES/ERASMUS program was started, in June 1987 in the form of an action plan of the European Union, to encourage co-operation among universities of member states, universities of EFTA member states and since 1998 universities of MOEL states.

SOKRATES/ERASMUS exchange programs are intended, within participating universities, to allow increases mobility of both students and instructors and to establish an effective, long lasting co-operation.

The Institute of Mechanical Engineering (IMW) of the Technical University of Clausthal, under the direction of Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz, has, since program inception, been a participating SOKRATES/ERASMUS member. To date, over 300 students have been able to complete credits at member universities outside of Germany.

1 Einleitung

Veränderte Bedingungen auf dem Arbeitsmarkt, wechselnde Anforderungen an die Qualifikationen von Hochschulabsolventen, Vorbereitung der Unternehmen auf den europäischen Binnenmarkt und der damit einhergehende Bedarf an entsprechend qualifizierten Arbeitskräften und entsprechend ausgebildeten Hochschulen sind als Gründe für die Bedeutung des SOKRATES/ERASMUS-Pro-

gramms zu nennen. Mittels der Förderung der Studenten- und Dozentenmobilität zwischen den europäischen Hochschulen soll das Ziel des "Europabürgers" vorbereitet werden.

2 Das SOKRATES/ERASMUS-Programm an der TU Clausthal

Bereits 1988 wurden am Institut für Maschinenwesen (IMW) mehrere Hochschulkooperationsverträge (HKP) mit europäischen Universitäten geschlossen. Zunächst beschränkte sich die Kooperation auf einige wenige Hochschulen. In den letzten 10 Jahren hat sich die Anzahl der Partnerhochschulen von 13 in 7 Ländern auf 39 Partnerhochschulen in 19 Ländern erhöht. Zur Zeit sind 8 Studiengänge an dem Austauschprogramm beteiligt. Seit dem WS 98/99 besteht zudem die Möglichkeit einen Studentenaustausch auch "fachfremd" durchzuführen, d.h. beispielsweise eine Studentin oder einen Studenten der Physik an eine Hochschule zu entsenden, mit der eigentlich ein Austausch im Fach Maschinenbau, Wirtschaftswissenschaften (oder, oder...) vereinbart wurde, immer natürlich unter der Voraussetzung, daß die Gasthochschule das entsprechende Fach auch anbietet.

Alle Hochschulen, die an dem SOKRATES/ERASMUS-Programm teilnehmen verpflichten sich untereinander, für ERASMUS-Studenten keine Studiengebühren zu erheben und die von ihren Studenten im Ausland erbrachten Studienleistungen anzuerkennen. Zu diesem Zweck wurde auch an der TU Clausthal das ECTS (European Credit Transfer System) eingeführt, das sich als eine Art "akademische Zweitwährung" entwickelt hat. Jede Hochschule, die eine Kooperationsvereinbarung im Rahmen von SOKRATES/ERASMUS abschließt, setzt die Anwendung des ECTS voraus. Aufgrund dieser Vereinbarungen ist ein reger und stetig zunehmender Studentenaustausch zwischen den Partneruniversitäten möglich. Seit einem Semester besteht sogar die Möglichkeit für Clausthaler Studierende des Studiengangs Maschinenbau an der University of Wales Cardiff School of Engineering den Abschluß eines Master of Science zu erlangen und dann an der TU Clausthal das Diplom, sodaß

der/die Studierende die Möglichkeit hat sein/ihr Studium mit einem Doppeldiplom abzuschließen und somit auf dem internationalen Arbeitsmarkt bessere Möglichkeiten zu besitzen. An einem Doppeldiplom mit der Universidad de Zaragoza / Spanien im Studiengang Maschinenbau wird zur Zeit gearbeitet.

Umgekehrt kommen Studenten von Partnerhochschulen an die TU Clausthal, um hier zu studieren. Auf diese Weise ist ein Wissensspektrum erschließbar, das bis zur Einführung von ERASMUS ungenutzt blieb.

Die durchschnittliche Aufenthaltsdauer der Studenten im Ausland beträgt normalerweise 6 Monate, so daß Zweifel, eine solche im Ausland vonstatten gehende Ausbildung könne nur oberflächlich erfolgen, von der Hand gewiesen werden muß. Der Auslandsaufenthalt der Studenten wird durch ein Teilstipendium finanziell unterstützt.

Ein weiterer und nicht zu unterschätzender Vorteil eines Auslandsstudiums ist das Erlernen bzw. Verbessern einer Fremdsprache. Es werden Sprachkurse angeboten, die sich multinational aus den an der Universität vertretenen ERASMUS-Studenten zusammensetzen. Einerseits muß zur gegenseitigen Verständigung die Landessprache oder Englisch Verwendung finden, sodaß bei einem nicht englisch sprachigen Land zusätzlich noch die englische Sprache geübt wird, andererseits werden in diesen Kursen leicht Kontakte zu anderen ERASMUS-Studenten geknüpft, die aus wieder anderen EU-Ländern kommen. Somit kann zusätzlich Verständnis für andere Länder bzw. Kulturen geschaffen werden.

Innerhalb des ERASMUS-Programms besteht auch für Dozenten die Möglichkeit an einem Austausch an die Partnerhochschulen in Form von Lehraufträge teilzunehmen. Der Aufenthalt hat eine Dauer von 1-8 Wochen. Einige dieser Austausch-Lehrveranstaltungen sind schon an den jeweiligen Partnerhochschulen in den Lehrplan aufgenommen worden. Sie werden als Blockveranstaltungen abgehalten. Zum großen Teil finden diese Lehrveranstaltungen in der jeweiligen Landessprache statt, wie z.B. die Vorlesungen von Prof. Dietz an der Universidad de Zaragoza zum Thema: "Konstruktionslehre", die Vorlesungen von Prof. Mordike in Malta und Prag, sowie die von Prof. Borchardt in Rennes.

Weitere Informationen zum SOKRATES/ERASMUS-Programm der TU Clausthal sind auch im

Internet abrufbar: <http://www.imw.tu-clausthal.de/~brandt/SOKRATES/ERASMUS.html>, <http://www.tu-clausthal.de/odin>

3 Ausblick

Die Nachfrage der Studenten, eine finanzielle Unterstützung durch ein Teilstipendium zu erhalten, wächst von Jahr zu Jahr. Zur Zeit sind an der TU Clausthal mehr als 100 Bewerber, die sich für ein Auslandsstudium an einer der Partnerhochschulen im Rahmen des ERASMUS-Programms beworben haben. Denn die bisherigen Qualifikationserfordernisse bzw. die bisherige generell gute Arbeitsmarktsituation ließen einen Auslandsaufenthalt nicht unbedingt notwendig erscheinen. Hier hat sich in letzter Zeit ein Wandel vollzogen. Auch an der TU Clausthal ist in Bezug auf die Fachrichtungen ein Wandel bemerkbar. Haben sich in den früheren Jahren hauptsächlich Studenten der Ingenieurstudiengänge für ein Auslandsstudium beworben interessieren sich jetzt immer mehr auch Studenten der Naturwissenschaften dafür.

Die verschiedenen und auch zahlreichen Auslandskontakte der TU Clausthal stellen für zukünftige Studenten einen großen Anreiz dar. Denn nicht nur der Studienort spielt für die Wahl der zukünftigen Universität eine Rolle, sondern auch die Auslandskontakte. Es ist wichtig für die Studenten zu wissen, wann und wie ein Auslandsaufenthalt in Form von Lehrveranstaltungen oder Praktikum in ihr Studium integriert werden kann.

4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß das SOKRATES/ERASMUS-Programm in den letzten Jahren an der TU Clausthal sehr erfolgreich war auch das IMW von vielen Kontakten profitiert hat. Die TU Clausthal zeigt mit der Teilnahme an diesem Programm ihre Integrationsbereitschaft in die europäische Forschungslandschaft und leistet einen wesentlichen Beitrag zur Verbreitung des Europa-Gedankens.

5 Literatur

- /1/ Europäische Kommission: SOKRATES - Leitfaden für Antragsteller, 1997
- /2/ DAAD, - Deutscher Akademischer Austauschdienst: Succes Stories II, 1994

Netzwerk für zukünftige Kooperationen - COPES führt europäische Wissenschaftler nach Clausthal

Grethe, V.

An der Technischen Universität Clausthal haben sich einige Institute aus dem Umfeld des SFB 180, die CUTEC GmbH und das IfE unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz zu einer Großforschungsanlage mit dem Namen COPES zusammengeschlossen. COPES wurde eingerichtet, um im Rahmen europäischer und anderer internationaler Förderungsprogramme Wissenschaftlern in- und ausländischer Institutionen Zugang zu den Forschungseinrichtungen dieser Forschungsstätten zu gewähren. Insgesamt stehen den Teilnehmern des TMR-Programms 100 unterschiedliche Anlagen und Laboreinrichtungen zur Verfügung. Die Forschungsaufenthalte können bis zu vier Monate dauern. Unterkunft, Verpflegung und Reisekosten werden erstattet.

COPES, the Clausthal Centre Of Process Engineering Systems - Design and Research, brings the institutions of the Technical University of Clausthal, together with a research institution for Environmental Engineering, CUTEC GmbH, and an institute for petroleum research IfE. Altogether 100 experimental installations and analysing laboratories are available to participants within the TMR programme. Researchers can stay up to four months to collaborate with others in their field. Accommodation, daily allowance and travel will be provided.

1 Ziele und Wesen von COPES

Im Rahmen des wirtschaftlichen und sozialen Vereinigungsprozesses in Europa muß die wissenschaftliche und technische Zusammenarbeit weiter ausgebaut werden, um durch internationale Kooperationen zwischen Wissenschafts- und Forschungsinstitutionen die Voraussetzungen für einen europäischen Wissens- und Erfahrungsaustausch zu schaffen. Das vierte Rahmenprogramm für Forschung und technologische Entwicklung der Europäischen Kommission (1994-1998) sieht daher die Förderung eines speziellen Programms zur Ausbildung und Mobilität von Wissenschaftlern (TMR-Training and Mobility of Researchers) vor, wobei eine Aktionslinie europäischen Wissenschaftlern

aus Hochschule und Industrie den Zugang zu Institutionen der Spitzenforschung ermöglicht.

Um für die Technische Universität Clausthal die Möglichkeit zu eröffnen, aktiv an diesem Programm teilzunehmen, haben sich 17 Institute der TU Clausthal aus dem Umfeld des Sonderforschungsbereichs 180 „Konstruktion von verfahrenstechnischen Maschinen bei besonderen mechanischen, thermischen oder chemischen Belastungen“, sowie das Clausthaler Institut für Umwelttechnik CUTEC GmbH und das Institut für Erdöl- und Erdgasforschung - IfE zum „Clausthal Centre of Process Engineering Systems - Design and Research“, kurz COPES, zusammengeschlossen. Aufgrund dieser Konstellation stellt COPES ein für Deutschland einmaliges Projekt dar, da es sich hierbei nicht um eine Großforschungsanlage im eigentlichen Sinne handelt. Durch die seit 1988 bestehende erfolgreiche interdisziplinäre Zusammenarbeit vieler Institute innerhalb des Sonderforschungsbereichs 180, entstand ein Komplex kleinerer und einander ergänzender Anlagen, der ein einzigartiges Anlagenpotential darstellt. Unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz, Direktor des Instituts für Maschinenwesen und Rektor der Technischen Universität Clausthal, wurde COPES im April 1996 eingerichtet, um im Rahmen europäischer und anderer internationaler Förderprogramme Wissenschaftlern in- und ausländischer Institutionen Zugang zu den genannten Forschungseinrichtungen zu gewähren.

Bislang sind im Rahmen des COPES - Vorhabens mehr als 30 Wissenschaftler aus Finnland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Israel, Italien, Norwegen, Österreich, Schweden und Spanien an die TU Clausthal gekommen. Die EU zahlt Reise- und Aufenthaltskosten für die Wissenschaftler und erstattet den Instituten die durch die Nutzung ihrer Anlagen entstehenden Kosten. Die meisten Wissenschaftler kamen aus Frankreich (10 Teilnehmer), aus Griechenland und Spanien waren bislang jeweils vier Wissenschaftler mit verschiedenen Projekten zu einem Forschungsaufenthalt in Clausthal. Die Aufenthaltsdauer liegt zwischen vier

Wochen und vier Monaten, hängt im wesentlichen von den Interessen der Wissenschaftler selbst ab und die sind individuell sehr verschieden. Ein Teil der Gastwissenschaftler kommt mit eigenen Problemstellungen und nutzt die Anlagen und Laboreinrichtungen um spezielle Fragestellungen zu bearbeiten. Andere Gastwissenschaftler kommen, um Anlagen oder Computerprogramme kennenzulernen und auf Grund der in Clausthal gesammelten Erfahrungen ähnliche Anlagen bzw. eine entsprechende Softwareverfügbarkeit in ihren Heimatinstitutionen aufzubauen. Dementsprechend flexibel wird auch die Planung und Durchführung der Forschungsaufenthalte gestaltet. Einige Wissenschaftler arbeiten lediglich an den Anlagen und Geräten eines Instituts, andere Wissenschaftler nutzen die Gelegenheit, um das breite Angebot an Maschinen und Analyselaboratorien zur Erarbeitung von vielfältigen Ergebnissen zu nutzen.

Die fachlichen Themenstellungen des Austauschs liegen vorwiegend auf dem Gebiet der Konstruktion, des Betriebes und der Berechnung sowie der Werkstoff- und der Fertigungstechnik von umweltfreundlichen verfahrenstechnischen Maschinen, Anlagen und Systemen. In verschiedenen Arbeitsgruppen werden beispielsweise Themen wie „Computergestützte Entwicklungs- und Fertigungsmethoden (CAx-Techniken)“, „Gas- und Abgasreinigung“, Recycling und Modifizierung von Kunststoffen“, „Recycling und Wiederverwertung industrieller Reststoffe“, „Herstellung, Anwendung und Untersuchung von neuen Werkstoffen in der Verfahrenstechnik“, „Erzeugung feinsten, fester Partikel“ usw. bearbeitet. Mit 100 Anlagen und Maschinen, die zum Teil einzigartig zumindest jedoch selten in Europa sind, steht ein technologisch hochentwickeltes Potential für Forschungszwecke zur Verfügung. Insgesamt stellt die europäische Kommission der TU-Clausthal 900.000 ECU (etwa 1,8 Millionen DM) zur Verfügung, um internationalen Wissenschaftlern die Möglichkeit zu geben, das breite Anlagenspektrum in Clausthal zu nutzen und damit innerhalb des Forschungsnetzwerkes in Europa wichtige Kontakte für zukünftige Kooperationen zu knüpfen. Bis September 1999 können im Rahmen von COPES interessierte Wissenschaftler aus Forschung und Industrie Forschungsarbeiten in Clausthal durchführen.

Weitere Informationen können unter <http://www.tu-clausthal.de/copos.html> abgerufen werden.

Die Kooperationsaktivitäten zwischen der TU Clausthal und der Universität Fuxin in China

Kalwa, R.; Schäfer, G.

Im September besuchten zwei Wissenschaftler der TU Clausthal die Technische Universität in Fuxin China. Der Besuch diente dem Abgleich der universitätsinternen Infrastruktur und der technischen Anbindung an das Internet, mit dem Ziel die neuen Kommunikationsmöglichkeiten im Rahmen der Kooperation zwischen den beiden Hochschulen zu nutzen.

In September two scientist from the Technical University of Clausthal where visiting the Liaoning University of Engineering and Technology in Fuxin (China). The network infrastructure, the connection to the global internet und the use of modern communication technology in teaching and learning where one of the main subjects which where discussed.

1 Einführung

In der Zeit vom 7.9.-19.9.1998 befanden sich zwei Wissenschaftler der Technischen Universität Clausthal an der Technischen Universität in Fuxin (China) (siehe **Bild 1**). Bei den Wissenschaftlern handelte es sich um den Akademischen Rat des Institutes für Maschinenwesen Dr.-Ing. Günter Schäfer, sowie den Mitarbeiter des Rechenzentrum Dipl.-Phys Ralf Kalwa. Die Reise fand im Rahmen des zwischen den beiden Universitäten abgeschlossenen Kooperationsabkommens statt, das zur Zeit vom DAAD gefördert wird und in Clausthal von Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. W. Knissel als Senatsbeauftragtem betreut wird. Das für dieses Treffen vorgesehene Thema lautete: „Aufbau einer Internet-basierenden Kommunikationsumgebung für die Kooperation zwischen Fuxin und Clausthal“. In diesem Zusammenhang trafen die Vertreter der TU Clausthal mit den Vertretern des Rechenzentrums der Universität in Fuxin, sowie den Verantwortlichen für das Datennetz der Hochschule zusammen. Wichtigstes Ziel war es vor Ort die Gegebenheiten und den Stand der Entwicklung im Bereich der Datenkommunikation festzustellen und die weitere Vorgehensweise abzustimmen. Im Einzelnen lassen sich die Aufgaben wie folgt zusammenfassen:

- Abgleich der universitätsinternen Infrastruktur (Intranet) und der technischen Anbindung an das Internet.
- System- und softwaretechnische Voraussetzungen für die Internet-Nutzung (insbesondere Mail-/Listserver, WWW-Server, Client-Software).
- Technische und organisatorische Grundstrukturen eines Informationssystems über die Lehrinhalte/Studienpläne und Forschungsaktivitäten beider Einrichtungen (siehe Absichtserklärung 1997) insbesondere:
- Abgleich der Softwarewerkzeuge für den Aufbau eines WWW-Angebotes;
- Strukturierung des WWW-Angebotes;
- Möglichkeiten des Teleteaching/Telelearning
- Nutzung von Credit-Systemen (ECTS).



Bild 1: Das Hauptgebäude der Technischen Universität Fuxin

Ein weiteres wichtiges Anliegen war der Abschluß eines Abkommens über die „Deutsche Sprachprüfung für den Hochschulzugang“ (DSH). Dieses Abkommen regelt die Anerkennung der DSH zwischen der Universität Fuxin und der TU Clausthal. Es ermöglicht der Universität Fuxin den Studenten, die beabsichtigen in Clausthal zu studieren, die für den Hochschulzugang notwendige Sprachprüfung schon in China abzunehmen. Dadurch soll erreicht werden, daß die Austauschstudenten vom Anbeginn ihres Aufenthaltes in Clausthal die Zeit für ihr Studium nutzen können. Neben dieser Vertrags-

unterzeichnung wurde während des Aufenthaltes die Weiterführung des Programms für das Jahr 1999 als Anlage zum Kooperationsvertrag von 1980 unterzeichnet.

2 Organisatorische Zuständigkeiten

Im Gegensatz zur Situation an den deutschen Hochschulen, bzw. an der TU Clausthal, ist das Rechenzentrum der Universität Fuxin nicht für das Datennetz der Hochschule verantwortlich. Während das Rechenzentrum für die Rechner, es befanden sich zum Zeitpunkt unseres Besuches sechs Rechnerpools an der Hochschule (siehe **Bild 2**), und Ihre Anwendungen an sich zuständig ist, liegt die Verantwortung für das Datennetz beim Rektorat (Universitätsleitung) der Hochschule und ist mit seiner Zentrale, (siehe **Bild 3**), im Hauptgebäude zu finden. Zum Zeitpunkt unseres Aufenthaltes waren zwei Personen mit dem Betrieb des Datennetzes und der dafür notwendigen Server betraut. Eine Besonderheit ist, daß einer der beiden Mitarbeiter auch die Nacht an seinem Arbeitsplatz verbringt, so daß aus dieser Sicht ein 24 Stunden Betrieb gewährleistet ist. Zusätzlich zur technischen Betreuung haben diese Mitarbeiter die Aufgabe das WWW-Angebot der Universität Fuxin zu entwickeln. Die WWW-Präsentation der Hochschule ist unter der URL <http://www.lntu.edu.cn/> zu finden. Zur Zeit sind die Internetseiten der Hochschule ausschließlich in chinesischer Sprache verfügbar. An einem englischsprachigen Angebot wird gerade gearbeitet.



Bild 2: Blick in einen Rechnerpool der Universität

Das von der Universität geplante Datennetz ist ausschließlich für die Verwaltung und Institute der Hochschule zugänglich. Es scheint zur Zeit nicht geplant zu sein die Rechnerpools an das Datennetz anzuschließen. Im Hinblick auf die Nutzung dieser Pools für den schon genannten Bereich Teleteaching/Telelearning und die Vorbereitung des Stu-

dentenaustauschs müßte hier ein Anschluß an die Wissenschaftsnetze geschaffen werden. Über das ODIN-System <http://www.tu-clausthal.de/odin/> und das für die Clausthale Lehrveranstaltungen aufgestellte Credit-System ECTS könnten die fuxiner Studierenden frühzeitig Ihren Stunden- und Prüfungsplan zusammenstellen. Nach jetziger Planung soll der Zugang für Studenten zum Internet über die Studentenwohnheime erfolgen, die hierzu von staatlicher Seite, über die örtliche Telefongesellschaft, an das Internet angebunden werden sollen.



Bild 3: Blick auf den zentralen LAN-Schrank, daneben der Unix- und NT-Server.

3 Die DV-Struktur der Universität Fuxin

Der Aufbau des universitätsinternen Netzwerkes ist in Fuxin weit fortgeschritten. Die gewählte Vernetzungsstruktur entspricht dem Stand der Technik. Die Gebäudeanschlüsse wurden über Lichtwellenleiter (LWL)-Freileitungen ausgeführt (siehe **Bild 4**). Die Zusammenfassung dieser Leitungen erfolgt über einen zentralen Switch (siehe **Bild 6**). Die Bandbreite der Gebäudeanbindungen beträgt 100Mbit/s (100BaseFX). Die Gebäudeanbindung erfolgt über an die Glasfaserleitungen angeschlossene 12/24 Port Hubs, die über einen entsprechenden 100BaseFX Uplink verfügen. Bei der tertiär Verkabelung in den Gebäuden wurden ausschließlich ungeschirmte Kabel (UTP) der Kategorie 3 verwendet. Diese Verkabelungsart ist nur für max. 10Mbit/s geeignet. Die Kabelführung innerhalb des Gebäudes erfolgt ohne die Verwendung von Kabelkanälen. Aus der Sicht der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) wird diese Kombination in Zukunft zu Problemen führen. Der zentrale Netzknoten im Hauptgebäude der Universität besteht im wesentlichen aus einem weiteren Fast-Ethernet-Switch, an dem die zentralen Server, eine leistungsfähige Unixworkstation, sowie ein NT-Server angeschlossen sind (siehe **Bild 3**). Ein Router zur

Verwaltung unterschiedlicher IP-Subnetze innerhalb der Universität ist auch vorhanden. Die Universität verfügt über den IP-Adressraum 202.199.224.0 – 202.199.238.255. Der der Universität zugeteilte Domainname ist „Intu.edu.cn“. Die Anbindung an das chinesische Wissenschaftsnetz (CERNET) erfolgt über die Universität in der Provinzhauptstadt Shenyang. Die Universität Fuxin ist über eine Modemstandleitung mit einer Bandbreite von 64Kbit/s in Shenyang angeschlossen .



Bild 4: Freileitungen am zentralen Netzknoten

Das Gateway bildet ein weiterer Router (siehe **Bild 5**). Die zur Zeit im Betrieb befindliche Installation wurde von einem Mitarbeiter der Universität Shenyang vorgenommen, der leider mittlerweile in Beijing tätig ist, und somit nicht mehr für Rückfragen zur Verfügung steht. Die zentralen Netzdienste Directory Name Services (DNS), Mail sowie WWW werden von dem Unix-Server übernommen. Der NT-Server befand sich zur Zeit unseres Besuchs im Aufbau.



Bild 5: zentraler LAN-Schrank, 64Kbit/s Modem (unten), Router darüber

Eine Datensicherung ist zur Zeit für keinen der Rechner verfügbar. Für den Aufbau eines umfangreicheren WWW-Angebotes und weiterer zentraler Dienste wird dies aber dringend erforderlich sein. Hierfür bieten sich grundsätzlich zwei Ansätze:

- Eine manuelle Datensicherung der unterschiedlichen Betriebssystemplattformen, hier Unix und NT, mit dem durch die Systeme dafür zur Verfügung gestellten Werkzeuge.
- Eine automatisch regelmäßig durchgeführte zentrale Datensicherung für die einerseits Hardware-Komponenten, wie z.B. Bandlaufwerke, bei wachsenden Datenmengen Stacker, zum anderen zusätzliche Software, die die unterschiedlichen Plattformen unterstützt, benötigt werden.

Unter Berücksichtigung des vorhandenen Personals und des zu sichernden Datenvolumens wurde von uns in der Diskussion mit den Mitarbeitern eine manuelle Datensicherung als zunächst ausreichend vorgeschlagen. Hierzu müssten die dafür nötigen Hardwarekomponenten beschafft werden.

Eine Klimatisierung des zentralen Rechnerraumes ist nicht vorhanden. Zum Zeitpunkt unseres Besuches im Spätsommer betragen die Tageshöchsttemperaturen 27 °C. Der Betrieb findet deshalb bei geöffneten Fenstern und geschlossenen Vorhängen statt. Die fehlende Klimatisierung wird unter Umständen zu Problemen führen, da die Außentemperaturen im Hochsommer deutlich über 30 °C liegen und der zentrale Rechnerraum auf der Südseite des Gebäudes liegt. Ein Kleinklimagerät wie es im chinesischen Straßenbild üblich ist, würde für diesen Zweck sicherlich ausreichen. Ein überschlägliche Kühllastberechnung wurde zu diesem Zweck mit den Angaben der Betreiber nach /1/ durchgeführt.

Zur Sicherstellung eines störungsfreien Betriebs und zur Vermeidung von Schäden die durch Spannungsschwankungen in der Stromversorgung hervorgerufen werden empfohlen wir den beiden Mitarbeitern den Einsatz von unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV). In diesem Zusammenhang konnte nicht geklärt werden, auf welchem Wege größere Beschaffungen bewilligt werden, bzw. inwieweit das Rechenzentrum mit dieser Dingen befaßt ist. Die weitere Planung der Universitätsleitung sieht kurzfristig einen Ausbau des Netzes auf ca. 240 Rechner im Verwaltungsbereich und den Instituten vor. Zur Zeit sind ca. 50 Rechner an das universitätsinterne Datennetz angeschlossen.

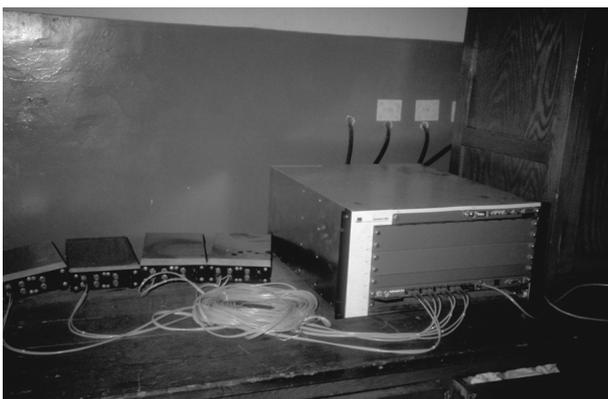


Bild 6: Zusammenführung der Freileitungen über Spleißboxen und Switch

4 Umgang mit den DV-Strukturen

Am Tag nach der Ankunft in Fuxin wurde die Delegation aus Clausthal von einem der stellvertretenden Rektoren der Universität begrüßt. Gleichzeitig wurden die Vertreter des Rechenzentrums sowie

die Verantwortlichen für das Datennetz der Universität vorgestellt. Am Nachmittag fanden erste Kontakte mit den Netzverantwortlichen und ein Rundgang über das Universitätsgelände zur Begutachtung der Netzinstallation statt. Hierbei wurde die dezentralen Netzinstallationen in den einzelnen Institutsgebäuden aufgenommen. Im Institut für Elektrotechnik waren ca. 15% der Räume mit einer Datenanschluß versehen. Die Leitungsführung im Gebäude erfolgt dabei nach der Maßgabe geringster Leitungslängen als Aufputzinstallation mit Schraubhaken in den Flure in Deckenhöhe.

Zum Zeitpunkt unseres Besuches bestand ein größeres Konfigurationsproblem mit dem Unix-Server. Auf diesem Server werden sämtliche wesentlichen IP-Dienste, die für die Anbindung an das Internet benötigt werden, betrieben. Die Suche nach dem Konfigurationsfehler erfolgte in Zusammenarbeit mit einem der beiden Mitarbeiter. Die vermeintliche Ursache für die Störung konnte erkannt und im Anschluß, leider erst nach unserer Abreise, mit Unterstützung aus Shenyang behoben werden. Die Schwierigkeiten hingen mit einer Accountingsoftware zusammen, die von der Universität Shenyang auf dem System installiert wurde.

Ein wesentlicher Programmpunkt während des Aufenthaltes, war die Vorstellung des ODIN-Systems (Online Datenmanagement im Internet), das an der TU Clausthal vom Institut für Informatik entwickelt und mit Erfolg für die Information der Studenten über das Vorlesungsangebot der Universität eingeführt wurde. In diesem System sind gleichzeitig mit den Vorlesungsdaten wie Ort, Raum, Titel und Vorlesungsdauer, die Credit-Informationen (ECTS), die für den Vergleich der Studiengänge zwischen den Universitäten im europäischen Raum nötig sind, abrufbar. Da die Absicht besteht, dieses System auch für die Kooperation zwischen Fuxin und Clausthal zu verwenden, ist es ein Ziel der Kontakte gewesen, für diesen Ansatz in Fuxin zu werben.

Die Universität in Fuxin verfügt über alle Hardware- und Softwarevoraussetzungen um dieses System zu übernehmen. Die Universität Fuxin würde ihr Lehrangebot gleichzeitig auf diesem Wege in strukturierter Form verfügbar machen und damit eine Erleichterung auf dem Weg zur noch engeren Zusammenarbeit der beiden Hochschulen schaffen. Diese lehr- und übungsveranstaltungsbezogene Darstellung und Wertung ist die wesentliche Grundlage für die Anerkennungspraxis studentischer Leistungen. Auf dieser Grundlage wird es

den Studierenden beider Universitäten möglich einzelne Schwerpunktthemen an dafür ausgezeichneten Lehrstühlen zu belegen. Diese Vorgehensweise eröffnet den Studierenden die Möglichkeit ihre Ausbildung durch ein persönliches Profil zu prägen ohne Ausbildungsinhalte zu vernachlässigen, die als Grundlage eines jeden Studienganges festgelegt sind. Weitere Einzelheiten zu dem Konzept der Modularisierung von Studiengängen sind in dem Artikel von Dietz und Wächter in /2/ (dieser Band Seite 147) beschrieben.

Bei einem weiteren Treffen mit der Universitätsleitung und Begrüßung durch den Rektor der Universität, äußerte dieser die Hoffnung, daß die Nutzung des Internet auch für den Bereich des Teleteaching/Telelearning Anwendung finden kann.

Da die multimedialen Anwendungen in der Regel mit hohen Anforderungen an die Netzinfrastruktur einhergehen, ist ein weiterer Ausbau der Bandbreite der internationalen Datenverbindung nötig. Zur Zeit besteht eine 64kbit/s Verbindung zwischen dem deutschen BWiN (Breitband Wissenschaftsnetz) und dem CERNET (China Educational and Research Network). Die Leitung ist aus Richtung China, aufgrund der Zeitverschiebung von 6 Stunden nur mit Einschränkungen nutzbar. Spätestens mit Beginn des Tages in Deutschland bricht der Datenaustausch zusammen. Von Deutschland aus ist die Leitung zu keiner Tageszeit hinreichend verfügbar, da die Nutzung der Leitung aus Richtung Deutschland wesentlich höher ist. Die Verbindung des CERNET zum internationalen Internet ist mit 2Mbit/s wesentlich besser. Aufgrund des Netzstruktur werden Daten aus dem BWiN ausschließlich über die 64Kbit Leitung gesendet und empfangen und nicht über den grundsätzlich möglichen Weg über die Transatlantikleitungen. Dieser Sachverhalt soll mit dem DFN-Verein (Deutsche Forschungsnetz) und dem Bundesforschungsministerium, das dieses Projekt mitfinanziert diskutiert werden.

Auf dieser Basis ist ein Informationsaustausch nur mit den klassischen Netzdiensten wie Mail (Listen) und News denkbar. Zur Unterstützung des Deutschunterrichtes in Fuxin könnten diese Dienste für Kurse oder z.B. Diskussionslisten durchaus ein nützliches Hilfsmittel sein. In Gesprächen auf dem Vorplatz des Universitätshauptgebäudes wurde von den chinesisches Studierenden diesbezüglich ein erheblicher Bedarf geäußert. Alleine die Möglichkeit mit „alltagsdeutschen“ Sprachgewohnheiten umgehen zu können, wurde von Ihnen als große Chance

gesehen. Die den Studierenden zur Verfügung stehenden Lehrmittel spiegeln zu großen Teilen den Sprachgebrauch unserer „Dichter und Denker“ wieder. Die Aktualisierung des Sprachgebrauchs für alltägliche Situationen ist für Lehrende und Lernende gleichsam nützlich.

Für die deutschen Austauschstudenten ist die Möglichkeit über Email mit den Betreuern an der Heimatuniversität zu kommunizieren unbedingt erforderlich. Zur Zeit können die Studenten nur über das Office for Foreign Affairs Emails versenden und empfangen, haben dafür aber keinen eigenen Zugang. Die Frage die in diesem Zusammenhang gestellt werden muß ist, wie die Studierenden von beiden Universitäten zum jetzigen Zeitpunkt einen wie auf immer gestalteten Zugang zum Internet in Fuxin erhalten.

5 Das elektrotechnische Labor

Eines der konkreten Kooperationsprojekte ist das elektrotechnische Labor zur Simulation von umrichter gesteuerten Antriebssystemen. Innerhalb dieses Projektes werden Antriebssysteme für den Einsatz in z.B. Schienenfahrzeugen oder verfahrenstechnischen Großanlagen zur mechanischen Zerkleinerung untersucht. Ziel der Forschungsaktivitäten ist es die Umrichtersteuerungen so einzustellen und zu nutzen, daß bei Schienenfahrzeugen eine Schlupfminimierung erreicht wird. Die sich daraus ergebenden Vorteile sind eine erhöhte Zugkraft der Lokomotive bei gleichzeitig geringerem Verschleiß des Rad/Schienekontaktes. Bei den verfahrenstechnischen Zerkleinerungsmaschinen auf mechanischer Basis geht es in erster Linie um die Reduzierung der mechanischen Beanspruchungsspitzen im Antriebsstrang. Durch gezielte Parametervariationen kann das Regelverhalten der Umrichter so beeinflusst werden, daß diese beiden Ziele erreichbar sind.

Im ersten Abschnitt des Kooperationsprojektes wurden an der TU Clausthal im Institut für elektrische Energietechnik bei Professor Beck mehrmonatige Untersuchungsreihen von deutschen und chinesischen Wissenschaftlern in Zusammenarbeit durchgeführt. Das Institut der TU Clausthal verfügt seit einigen Jahren über die entsprechenden Prüfstände. Im zweiten Abschnitt des Projektes sollen ähnliche Prüfstände in Fuxin aufgebaut werden. Während unseres Aufenthalts in Fuxin wurden die notwendigen Prüfstandskomponenten beschafft. Die vorgesehenen Räumlichkeiten im Elektrotech-

nischen Labor der Universität Fuxin wurden uns vorgestellt. Bei dieser Gelegenheit konnten wir uns die weiteren Arbeitsgebiete des Elektrotechnischen Labores ansehen. Neben der Ausbildung in den Grundlagen der Elektrotechnik, wie z.B. das Grundlagenpraktikum, werden Simulations- und Steuerungsprogramme für Füll- und Entleerungsvorgänge größerer Siloanlagen entwickelt. Nach der Installation der Komponenten des Antriebstechnischen Prüfstandes wird im Frühjahr 1999 ein clauthaler Student nach Fuxin reisen um im Rahmen einer Studienarbeit die Inbetriebnahme mit den chinesischen Wissenschaftlern durchzuführen und erste Versuchsreihen zu fahren.

6 Ausblick

Auch nach der Rückkehr konnte der Kontakt zu den Mitarbeitern der Universität Fuxin über Email aufrecht erhalten werden. Sowie einzelne angesprochenen Punkte, z.B. Fertigstellung eines englischsprachigen WWW-Angebotes, in Angriff genommen werden, werden die weiteren Schritte aus Clausthal „online“ unterstützt. Auf diese Weise kann ein weiterer Besuch von Clausthaler Seite optimal vorbereitet werden, um die Zeit eines Aufenthaltes in Fuxin möglichst effektiv zu gestalten, z.B für die Installation und Inbetriebnahme des ODIN-Systems. In Fuxin selber werden auch weitere Anstrengungen unternommen, um das Lehrangebot und damit die Attraktivität der Universität im In- und Ausland zu steigern. Ein Beispiel ist der Neubau der Universitätsbibliothek (siehe **Bild 7**), der mit großem Eifer vorangetrieben wird. Während unseres Aufenthaltes wurde an sieben Tagen der Woche täglich von 5.30 – 2.00 Uhr des folgenden Tages auf der Baustelle gearbeitet.



Bild 7: Neubau der Universitätsbibliothek auf dem Campus in Fuxin

7 Literatur

- /1/ Recknagel; Sprenger; Schramek: Taschenbuch für Heizungs + Klimatechnik 97/98
- /2/ Dietz, P.; Wächter, M.: Institutsmittellung Nr. 23, IMW Clausthal 1998

Der goldene Schnitt im Maschinenbau

Betaneli, A. J.; Sanadse, G. O.

Im Sinne der Systemtechnik wird eine statistische Analyse der Zusammenhänge zwischen den Proportionen der Hauptabmessungen moderner Flugzeuge in Abhängigkeit von den Fluggeschwindigkeiten und Machzahlen durchgeführt.

A statistical analysis has been carried out to gain a relation between the main dimensions of modern aircrafts and their flight velocities /mach numbers.

1 Einleitung

In der Architektur, Musik, Geometrie, Mechanik und auch in der Technik, besonders im Maschinenbau, spielen die Proportionen eine sehr wichtige Rolle. Sehr viele moderne Erzeugnisse (Werkzeugmaschinen, Geräte und Baugruppen) sind komplexe Systeme, die aus einer Vielzahl von Bestandteilen zusammengesetzt sind. Bei der Entwicklung von Baureihen /1/ können methodische Hilfsmittel wie z.B. die Ähnlichkeitsgesetze der Mechanik und die Reihengesetze, z.B. die als Normzahlen vorgegebene dezimalgeometrische Reihe, angewendet werden. Die dezimalgeometrische Reihe legt bevorzugte Proportionen fest. Besonders wirkungsvoll ist die Kombination von Baureihen- und Baukastensystemen.

Das Wesen einer Baureihenentwicklung besteht darin, daß man von einer Grundbaugröße der zu entwickelnden Baureihe (Maschine, Baugruppe oder Einzelteil) ausgeht und von dieser weitere Baugrößen nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten ableitet. Dabei wird der Ausgangsentwurf als Grundentwurf und die abgeleiteten Baugrößen als Folgeentwürfe bezeichnet /2/.

Von Ähnlichkeiten wird gesprochen, wenn das Verhältnis mindestens einer physikalischen Größe beim Grund- und bei den Folgeentwürfen konstant, d.h. invariabel, bleibt. So ist z.B. geometrische Ähnlichkeit gegeben, wenn stets das Verhältnis aller jeweiligen Längen bei den Folgeentwürfen der Baureihe zum Grundentwurf konstant bleibt /2/.

Proportionen sind nicht nur ästhetische Randbedingungen für die Schönheit einer Konstruktion, sie

haben auch eine exakte technische Effektivität, siehe **Bild 1**.

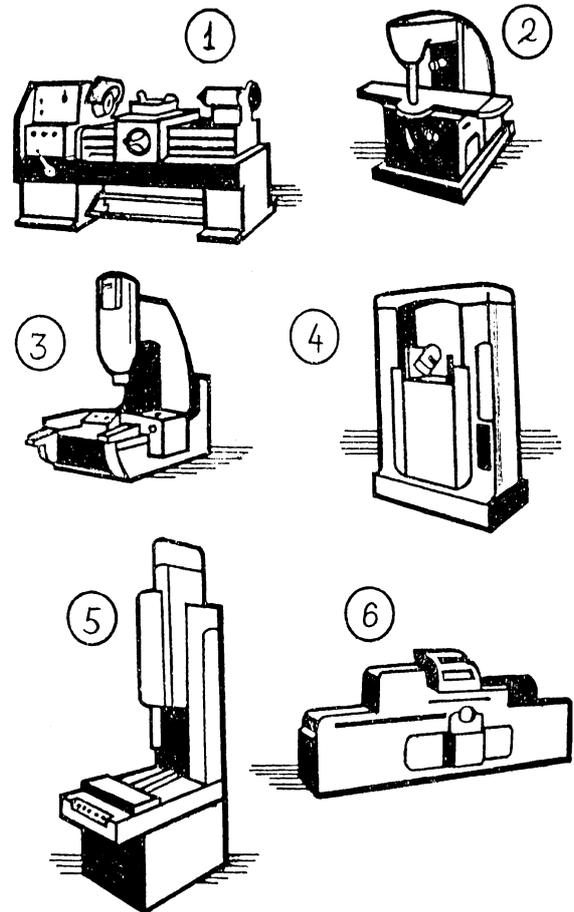


Bild 1: Proportionale Konstruktion von Werkzeugmaschinen /3/; 1-Drehmaschine, 2-Fräsmaschine, 3-Koordinatenausdrehmaschine, 4-Zahnfräsmaschine, 5-Hohmaschine, 6-Schleifmaschine

In der Welt sind verschiedene Proportionen bekannt: arithmetische, geometrische und acht harmonische. Besonders interessant ist die aus uralten Zeiten bekannte harmonische Proportion, die von Leonardo da Vinci der "goldene Schnitt" genannt wurde.

Den Schwerpunkt des goldenen Schnittes kann man mit Hilfe der Reihe von Fibonacci (Leonardo Pisano - Italienischer Mathematiker des XII. Jahrhunderts), der Fibonacci Folgenreihe bestimmen.

Dies ist folgende Zahlenreihe: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144,

Sie wird durch das recurrierende Gesetz $a_{n+1}=a_n+a_{n-1}$ bestimmt (jedes Glied der Reihe ist der Summe der beiden vorhergehenden Glieder gleich). Mit Hilfe dieser Reihe kann man den goldenen Schnitt bestimmen. Dazu muß jedes Glied der Reihe durch das vorhergehende dividiert werden. $1:1=1$; $2:1=2$; $3:2=1,5$; $5:3=1,666$; $8:5=1,6$; $13:8=1,625$; $21:13=1,615$; $34:21=1,619$;

Besonders wichtig sind die Abmessungsproportionen, weil sie die Gestaltung der Maschine bestimmen. Die Hauptabmessungen einer Drehmaschine sind auf dem **Bild 2** gezeigt.

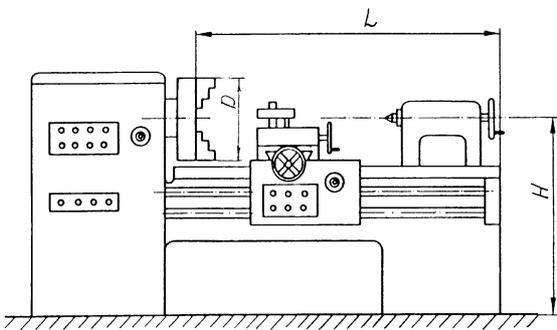


Bild 2: Die Hauptabmessungen einer Drehmaschine /2/; D-Durchmesser, L-Länge, H-Höhe

Aufgrund der sorgfältig durchgeführten Forschungen in /3/ kann man bestätigen, daß die Proportionen der Hauptabmessungen der unterschiedlichen Werkzeugmaschinen, besonders aller modernen Werkzeugmaschinen dem Gesetz des goldenen Schnittes entsprechen.

Diese Gesetzmäßigkeit ist die Grundlage für eine mögliche Gestaltoptimierung der Werkzeugmaschinen. Die Gestaltoptimierung ist besonders wichtig im Bereich der Verkehrstechnik (Autos, Lokomotiven, Fluggeräte und Schiffe). Es ist zweckmäßig auf diesem Bereich unter dem Gesichtspunkt des goldenen Schnittes weitergehende Forschungen zu unternehmen. Wir meinen, daß dies sehr wichtig für diese spezielle Konstruktionsmethodik ist.

In diesem Aufsatz berichten die Verfasser ihre Ergebnisse über die Forschung der Proportionen der Hauptabmessungen von Flugzeugen.

2 Zielsetzung

Das Ziel des Vorhabens war die Untersuchung der Übereinstimmung der Proportionen von Flugzeugabmessungen mit dem Gesetz des goldenen Schnittes. Vom Standpunkt der Systemtechnik aus wurde eine statistische Analyse der Abmessungen moderner Flugzeuge (Herstellung nach dem Jahr 1970) durchgeführt. Die Verhältnisse zwischen den Hauptabmessungen (Spannweite I und Flugzeuglänge L), wurden in Abhängigkeit der Flugeschwindigkeiten v und der Machzahlen M bestimmt. Die Flugzeugabmessungen sind in **Bild 3** gezeigt.

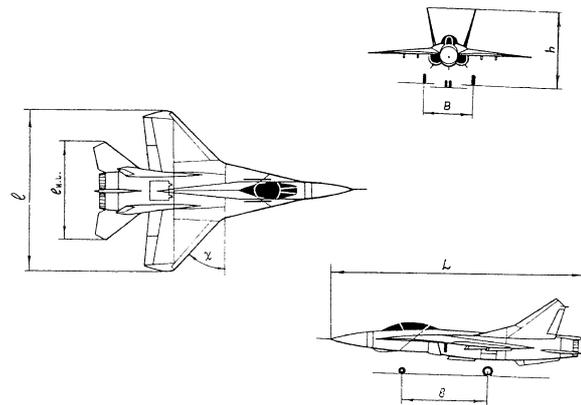


Bild 3: Die Flugzeugabmessungen; I-Spannweite, $l_{H,L}$ -Leitwerkspannweite, χ -Pfeilwinkel, b-Fahrwerkabstand, B-Fahrwerkachsabstand, L-Flugzeuglänge

Hierbei wurden Angaben zu Flugzeugabmessungen nach /4/ und /5/ benutzt.

Für die Bestimmung der Flugzeuggestaltung wurde die Flugzeugdraufsicht, bei Automobilen und Lokomotiven die Seitenansicht und bei Werkzeugmaschinen und Gebäuden die Vorderansicht ausgewertet. Die Flugzeuggestaltung ist von der Flugeschwindigkeit abhängig. Deswegen wurde folgende Klassifizierung eingeführt:

- Ultraleichtflugzeuge $v=$ 60 - 120 km/h
- Kolbenmotorflugzeuge $v=$ 160 - 360 km/h
- Turboprop-Flugzeuge $v=$ 300 - 500 km/h
- Unterschall-manövrierfähige Strahlflugzeuge
 $v=$ 560 - 850 km/h
- Verkehrsflugzeuge $v=$ 630 - 960 km/h
- Überschallflugzeuge (Machzahl $M=1,2$ bis $3,5$)
 $v=$ 1200 - 3500 km/h

3 Erörterung der Ergebnisse der statistischen Analyse

Die Ergebnisse der statistischen Aufbereitung der Proportionen der Flugzeug-Hauptabmessungen ist in **Bild 4** und **5** zu sehen.

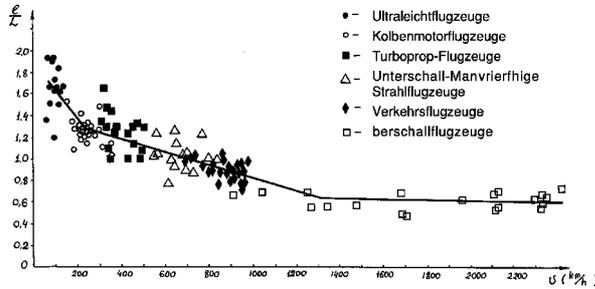


Bild 4: Die Abhängigkeiten der Verhältnisse b/l von den Fluggeschwindigkeiten v in km/h

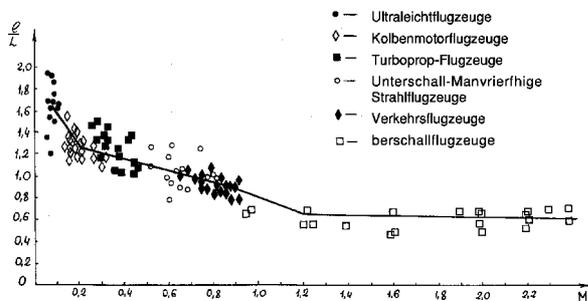


Bild 5: Die Abhängigkeiten der Verhältnisse b/l von den Machzahlen M

In der **Tabelle 1** sind die den **Bildern 4** und **5** zugrundeliegenden Angaben zusammengestellt.

Flugzeuggruppe	Fluggeschwindigkeit v in km/h	Machzahl M	b/l	b/l gemittelt
Ultraleichtflugzeuge	60-120	<1	1,3-1,9	1,6
Kolbenmotorflugzeuge	160-360	<1	1,1-1,5	1,3
Turboprop-Flugzeuge	300-500	<1	1,0-1,5	1,27
Unterschall-manövriertfähige Strahlflugzeuge	560-850	<1	0,8-1,3	1,0
Verkehrsflugzeuge	630-960	<1	0,7-1,1	0,9
Überschallflugzeuge	1200-3500	1,2-3,5	0,4-0,7	0,6

Tabelle 1: Zusammenstellung der Verhältnisse b/l

Es ist bekannt, daß die Schallgeschwindigkeit von der Höhe, der Temperatur und dem Wetter abhängig ist. Auf dem **Bild 5** und in der **Tabelle 1** sind die Machzahlen für die Bedingungen der internationalen Standardatmosphäre berechnet worden (Durchschnittlich für die Troposphäre und die Stratosphäre). Besonders beachtenswert ist das Ergebnis der statistischen Analyse der Proportionen der Hauptabmessungen für die Ultraleichtflugzeuge und die Überschallflugzeuge, beide entsprechen dem Gesetz des goldenen Schnittes. Auf den **Bildern 4**

und **5** ist die Kurve im Bereich der Überschallflugzeuge gering gestreut und parallel zur Abszissenachse. Außerdem muß beachtet werden, daß für Überschallflugzeuge $l < L$ ist. Deswegen sind die Verhältnisse L/l abhängig von der Machzahl in **Bild 6** dargestellt.

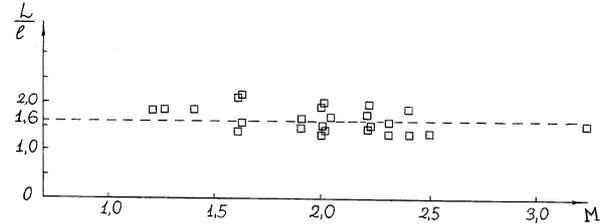


Bild 6: Die Abhängigkeiten der Verhältnisse L/l von den Machzahlen der Überschallflugzeuge

Für Überschallflugzeuge ist das durchschnittliche Verhältnis $L/l=1,6$. Das bedeutet, daß die Proportionen der Hauptabmessungen dem Gesetz des goldenen Schnittes entsprechen. Dabei sind folgende Überschallflugzeuge besonders hervorzuheben: MIG 25 (ehemals UdSSR), F-4 (USA), Mirage 2000 (Frankreich).

Nach Auswertung der statistischen Analyse kann für steigende Fluggeschwindigkeiten folgende Tendenz formuliert werden: Für Unterschallflugzeuge (Ultraleichtflugzeuge, Kolbenmotorflugzeuge, Turboprop-Flugzeuge) wächst die Spannweite gegenüber der Länge. Für unterschall-manövriertfähige Strahlflugzeuge verhalten sich die Länge und die Spannweite näherungsweise proportional. Für Überschallflugzeuge ist die Längenabmessung größer als die Spannweite, siehe **Bild 7**.

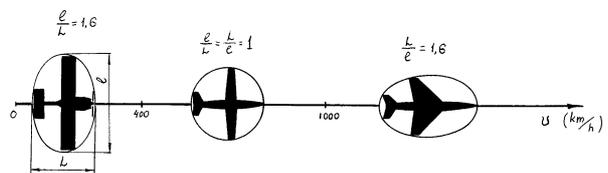


Bild 7: Die Veränderung der Hauptabmessungen der Flugzeuge in Abhängigkeit von den Fluggeschwindigkeiten v in km/h

Zu den Ultraleichtflugzeugen kann folgendes bemerkt werden: Die Proportionen der Hauptabmessungen entsprechen exakt dem Gesetz des goldenen Schnittes. In Georgien haben junge Ingenieure, die ehemaligen Studenten des Lehrstuhls für Flugzeugbau der Georgischen Technischen Universität Tbilissi, das Ultraleichtflugzeug "Spilo" konstruiert

und in der Flugzeugfabrik Tbilissi hergestellt. Die Proportionen der Hauptabmessungen dieses Flugzeuges entsprechen exakt dem Gesetz des goldenen Schnittes ($l/L=8,6/5,3=1,6226415$).

Aus diesen Ergebnissen kann man schließen, daß die Proportionen der Hauptabmessungen moderner Flugzeuge, besonders von Ultraleicht- und Überschallflugzeugen exakt dem Gesetz des goldenen Schnittes entsprechen. Für den Entwurf neuer Ultraleicht- und Überschallflugzeuge kann das Gesetz des goldenen Schnittes sinnvoll angewendet werden. Aufgrund der Tendenz auch im Bereich der Verkehrsflugzeuge Überschallgeschwindigkeiten zu erreichen, sollte hier in Zukunft bei der Wahl der Proportionen nach den Regeln des goldenen Schnittes konstruiert werden.

Die Ergebnisse der hier vorliegenden Untersuchungen können die Optimierung des geometrischen Modells des Flugzeugentwurfs unterstützen. Die Bedeutung des geometrischen Modells wird besonders deutlich bei der Konzeptgestaltung des Flugzeugs. Entsprechend kann bei Einsatz eines CAD-Systems die Optimierung des funktionalen Blocks "Geometrie" unterstützt werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Sinne der Systemtechnik wurde eine statistische Analyse der Zusammenhänge zwischen den Proportionen der Hauptabmessungen (Verhältnis zwischen der Spannweite l und der Flugzeuglänge L) moderner Flugzeuge (Herstellung nach dem Jahr 1970) in Abhängigkeit von den Fluggeschwindigkeiten und Machzahlen durchgeführt.

Die wissenschaftliche Neugier besteht in dem Nachweis der Übereinstimmung der Proportionen der Hauptabmessungen mit dem Gesetz des goldenen Schnittes, besonders für Ultraleicht- und Überschallflugzeuge. Für Unterschallflugzeuge wurde das Verhältnis l/L und für Überschallflugzeuge das Verhältnis L/l bestimmt.

Der praktische Nutzen besteht in der gezielt möglichen Optimierung des geometrischen Modells von Flugzeugen nach der Methode des goldenen Schnittes. Die Bedeutung des geometrischen Modells wird besonders deutlich bei der Konzeptgestaltung des Flugzeugs. Entsprechend kann bei Einsatz eines CAD-Systems die Optimierung des

funktionalen Blocks "Geometrie" unterstützt werden.

5 Literatur

- /1/ Dietz, P.: Institutsmittteilung Nr. 13, IMW Clausthal 1988
- /2/ Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung; 3. Auflage; Springer 1993
- /3/ Powileiko, R.P.: Die Architektur der Maschinen; Nowosibirsk 1974
- /4/ Kopenhagen, W.; Neustadt, R.: Das grosse Flugzeugtypenbuch; 4. Auflage; Berlin VEB Verlag für Verkehrswesen; Transpress 1987
- /5/ Katonai repülögépek és helikopterek; Tipuskönyv; Szentesi György; Zrinyi Katonai Kiado; Budapest 1987

Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes

Institut

Die Lehre, Ausbildung, Forschung und Entwicklung am Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen (IMW) deckt folgende Bereiche ab:

- Konstruktion und Berechnung von Maschinenteilen
- Konstruktionssystematik
- Rechnereinsatz im Maschinenbau
- Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen
- Maschinenakustik
- Experimentelle Festigkeitsermittlung und Spannungsoptik
- Technische Normung

Das interdisziplinäre Team am IMW besteht aus ca. 30 wissenschaftlichen Mitarbeitern/-innen aus den Bereichen Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Informatik und Physik. Weitere 11 Mitarbeiter/-innen und 7 Auszubildende arbeiten in der Verwaltung, mechanischen und elektronischen Werkstatt.

Technische Ausrüstung

Für die entsprechenden Forschungsschwerpunkte verfügt das IMW über gut ausgestattete Labore (Spannungsoptik, Akustik, CIM), diverse maschinentechnische Prüfstände und die notwendige Rechnerausstattung.

Die Untersuchung von Maschinenelementen kann auf zwei hydraulischen Verspannprüfständen, einem Torsions-Schwingprüfstand, einem Umlauf-, Biege- und Torsionsprüfstand sowie einer liegenden Zugprüfeinrichtung durchgeführt werden. Eventuelle berührungslose Übertragungen von Meßwerten werden mit einer 64 Kanal Telemetrie-einrichtung bewältigt. Ein Schleuderprüfstand für schnell drehende Maschinenteile (z.B. Rotoren, Abweiseradwindsichter), ein Prüfstand für Feinprallmühlen, eine Reaktionsschwingmühle für Gas-Feststoffreaktionen im Semi-Batch-Betrieb und ein Injektorprüfstand ergänzen die Prüfeinrichtungen des IMW für Untersuchungen an verfahrenstechnischen Maschinen.

Das Labor für statische Spannungsoptik verfügt über Einrichtungen und Werkstattinfrastruktur für spannungsoptische Untersuchungen an Bauteilmö-

dellen von mikroskopischer Größe bis zu einer Größe von 1,2 m. Die hierzu zum Teil notwendige eigenspannungsarme Bearbeitung von Modellmaterialien werden von der Institutswerkstatt sachkundig ausgeführt ebenso wie die aufgabenspezifische Anfertigung von Belastungseinrichtungen. Die technische Ausstattung des Labors für dynamische Spannungsoptik ermöglicht Messungen an hochfrequent belasteten Bauteilen. Mittels eines elektrodynamischen Schwingerregers können Bauteile gezielt frequenzselektiven Belastungen bis zu einer Frequenz von 10 kHz unterworfen werden. Der Einsatz als optisches Ganzfeldverfahren ermöglicht darüber hinaus auch die Visualisierung sich einstellender Beanspruchungszustände, wie sie bei Stoßanregungen oder im Bereich der Ballistik auftreten.

Das Akustiklabor am IMW verfügt über ein umfangreiches Meßequipment sowie einen schallarmen Raum zur Erfassung und Auswertung des von Maschinenstrukturen abgestrahlten Schalldruck- und Schalleistungspegels. Neben Schmalbandanalysen mittels eines FFT-Analysators bietet ein verfügbarer Bandpaßfilter die Möglichkeit der Terz- und Oktavanalyse. Mittels eines Handschallpegelmessers können auch schnelle Vorortmessungen durchgeführt werden.

Das CIM-Labor besteht aus zwei 4 Achsen Fräsmaschinen (MAHO MH700S/MH600), einer Drehmaschine (Monforts MNC 5), einer Senkerodiermaschine (CHARMILLER ROBOFORM 505) mit 3D Bahnsteuerung, und einer ZEISS Koordinatenmeßmaschine mit NC-Rundtisch. Zur CAM-Lösung der Firma DLoG gehören ein werkstattorientiertes NC-Programmiersystem, Einrichtungen zur Direktübertragung von NC-Programmen an die Maschinensteuerungen und Anwendungen zur Maschinen-/Betriebsdatenerfassung sowie zur Maschinenzustandsanzeige. Als CAD/CAM-System wird Pro/Engineer mit Pro/Manufacturing eingesetzt. Maschinenspezifische Postprozessoren erlauben eine durchgängige CAD/NC-Verfahrenskette. SAP R/3 wird als PPS-System genutzt.

Die Rechnerausstattung umfaßt sechs Server, die die insgesamt ca. 100 Rechner des Institutes vernetzen. Diese umfassen einen speziellen Internetserver (WWW/EMail/FTP), einen Apple Macintosh

Server, einen Windows NT Server und einen Abteilungsserver SUN SPARC 1000 zur Versorgung der 50 SUN Workstations. Als Standardsoftware stehen eine Vielzahl von Programmen zur Verfügung unter anderem die CAD Pakete ProEngineer, Catia sowie die FEM Programme MARC/ MENTAT und ProMechanica. Zwei spezielle Mehrprozessorrechner (IBM RS6000, SUN SPARC 20) stehen als COMPUTE-Server für FEM Berechnungen und kinematische Simulationen zur Verfügung.

Kooperationsangebote

Das IMW arbeitet in einer Vielzahl von Projekten in enger Kooperation mit namenhaften Industrieunternehmen in allen Tätigkeitsbereichen zusammen:

Entwicklung und Fertigung

- Entwicklung neuer Konstruktionen,
- Fertigungsmöglichkeiten für Prüfkörper und Nullserien,
- Softwareentwicklung zur Simulation und Optimierung von Fertigungsverfahren und zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses.

Messungen und Berechnungen

- Durchführung von komplexen Festigkeitsberechnungen und -nachweisen mit Hilfe der FEM (2D/3D),
- Vermessung und Qualitätskontrolle auf der Koordinatenmeßmaschine,
- DMS-Messungen unter Betriebsbedingungen an Maschinenteilen,
- Durchführung von maschinenakustischen Untersuchungen und Optimierungen,
- Durchführung von Verschleiß- und Festigkeitsuntersuchungen auf den Prüfständen.

Beratung und Gutachten

- Beratung, Untersuchung und Erstellung von Gutachten zur Bauteilfestigkeit,
- Beratung und Gutachten zur Konstruktion lärmärmer Maschinen,
- Beratung im Rahmen der Einführung von Qualitätsmanagementsystemen entsprechend DIN EN ISO 9000 ff.,
- CAD, FEM Beratung und Einführung in Betriebe,
- Beratung und Hilfestellung bei der Beantragung und Durchführung von nationalen und internationalen Forschungsprojekten.

Durch die interdisziplinäre Zusammensetzung werden im Institut auch Entwicklungsprojekte für komplette Maschinen und Steuerungen durchgeführt. Die Zusammenarbeit kann auch über Praktika, Studien- und Diplomarbeiten erfolgen.

Neben den oben aufgeführten Angeboten bietet das Institut für Maschinenwesen interessierten Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen, insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen, Beratungen zu den europäischen Förderungsmaßnahmen an. Dies beinhaltet neben der Beratung zur Einwerbung von Fördermitteln auch Hilfestellung bei der Vorbereitung, der Durchführung und der Partnersuche bei europäischen Forschungsprojekten.

Forschungsschwerpunkte

Die Forschungsschwerpunkte gliedern sich in fünf Bereiche:

Konstruktion und Berechnung von Maschinenteilen

Neben allgemeinen Fragen der Maschinenelemente wie Beanspruchungsermittlung, Reibung, Verschleiß und Tragfähigkeit stehen folgende Maschinenelemente im Vordergrund:

- Welle-Nabe-Verbindungen (u.a. Zahn- und Keilwellen-Verbindungen und geschwächte Preßverbindungen),
- Ausgleichkupplungen,
- Seiltrommeln (ein- und mehrlagig bewickelt),
- Bolzen-Lasche Verbindungen,
- Verbindungstechnik Metall-Keramik bei hohen Temperaturen,
- Verbindungselemente unter hohen mechanischen und thermischen Belastungen.

Weitere Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der Beanspruchungsanalyse und Optimierung stoßbelasteter Maschinenteile, mit der elasto-plastischen Beanspruchung von Maschinenelementen und der Entwicklung von Berechnungssoftware für Maschinenelemente.

Konstruktionssystematik und Rechnereinsatz im Maschinenbau

Die Entwicklung von Konstruktionsinformationssystemen zur Unterstützung des Produktentwicklers unter Einbeziehung aller Produktlebensphasen sind Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte. Als Grundlage für ein phasenübergreifendes Arbeiten stehen insbesondere die Entwicklung von Schnitt-

stellen und der Produktdatenaustausch (STEP ISO 10303/ISO 13584) im Vordergrund. Weitere Projekte beschäftigen sich mit:

- dem Management kooperativer Produktentwicklungsprozesse,
- dem Qualitätsmanagement in der Konstruktion,
- der Werkstoffauswahl in der Konstruktion,
- der Simulation, Berechnung und Optimierung von kinematisch komplexen Fertigungsverfahren (Zahnkantenabdachungen, Wirbelfräsen),
- dem fertigungsgerechten Konstruieren insbesondere an Bauteilen aus Feinblech.

Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen

Schwerpunkt der Untersuchungen und Entwicklungen von verfahrenstechnischen Maschinen unter besonderen mechanischen, chemischen und thermischen Belastungen sind:

- Entwicklung von Heißgasumwälzaggregate,
- Entwicklung von Reaktionsmühlen,
- Untersuchung der Zusammenhänge beim Prallmahlen,
- Gestaltung schnell laufender Rotoren (Windsichter/Prallmühlen),
- Entwicklung von Maschinenelementen und Verbindungstechniken für hohe Temperaturen (über 1000° C),
- chemisches Recycling von Kunststoffen,
- Niedertemperaturrauchgasentschwefelung,
- Entwicklung lärmarmen, schnell laufender Mühlen.

Weitere Forschungsvorhaben beschäftigen sich mit KI-Systemen und der Konstruktionssystematik an Maschinen der Verfahrenstechnik und der Baureihenentwicklung.

Maschinenakustik

Im Rahmen der Maschinenakustik werden Forschungsarbeiten zur Lärminderung von Bauteilen und Maschinensystemen durchgeführt. Neben experimentellen Untersuchungen und Entwicklungen zu Körperschall, Schallemission und Körperschallimpedanzelementen stehen insbesondere die Entwicklung von Konstruktionssystematiken und von Beratungssystemen zur Konstruktion lärmarmen Maschinen im Vordergrund.

Experimentelle Festigkeitsermittlung

Ziel eines DFG Projektes ist es ein quantitatives spannungsoptisches Verfahren der experimentellen

Festigkeitsermittlung für mechanische Bauteilanisotropien zu entwickeln, mit dem die Richtungsabhängigkeit der Bauteilfestigkeit modelliert werden kann. Weitere Forschungsvorhaben befassen sich mit der Lebensdaueruntersuchung von Zahnwellen.

Veröffentlichungen des Institutes seit dem 1.1.1994

Veröffentlichungen 1994

Holland, M.: Prozeßgerechte Toleranzfestlegung - Bereitstellung von Prozeßgenauigkeitsinformationen für die Konstruktion. Dissertation, TU Clausthal 1994, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 20: Rechnerunterstützte Verfahren Nr. 137, Düsseldorf: VDI Verlag

Wesolowski, K.: Abschlußbericht zum DFG-Vorhaben "Zahnwellenfestigkeit", Di 289 / 9-1; Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, Juli 1994

Schäfer, G.: Das Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen mit Schiebeseitz; Abschlußbericht zum FVA-Vorschungsvorhaben Nr. 99 III & IV Zahn- und Keilwellenverbindungen, Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, Sep. 1994

Dietz, P.; Schäfer, G.; Wesolowski, K.: Involute Spines - Load and wear behavior; Exploitation Problems of Mashines, Polish Akademy of sciences, Mechanical Engineering Committee, Vol. 29, Issue 3-4 (99-100), 1994, page 527 - 541

Dietz, P.; Gieleßen, H.: Texture Development and Anisotropic Photoelastic Effects in Rolled Silver Chloride. Journal of Texture and Microstructures, erscheint Ende '94 / Anfang '95

Pregemann, U.: Fertigungsinformationen im Konstruktionsprozeß - Ein Konzept zur Sammlung, Dokumentation und Nutzung von Fertigungsinformationen. Dissertation, TU Clausthal 1994, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 20: Rechnerunterstützte Verfahren Nr. 143, Düsseldorf: VDI Verlag

Rübelke, L.: Konstruktive Lösungen und Auslegungsmethoden für Hochgeschwindigkeitsabweiseradsichter aus Leichtbauwerkstoffen in der Verfahrenstechnik. Dissertation, TU Clausthal 1994

Rothe, F.: Spielbehaftete Laschenverbindungen bei quasistatischer Belastung unter Berücksichtigung nichtlinearer Randbedingungen. Dissertation, TU Clausthal 1994

Erb, J.; Kruse, P.J.: Die STEP-Lösung für das Zeichnungswesen. Konstruktion, Heft 12, Dezember 1994

Rübelke, L.; Schäfer, H.: Einfluß der Welle-Nabe-Verbindung auf das dynamische Verhalten von Hochgeschwindigkeitsrotoren. Konstruktion, Heft 6, Juni 1994

Dietz, P.; Burgtorf, U.: Das Beanspruchungsverhalten von Zahnwellenverbindungen mit Preßsitz. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 250 der FVA, Bad Soden 1994

Veröffentlichungen 1995

Hsueh, I-Ching: An approach for NC manufacturing information feedback. Dissertation, TU Clausthal 1995

Bugow, R.: Die Bereitstellung von Teilebibliotheken im rechnerunterstützten Konstruktionsprozeß. Dissertation, TU Clausthal 1995, DIN Normungskunde Bd. 35, Berlin: Beuth-Verlag

Kruse, P.: Anforderungen in der interdisziplinären Systementwicklung: Erfassung, Aufbereitung, Bereitstellung. Dissertation, TU Clausthal 1995.

Dietz, P.; Rothe, F.: Rechnerische Ansätze zum Beanspruchungsverhalten von Ketten und symmetrischen Tragmitteln. F+H Fördern und Heben 45 (1995) Nr. 11

Dietz, P.; Rothe, F.: Berechnung und Optimierung von Bolzen-Lasche-Verbindungen. Konstruktion 47 (1995) S. 277-284

Schiedeck, N.; Docquier, H.; Ciesla, M.; Pietschmann, J.: Rückführung von Fertigungsinformationen an die Fertigungsplanung. ZWF CIM 2/1995

Dietz, P.; Kunze, G.; u.a: Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben "Einfluß von Verzahnungsabweichungen auf das Passungs- und Laufverhalten von Zahnwellen-Verbindungen und Zahnkupplungen. Funktionsgerechtes Toleranzsystem und betriebsnahe Meß- und Lehrenverfahren", Volkswagenstiftung, I/66 120, IMW TU Clausthal, IFBL TU Dresden, 6/1995

Barth, H.-J.; Jakel, R.; Kraushaar, H.; Scholz, R.: Vollkeramischer Radialventilator bis 1350 °C für Industrieofenanlagen – Konstruktion, Förderverhalten und Betriebserfahrungen. Chemie Ingenieur Technik 9/1995

Anderl, R.; Kruse, P.; Polly, A.; Sabin, A.; Stephan, M.; Ungerer, M.: Produktmodellierung - Die Basis für integriertes Qualitätsmanagement in der Konstruktion. ZWF 4/1995

Dietz, P.; Schäfer, G.; Wesolowski, K.: Betriebsverhalten und Lebensdauer von Zahnwellen-Verbindungen. DVM-Tagung, Betriebsfestigkeit, 11./12.10.1995 Dresden

Dietz, P.; Burgtorf, U.: Das Beanspruchungsverhalten von Zahnwellenverbindungen mit Preßsitz. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 250 der FVA, Bad Soden 1995

Veröffentlichungen 1996

Hartmann, D.: Modell zur qualitätsgerechten Konstruktion. Dissertation, TU Clausthal 1996, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente Nr. 260, Düsseldorf: VDI Verlag

Kruse, P. J.: Anforderungen in der Systementwicklung - Erfassung, Aufbereitung und Bereitstellung

von Anforderungen in interdisziplinären Entwicklungsprojekten. Dissertation, TU Clausthal 1996, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 20: Rechnerunterstützte Verfahren Nr. 191, Düsseldorf: VDI Verlag

Dietz, P.: Concurrent Engineering - Implications for Training. 4th Symposium DESIGN 96, 16.-17.5.96 Opatija, Volume I, ISBN 953-6326-04-3

Dietz, P.; Tan, L.: Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit geschwächter Welle-Nabe-Preßverbindungen. Antriebstechnik 35 (1996), Heft 4 (Teil I) und 5 (Teil II)

Dietz, P.: Considerations on the Systematic and Fully Stressed Design of Processing Technology Machines. 4th Symposium DESIGN 96, 16.-17.5.96 Opatija, Volume I, ISBN 953-6326-04-3

Dietz, P.; Ort, A.: Verwendung von Wiederholteil- und Normteilkatalogen nach ISO 13584 "Parts Library" unter Berücksichtigung der Anforderungen in der Konstruktion. VDI Berichte 1289, ISBN 3-18-091289-8

Dietz, P.; Schäfer, G.; Wesolowski, K.: Involute Splines - Load and Wear Behaviour. 4th Symposium DESIGN 96, 16.-17.5.96 Opatija, Volume II, ISBN 953-6326-04-3

Dietz, P.; Klomp, E.; Romann, M.: Simultaneous development of chemical process, process engineering machinery and process control systems with special reference to low temperature desulphurisation, SIMDES. European Workshop on Environmental Technologies 1996, 13.- 15. November 1996 Kopenhagen, Beitrag No 19

Prengemann, U.; Schmitt, R.: Fertigungserfahrung zur Entscheidungsunterstützung in der Konstruktion, Industrie Management 1/96, Berlin, 1996 (GI-TO)

Schmitt, R.; Prengemann, U.: Manufacturing Information System for the Designer. 4th Symposium DESIGN 96, 16.-17.5.96 Opatija, Volume I, ISBN 953-6326-04-3

Haje, D.: Knowledge Based Systems for the Development of Low-Noise Products. 4th Symposium DESIGN 96, 16.-17.5.96 Opatija, Volume I, ISBN 953-6326-04-3

Neumann, U.: Konstruktionsmethodische Vorgehensweise zur Entwicklung verfahrenstechnischer Maschinen und Anlagen am Beispiel eines "Reaktionsverdichters" für das Recycling von Kunststoffen durch den Einsatz von überkritischem Wasser. Dissertation, TU Clausthal 1996

Engel, K.: Analyse der Körperschalleitung mit sensorischen, optischen und numerischen Verfahren am Beispiel von Zahnradkörpern. Dissertation, TU Clausthal 1996

Dietz, P.; Burgtorf, U.: Das Beanspruchungsverhalten von Zahnwellenverbindungen mit Preßsitz. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 250 der FVA, Würzburg 1996

Veröffentlichungen 1997

Dietz, P.; Kruse, P.J.; Leschonski, K.: Behandlung von Anforderungen in der Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse, Maschinen und Anlagen. Konstruktion, Heft 1/2, Januar 1997

Dietz, P.; Penschke, St.; Ort, A.: Ansätze zur parallelen Gestaltung von Produkten und Fertigungsprozessen. VDI Berichte 1322, 1997

Dietz, P.; Ort, A.: The Use of ISO 13584 Methodology for Building Part Hierarchies in Practice. European Conference Product Data Technology Days, 15.-16.4.1997, Sophia Antipolis

Dietz, P.; Penschke, St.; Ort, A.: Strategies for Product Knowledge Management and Feedback to Design - Application Examples. Workshop Product Knowledge Sharing and Integration, 17.-18.4.1997, Sophia Antipolis

Dietz, P.; Ort, A.; Penschke, St.: Perspectives on Design Support Strategies. IIM '97 European Conference on Integration in Manufacturing, 24.-26.9.1997, Dresden

Jakel, R.: Ein Beitrag zur Berechnung und konstruktiven Gestaltung keramischer Bauteile, angewendet am Beispiel eines keramischen Heißgasventilatorrades. Dissertation, TU Clausthal 1996, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente Nr. 280, Düsseldorf: VDI Verlag

Haje, D.: Entwicklung eines Informationssystems zur Konstruktion lärmarmen Produkte. Dissertation, TU Clausthal 1996, Lärmarm konstruieren XVII, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Forschung Fb 768 Arbeitsschutz, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW

Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentenbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung. Dissertation, TU Clausthal 1996, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente Nr. 286, Düsseldorf: VDI Verlag

Dietz, P.; Burgtorf, U.: Das Beanspruchungsverhalten von Zahnwellenverbindungen mit Preßsitz. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 250 der FVA, Würzburg 1997

Dietz, P.; Klomp, E.: SIMDES. European Workshop on Environmental Technologies 1997, 10.- 12. Dezember 1997, Cranfield GB

Schiedeck, N.: Simulation und Optimierung kinematisch komplexer Fertigungsverfahren. Dissertation, TU Clausthal 1996, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 2: Fertigungstechnik Nr. 455, Düsseldorf: VDI Verlag

Veröffentlichungen 1998

Bönig, S.; Heimannsfeld, K.: A comparison of hazard analysis methods in plant design. 1st Internet Conference on Process Safety, Januar 1998

- Dietz, P.; Ort, A.: The Concept of View in Parts Library – An Integrative Feature For The Design Process? European Conference Product Data Technology Days, 25./26.3.1998, Garston (Watford).
- Dietz, P.; Ort, A.: Festlegungen für die optimale Merkmalerfassung und -organisation in einem Merkmallexikon. DIN Tagung "Merkmal-Lexikon in der Anwendung", 2.4.1998, Köln.
- Dietz, P.; Wesolowski, K.; Burgtorf, U.; Garzke, M.: Betriebszustände und Tragfähigkeitsnachweis von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen. VDI-Tagung "Welle-Nabe-Verbindungen", 28./29.4.1998 Fulda VDI Berichte 1384
- Dietz, P.; Tan, L.; Garzke, M.: Übertragungsfähigkeit und elastisch-plastische Auslegung geschwächter Welle-Nabe-Preßverbindungen. VDI-Tagung "Welle-Nabe-Verbindungen", 28./29.4. 1998 Fulda, VDI Berichte 1384
- Burgtorf, U.; Dietz, P.; Garzke, M.: Calculation of Involute Splines under Elastic Material Behaviour. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.
- Garzke, M.; Dietz, P.; Tan, L.; Schäfer, G.: Transmission capabilities and elastic design of weakened shaft-hub shrink fits. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.
- Ort, A.; Dietz, P.: Parts Library: An Application of Meta-Modelling in Design. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.
- Dietz, P.; Penschke, S.; Ort, A.: Strategic Reuse of Product Data for Design. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.
- Garzke, M.: Abschlußbericht zum DFG-Vorhaben "Statische und dynamische Beanspruchbarkeit von Zahnwellen-Verbindungen unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten", Di 289 / 9-2; Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, Mai 1998.
- Gieleßen, H.: Optische Anisotropie von texturiertem Silberchlorid. Dissertation, TU Clausthal 1997.
- Dietz, P.; Ort, A.: Knowledge Representation in Design Using Parts Library. ProStep Science Days, 17./18.6.1998, Wuppertal.
- Penschke, S.: Erfahrungswissen in der Produktentwicklung. Dissertation, TU Clausthal 1998, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 16: Technik und Wirtschaft Nr. 98, Düsseldorf: VDI Verlag
- Schmidt, A.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur konstruktiven Einflußnahme auf die Körperschalleitung in ebenen Strukturen. Dissertation, TU Clausthal 1998.
- Burgtorf, U.: Montage- und Betriebseigenschaften von Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz. Dissertation, TU Clausthal 1998.
- Heinen, F.: Entwicklung einer Methodik zur Rückfederungsvorhersage an Tiefziehteilen. Dissertation, TU Clausthal 1998.
- Dietz, P.; Schäfer, G.; Garzke, M.: Elastisch-plastische Auslegung von Maschinenelementen. 2. Workshop Konstruktionstechnik, 24./25.9.98 Kühlungsborn, Institut für Konstruktionstechnik der Universität Rostock.
- Dietz, P.; Schmidt, A.; Jeschke, D.: Berechnung von Terzspektren aus der FFT-Analyse. Zeitschrift für Wärme-, Klima-, Schall- und Brandschutz. 43. Jg., Heft 41
- Pawar, K.S.; Ratchev, S.; Heimannsfeld, K.: Knowledge Acquisition and sharing for Requirement Engineering (KARE) in one-of-a-kind production environment: Initial Concepts, current and future development. Conference PROLAMAT, September 1998, Trento/Italien.

Autoren

Betaneli, Archil: Jahrgang 1925, Professor für Flugzeugbau an der Georgischen Technischen Universität Tbilissi (Georgien), im Rahmen der Kooperation mehrfacher Gast am IMW.

Birkholz, Hagen: Jahrgang 1967, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.9.1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. birkholz@imw.tu-clausthal.de

Bönig, Sabine: Jahrgang 1969, studierte Maschinenbau an der TU Braunschweig und Verfahrenstechnik an der TU Clausthal, seit 1.5.1997 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW.

Brandt, Anja: Jahrgang 1965, studierte Geologie/Paläontologie an der TU Clausthal, Promotion 1994, seit 21.4.1997 Koordinator für studentische Auslandskontakte (zentrale Universitätseinrichtung). brandt@imw.tu-clausthal.de

Dietz, Peter: Jahrgang 1939, studierte Maschinenbau an der TH Darmstadt, wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebe der TH Darmstadt, Promotion 1971 über die Berechnung von Seiltrommeln, seit 1974 Leiter der Stabstelle Konstruktionssysteme der Pittler Maschinenfabrik AG, Langen, seit 1977 dort Leiter der Entwicklungsabteilung, seit 1.10.1980 Universitätsprofessor und Institutsdirektor des IMW. dietz@imw.tu-clausthal.de

Garzke, Martin: Jahrgang 1969, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.1.1996 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. garzke@imw.tu-clausthal.de

Goltz, Michael: Jahrgang 1973, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.4.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. goltz@imw.tu-clausthal.de

Grethe, Vinca: Jahrgang 1959, studierte Gießereikunde an der TU Clausthal, Promotion 1994 über das Fügen metall-keramischer Werkstoffverbunde, seit April 1996 Koordinator der COPES Großforschungseinrichtung. grethe@imw.tu-clausthal.de

Große, Andreas: Jahrgang 1969, studierte Maschinenbau, Fachrichtung Produktionstechnik an der TU Clausthal, seit 1.5.1995 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. grosse@imw.tu-clausthal.de

Grünendick, Torsten: Jahrgang 1967, studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität der Bun-

deswehr München, von 1993 bis 1996 Fachgruppenleiter bei einem Luftfahrzeugtriebwerks - Instandsetzer in Erding, ab 1996 dort Leiter Qualitätssicherung, seit 1.8.1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

gruenen@imw.tu-clausthal.de

Gummersbach, Frank: Jahrgang 1965, studierte Maschinenbau mit den Schwerpunkten Betriebsfestigkeit, Betriebs- und Systemverhalten an der TU Clausthal, seit 1.6.1993 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. gummer@imw.tu-clausthal.de

Haje, Detlef: Jahrgang 1965, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW in der Zeit 11/91-10/96, Promotion im Oktober 1996 über die Entwicklung eines Informationssystems zur Konstruktion lärmärmer Produkte, seit 1.11.1996 bei der Siemens AG (KWU).

Heider, Gunther: Jahrgang 1968, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.4.1994 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. heider@imw.tu-clausthal.de

Heimannsfeld, Klaus: Jahrgang 1968, studierte Informatik an Universität Fridericiana (TH) in Karlsruhe (Schwerpunkte Netzwerke, Transaktionssysteme und Computergrafik, Nebenfach Maschinenbau, Fertigungstechnik), seit 1.5.1995 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. heimann@imw.tu-clausthal.de

Heinen, Frank: Jahrgang 1969, studierte Produktionstechnik an der TU Clausthal, wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW in der Zeit 8/93-9/98, Promotion im Juli 1998 über die Rückfederungsvorhersage an Tiefziehteilen, seit 1.10.1998 bei der Robert Bosch GmbH.

Henschel, Jürgen: Jahrgang 1968, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Braunschweig und der TH Darmstadt, seit 1.3.1994 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. henschel@imw.tu-clausthal.de

Judith, Martin: Jahrgang 1972, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Darmstadt, seit 1.5.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. judith@imw.tu-clausthal.de

Käferstein, Berthold: Jahrgang 1973, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit

1.5.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
kaefer@imw.tu-clausthal.de

Kalwa, Ralf: Jahrgang 1962, studierte Physik an der TU Clausthal, wissenschaftlicher Angestellter am IMW in der Zeit 5/91-4/96, seit 1.4.1996 wissenschaftlicher Angestellter am Rechenzentrum der TU Clausthal. kalwa@rz.tu-clausthal.de

Klomp, Eric: Jahrgang 1966, studierte Maschinenbau, Fachrichtung Produktionstechnik an der TU Clausthal, seit 1.7.1995 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. klomp@imw.tu-clausthal.de

Müller, Norbert: Jahrgang 1949, studierte allgemeinen Maschinenbau an der FH Frankfurt und TH Darmstadt, Leiter Zentralaufgaben Konstruktion der Pittler AG, wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, Promotion 1990 über rechnergestützte Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen am Beispiel von Zentrifugentrommeln, Bereichsleiter Informationstechnik der Pittler GmbH, seit 1.11.1997 Professor für Rechnerintegrierte Produktentwicklung am IMW. mueller@imw.tu-clausthal.de

Mupende, Ilaka, Ivon: Jahrgang 1964, studierte allgemeinen Maschinenbau an der Universität von Kinshasa, Demokratische Republik Kongo, seit 1.10.1996 Gastwissenschaftler am IMW.
mupende@imw.tu-clausthal.de

Otto, Steffen: Jahrgang 1971, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.8.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
otto@imw.tu-clausthal.de

Schäfer, Günter: Jahrgang 1963, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.11.89 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, seit 1991 akademischer Rat, Promotion im November 1995 über Verschleiß und Berechnung von Zahnwellen-Verbindungen.
schaefer@imw.tu-clausthal.de

Schmitt, Reinhard: Jahrgang 1967, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW in der Zeit 9/93-8/98, seit 1.9.1998 Geschäftsführer der IPS Ingenieurgesellschaft Valencia/Spanien.

Siemieniec, Adam: Jahrgang 1930, Professor für Mechanik und Direktor des Institutes für Grundlagen des Maschinenbaus an der Bergakademie AGH Kraków (Polen), im Rahmen der Kooperation mehrfacher Gast am IMW.

Tawil, Mohamed: Jahrgang 1969 (Palästinenser), seit Oktober 1987 in Deutschland, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.11.1997

wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
tawil@imw.tu-clausthal.de

Wächter, Martina: Jahrgang 1959, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.4.1985 wissenschaftlicher Mitarbeiterin am IMW, seit 1.9.1996 Frauenbeauftragte der TU Clausthal.
waechter@imw.tu-clausthal.de

Wuttke, Sabine: Jahrgang 1969, studierte Energie- und Verfahrenstechnik an der TU Berlin, seit 1.6.1997 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW.
wuttke@imw.tu-clausthal.de

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. 100 m rechts in *Robert-Koch-Straße* einbiegen. Das IMW befindet sich nach ca. 400 m (zwei Querstraßen) 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** der Hauptstraße folgend rechts abbiegen → An T-Einmündung (rechterhand eine Tankstelle) rechts abbiegen; Clausthal verlassen.

Nach 1,5 km links abbiegen Richtung Goslar/Clausthal → Ortsschild Clausthal → In die dritte Straße (*Robert-Koch-Straße*) einbiegen → Das IMW befindet sich nach ca. 250 m auf der linken Seite.

