

Mitteilungen aus dem
Institut für Maschinenwesen
der
Technischen Universität Clausthal
Nr. 24

(November 1999)

Herausgeber:

Prof. Dr.h.c. 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

E-Mail: info@imw.tu-clausthal.de

ISSN 0947-2274

Titelbild:

Ein Arbeitsschwerpunkt des Institutes für Maschinenwesen ist die Forschung auf dem Gebiet der Seile und Seiltrommeln. Ein in diesem Jahr beendetes Vorhaben befaßte sich mit dem Teilgebiet des Einflusses von Seileigenschaften auf die Trommelkörperbeanspruchung.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
Dietz, P.: Verfahrenstechnische Maschinen – Chancen der gleichzeitigen Prozeß- und Maschinenentwicklung.....	3
Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen	
Dietz, P.; Garzke, M.; Grünendick, T.: Innenhochdruck sorgt für festen Fügeseit – Leichtbau-Maschinenelemente durch plastische Verformung herstellen	17
Schäfer, G.: Gedanken zur Toleranzfestlegung für Zahnwellen-Verbindungen	25
Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln.....	29
Birkholz, H.; Garzke, M.; Otto, St.: Erarbeitung von Dimensionierungsgrundlagen für spielbehaftete Längsstift-Verbindungen	37
Klemp, E.; Mupende, I.; Schäfer, G.: Bauteiloptimierung durch DMS-Technik und FEM-Untersuchungen	43
Rubio Eire, M. D.: Probability for Probabilistic criteria – Design with brittle materials	47
Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung	
Beisheim, N.; Müller, N.: Die Anwendung der Feature-Technologie im Konstruktions-Informationssystem.....	53
Große, A.: Stahlinformation und -auswahl mit den internetbasierten Systemen <i>Stahlikon</i> und <i>Starkit</i>	59
Birkholz, H.; Garzke, M.: Baureihenentwicklung von Drehmomentaufnehmern	63
Tawil, M.: Künstliche Neuronale Netze – Methode und Anwendung	69
Gummersbach, F.; Heimannsfeld, K.: Produktanforderungen systematisch finden.....	73
Käferstein, B.; Klemp, E.: Von der Idee zum greifbaren Bauteil in einigen Stunden - Zusammenspiel zeitgemäßer Konstruktions- und Fertigungstechniken.....	79
Düsing, C.; Goltz, M.; Heimannsfeld, K.: SEDRES-2 – Systems Engineering Data Representation and Exchange Standardisation - 2	85
Judith, M.: ProManual - Einsatz von Multimedia in der Produktdokumentation	89
Beisheim, N.: Einsatz von neuronalen Netzen und Fuzzy-Technologie in der vorbeugenden Störfallsimulation	93

Experimentelle Methoden und meßtechnische Untersuchungen

Grünendick, T.; Käferstein, B.: Umweltprüfungen an Komponenten mit Hilfe von Breitbandrauschen.....	99
Birkholz, H.; Judith, M.; Tawil, M.: Prüfstand zur Lebensdauerprüfung von Gelenkwellen	103

Maschinenakustik

Beisheim, N.; Gummersbach, F.; Käferstein, B.: Schallflußmodellierung - ein Konzept zur Unterstützung des Konstruktors bei der Entwicklung lärmarmen Maschinen.....	107
Gummersbach, F.: Wirtschaftliche Bewertung von Lärminderungsmaßnahmen.....	115

Verfahrenstechnische Maschinen und Anlagen

Bönig, S.: Erarbeitung sicherheitstechnischer Maßnahmenkataloge zur Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse, Maschinen und Anlagen.....	119
Wilke, K.: Untersuchungen zur Optimierung der Kläranlage Halle-Bruckdorf.....	129

Institutsbetrieb

Große, A.; Grünendick, T.: Jugend forscht am Institut für Maschinenwesen.....	135
Düsing, C.; Jach-Reinke, H.-J.: Entwicklung einer Backup und Recovery Strategie für die Oracle8-Infrastruktur des IMW.....	139
Judith, M.; Klemp, E.: Exkursionen des IMW nach Hamburg und München	145

Hochschulkontakte

Wächter, M.: Innovative Ingenieurausbildung.....	149
Grethe, V.: COPES – Ein weiterer Schritt zur Internationalisierung der TU Clausthal	153
Otto, St.; Schäfer, G.: Über eine Dienstreise in das Land der zwei Kulturen.....	155
Siemieniec, A.; Wolny, S.: Analyse der Arbeitsverhältnisse einer Förderanlage während einer Notbremsung	159
Khurodze, R.: Auswertungsmethoden und Analyse der Zuverlässigkeit von Mess- und Informationsanlagen	163

Ausstattung etc.

Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes.....	177
Veröffentlichungen des Institutes seit dem 1.1.1995.....	180
Autoren	183

Vorwort

Wer jetzt unser Foyer betritt, wird unweigerlich auf unsere Internationalität hingewiesen: Günter Schäfer hat eine Fehl- und daher auch kostenneutrale Lieferung von Uhren verwendet, um über dem Halleneingang die Zeitzonen unserer befreundeten Hochschulen zu markieren. Daran läßt sich auch mühelos ablesen, unter welchem Jetlag ich gerade leide.

Das vergangene Jahr war ereignisreich – persönlich, für die TU Clausthal und für das Institut. Zum Glück ziehen die Studentenzahlen wieder etwas an, wir haben wieder gut 20% Zuwachs an „normalen“ Studenten, die SOCRATES- und andere Auslandsstipendiaten nicht mitgezählt. Leider nicht in den klassischen Fächern Maschinenbau oder Verfahrenstechnik!!! Den Renner bilden in diesem Jahr die ökonomischen Ableger – Wirtschaftsingenieure, Wirtschaftsmathematiker und Wirtschaftsinformatiker. Auch der neu eingerichtete Studiengang Energiesystemtechnik hat gute Zahlen. Die schlechten Noten für die Anfängerzahlen im Maschinenbau gelten aber deutschlandweit, während das „Ingenieurloch“ immer größer wird und uns die Firmen mit Exkursionen, Studienpreise, Vortragsveranstaltungen oder „Angeboten“ zur Betreuung von Diplomarbeiten die Bude einrennen.

Wir versuchen das natürlich zu nutzen und veranstalteten in diesem Jahr drei Exkursionen: Eine ging nach Hamburg im März (DASA, Still, Axel Springer Verlag, Seca, Musicalbesuch). Ich durfte garnicht mit und habe nur an den leicht verquollenen Augen der Mitarbeiter gesehen, daß da wohl noch einige Höhepunkte waren, die man nicht in den Prüfungsplan schreiben kann. Die „Exkursion vom Dienst“ ging dieses Jahr nach München (IABG, Knorr Bremse, MTU, Luftwaffenwerft, Eurocopter, Brauerei Erding) – haarscharf am Oktoberfest vorbei, so daß wir nur noch den Nachdurst mitbekamen. Und die dritte ins Ruhrgebiet wird in diesen Tagen durchgeführt – alles vom Feinsten mit Exkursionsrollgriff in die Zigarrenkisten, weil offenbar die Stahlindustrie (und die mit ihr verbundenen Studentenverbindungen in Clausthal) besonders unter Nachwuchssorgen leiden.

Um diesen Mißständen abzuhelpfen, wollen wir uns nach Rücksprache mit der Industrie und dem Minister um ein besonderes Angebot für Studierende bemühen: Durch ein geschickt angeordnetes Zusatzangebot an Lehre auch während der Vorlesungsfreien Zeit, durch ein von der Universität unterstütztes und organisiertes Angebot an Industriepraktika und durch eine stramme Führung beim Prüfungsablauf in einem „Intensivstudiengang Ma-

schinenbau“ wollen wir für willige Studierende die Studienzeit auf maximal vier Jahre runterbringen – einschließlich Auslandsaufenthalt von mindestens sechs Monaten. Neben dem erforderlichen Lehr-, Prüf- und Organisationsaufwand (zum Glück haben wir ja Martina Wächter) haben wir damit aber eine besondere Aufgabe, nämlich die Studierenden zu einer zügigen Prüfungspraxis zu „motivieren“. Das geht nur durch Sponsoring – weil es nämlich durch die in demokratischen Gremien erarbeiteten Diplomprüfungsordnungen nicht geht! Ich darf also an dieser Stelle alle Freunde der Universität und des Instituts bzw. deren Firmen bitten die Patenschaft für einen oder mehrere „Intensivstudiengänger“ zu übernehmen: Für 5000 DM im Jahr kann ein Student warm, trocken und satt leben und wir können jedes halbe Jahr prüfen, ob er das Sponsoring noch weiter bekommt oder in den normalen Studienablauf – den es natürlich weiter gibt – zurückfällt. Im Wintersemester 2000/01 geht's los.

Einen weiteren Erfolg unserer Lehrbemühungen gibt's zu vermelden: Unsere beiden Zeichenmäuse Anke Guthmann und Annika Baumgarten hatten einen erfolgreichen Lehrabschluß, beide sind Jahrgangsbeste im Lehrberuf TZ der IHK Braunschweig 1999!!! Herzlichen Glückwunsch den beiden und natürlich herzlichen Dank an Martin Garzke, der sich rührend um ihre Ausbildung bemühte. Anke kann sich vom IMW nicht trennen, sie ist seit 1.10.99 Maschinenbaustudentin an der Technischen Universität Clausthal.

Die Anstrengungen zur Einwerbung von Studierenden lassen uns keine Ruhe und ergreifen außer mich selbst auch weitere Institutsmitglieder. Während ich mir in diesem Jahr beim Abschluß neuer Verträge in Brasilien (Cajassa), Argentinien (Mendocino), Chile (Pisco) und Kuba (Rum) die Leber ruinierte, warben Günter Schäfer und Steffen Otto Mexikaner (Tequila) ein, Jürgen Henschel rieb sich in Genua (Grappa) auf, Vinca Grethe „copenste“ in Cardiff (Whisky) und Franziska Knochen (Gastdozentin Spanisch) entlastete mich in Spanien (Cazalla). Zusammen mit den Unmengen von Tschatscha, die die Georgier immer mitbringen, sehe ich da einer interessanten Entwicklung der Instituts ins Auge. Ein Reisebüro hatte jedenfalls das Bedürfnis, uns für treue Kundschaft einen Riesenkuchen zu spendieren. Und der andere Effekt ist, daß am Institut zur Zeit ständig in mindestens drei Sprachen gesprochen, geschrieben und gesungen wird – eine hervorragende Zusammenarbeit mit hervorragenden Studenten!

Mein vorjähriges Versprechen zur verstärkten Einwerbung von Forschungsvorhaben konnte ich einhalten – jetzt liegt das Problem eher bei der Einwerbung qualifizierter Mitarbeiter! Beim SFB Blech sind wir dank der überzeugenden Vorstellung von Mohammed Tawil wieder mit einem Projekt beteiligt, sowohl im Bereich der Welle-Nabe-Verbindungen (Längsstiftverbindungen, gestörte Preßverbindungen, innenhochdruckumgeformte Verbindungen) als auch auf dem Gebiet Seiltrommel/Seile warten interessante Aufgaben auf unseren Forschungsdrang. Durch eine wirklich großzügige Aktion der Deutschen Forschungsgemeinschaft werden wir Ende des Jahres einen Seiltrommelprüfstand einfahren, der sein eigenes Stromaggregat braucht (250 kVA), weil sonst beim Prüfbetrieb im Oberharz die Lichter ausgehen. Auch unsere neue Rapid Prototyping Maschine steht mittlerweile funktionierend in der Halle und stöhnt unter dem Ehrgeiz von Eric Klemp, möglichst komplizierte Geschenke für Besucher des IMW zu fabrizieren. In diesem Gebiet gibt es aber auch wieder neue Vorhaben der EU, wie überhaupt die internationale Schiene der Forschung erstaunlichen Zuwachs hat. Nicht nur, daß der Dino neue Sprünge macht, das rechnergestützte, weltweit verteilte, systematische Produktentwickeln läßt mich schon manchmal wehmütig an die Zeit erinnern, als ich noch am Zeichenbrett ruhig vor mich hinkonstruieren durfte.

Als besonderes Highlight entwickelt sich die Maschinenakustik. Für die BAU hat Frank Gummersbach ein Buch zur Erläuterung der ISO 11 688 mit über 500 Beispielen geschrieben, unser rechnergestütztes Beratungssystem wird langsam anwendbar und Berthold Käferstein hat einen vielbeachteten Vortrag zur Körperschallproblematik und ihre Analogie mit der Spannungsoptik gehalten. Zur Zeit steht – neben viel Zusammenarbeit mit der Industrie – ein Projekt zum Körperschalldurchgang durch Lager und durch Blechverbindungen an und in einem gerade anlaufenden Projekt bemühen wir uns um die Schallentstehungskette in Fahrzeugen – Zusammenarbeit mit VW, Conti, Sennheiser, Karmann und drei anderen Hochschulen. Hier sind auch Investitionen im nächsten Jahr zu erwarten, die unsere Kapazität auf dem maschinenakustischen Gebiet erheblich steigern werden.

Ein kleiner Wermutstropfen mischt sich in diesen Bericht. Mit diesem Jahr läuft der Sonderforschungsbereich 180 „Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen“ aus, der das Institutsleben 14 Jahre lang geprägt hat. Wir werden diesen Abschluß mit einem Buch und einer internationalen Konferenz feiern, die im Juli 2000 stattfinden wird. Und natürlich arbeiten wir mit Volldampf auf diesem

Gebiet weiter – es gibt eine ganze Reihe von Forschungskontakten mit der Industrie zu den Themen Reaktionsmühle, Hochgeschwindigkeitswindsichter, Heißgasventilator usw.

Zwei herausragende Ereignisse erschütterten in diesem Jahr den Oberharz: Das IMW wurde Sieger im Bierstaffelwettbewerb der TU Clausthal. Diese mittlerweile über Internet weltweit gefeierte Großtat kann gar nicht hoch genug bewertet werden, zumal man bedenken muß, daß die Stärke der Institutsmitglieder im allgemeinen nicht darin liegt besonders schnell zu rennen! Wir bleiben aber im Training, wobei das Trainingsgelände durch zahlreiche, bereits in Vorbereitung befindliche Doktorfeiern schon aufbereitet ist.

Aber da war ja noch ein Geburtstag! Dank aller Mitarbeiter (das meine ich wörtlich!) unter der strengen Regie von Frau Kurz (das meine ich auch wörtlich!) wurde es zum Ereignis des Jahres. Dicke Festschrift, Neuauflage der „Weißen Bibel“, Wissenschaftliches Kolloquium – alles vom Feinsten. Und dann die eigentliche Feierei am Abend mit illustren Gästen aus aller Welt (auch mein verehrter Lehrer Prof. Pahl hat es sich nicht nehmen lassen) und besonders dem Oberharz, mit Musik zum Abwinken und mit kulturellen Höhepunkten wie einem Video über den Institutsalltag oder die feierliche Enthüllung eines Großgemäldes ... ich kann das alles gar nicht mehr beschreiben (ich habe so gegen vier Uhr morgens auch nicht mehr alles mitgekriegt). Statistische Aussagen über den Verbrauch von etwa 600 l Bier, 150 l Wein und entsprechende weitere Genüsse sprechen ein Zeugnis, wie man an diesem Institut feiern kann. Nochmals Dank an die ganze Mannschaft!

Darf ich bei dieser Gelegenheit gleich an die nächste Feier erinnern? Am 16. Juni 2000 feiert die Technische Universität Clausthal ihr 225jähriges Bestehen. Bitte schon mal vormerken, wir lassen uns zu diesem Termin noch besonders interessante wissenschaftliche Themenstellungen (wegen der Dienstreisegenehmigung) einfallen.

Vieles gäbe es noch zu berichten, was aber zum Teil in den Beiträgen der Mitteilung getan wird. Viel Spaß beim Lesen, bleiben Sie uns weiterhin freundlich gewogen und besuchen Sie uns mal wieder!

Clausthal, im November 1999

Verfahrenstechnische Maschinen - Chancen der gleichzeitigen Prozeß- und Maschinenentwicklung

Dietz, P.

Gekürzte Fassung eines Vortrages im Konstruktions-symposium der DECHEMA am 4. und 5. Februar 1999. Es werden einige konstruktionsmethodische Überlegungen anhand von Beispielen erläutert, die sich im Laufe des Sonderforschungsbereiches 180 ergeben haben und beinhalten im systematischen Teil die promotionsreifen Gedanken von Herrn Neumann, aber auch die Arbeiten der ehemaligen IMW-Mitarbeiter Ebert, Kruse, Bock und Rübhelke.

Cutted Version of a proceeding hold at the DECHEMA conference 4th and 5th february 1999. Based on papers of former IMW research stuff Neumann, Ebert, Kruse, Bock and Rübhelke, the use of modern design methods are shown at examples of precess engineering machines.

1 Entwicklungsprozesse in Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Alle verfahrenstechnischen Prozesse sind an die Nutzung von Maschinen, Geräten und Apparate gebunden, die aus Bereichen des Maschinenbaus bezogen oder speziell für das jeweilige Verfahren entwickelt werden. Hierauf beruht der Grundgedanke eines Sonderforschungsbereichs, an dem sich das IMW seit mehr als 12 Jahren beteiligt und der neben einer objektorientierten Entwicklung von Prozessen und Maschinen auch der Frage nachgeht, ob und wie neue, fachübergreifende Methoden zu einer gezielteren und gleichzeitigen Entwicklung von Prozeß und Anlage führen /1, 2/.

Das Ziel ist klar: Das in einigen Disziplinen bereits durchgeführte Prinzip einer parallelen Entwicklung von Produkten und Prozessen, das auch unter dem Stichwort "Concurrent Engineering" gehandelt wird, soll auf die Verfahrenstechnik übertragen werden /2/.

Bild 1 zeigt am traditionellen Ablauf einer verfahrenstechnischen Entwicklung, wie aus dem verfahrenstechnischen Grundfließbild ein detailliertes Fließbild und dann ein Installationsfließbild entsteht, aus dem die Konstruktionselemente der Anlage ausgesucht werden - der Entwickler oder Lieferant der Elemente weiß bis zur Veröffentlichung des Installationssche-

mas von dem Prozeß überhaupt nichts. Eine maschinenbaulich wie verfahrenstechnisch Weiterentwicklung im Wechselspiel von Prozeß und Verfahrenselementen ist so nicht möglich, da nur bekannte Standardelemente in die Überlegungen einbezogen werden können. Dabei läßt sich gerade an der verfahrenstechnischen Entwicklung sehr deutlich zeigen, daß ein Concurrent Engineering erhebliche Entwicklungspotentiale enthält (**Bild 2**), zumal Neuerungen bekanntlich in hohem Maße gekennzeichnet sind durch Entwicklungen aus anderen Fachgebieten.

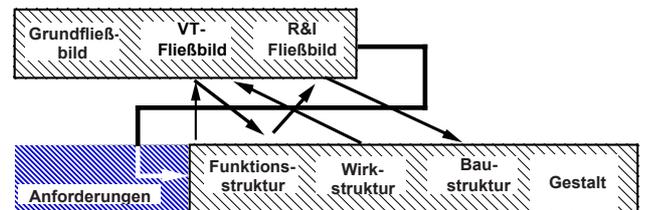


Bild 1: Traditionelle Entwicklung eines verfahrenstechnischen Prozesses und seiner Anlagen /2/

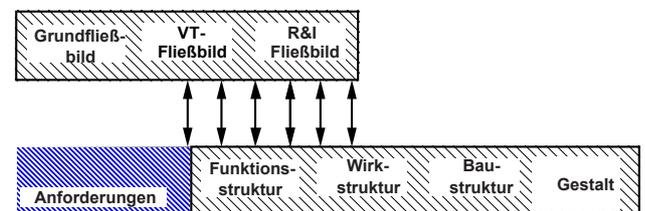


Bild 2: Integrierte Entwicklung von Prozeß und Anlage /2/

Es gibt sogar Methoden der Verfahrenstechnik, die eine solche fachbereichsübergreifende Neuerung verhindern, beispielsweise DIN 30600 (siehe /3/) zur Bildung von Baukastenstrukturen in verfahrenstechnischen Anlagen. In DIN 30600 ist die apparative Umsetzung einer Vielzahl existierender Unit Operations in Form schematisierter Bildzeichen zusammengefaßt, dadurch wird die Umsetzung abstrakter Prozeßschritte in Apparate- und Maschinenkonzepte durch das Angebot vorkonfektionierter Lösungselemente (z.B. Pumpen, Rührkessel, Brecher, etc.) vereinfacht. Im Zuge der Entwicklung einer verfahrenstechnischen Anlage oder Maschine ausgehend vom Grundfließbild bis hin zum R&I-Fließbild werden die Unit

Operations durch die ihnen entsprechenden Bildzeichen ersetzt, so daß die anlagentechnische Realisierung eines neuen Prozesses nur zu einer Kombination bekannter und verfügbarer Apparate und Maschinen führt.

2 Vorgehensweise zum Entwickeln verfahrenstechnischer Maschinen

Das Bestreben, den Entwicklungsprozeß als allgemeines Vorgehensmodell zu behandeln und ihn mit Hilfe systemtheoretischer Betrachtungen zu optimieren, ist nicht neu. In den bekannten konstruktionssystematischen Vorgehensweisen wie z.B. der Richtlinie VDI 2221 /4/, der Richtlinie VDI 2222 /5/, aber auch in der von Blaß in /3/ beschriebenen Vorgehensweise zur Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse wiederholt sich der Arbeitsschritt des Umsetzens von abstrakten Modulen der Aufgabenstellung hin zu Apparate- und Maschinenkonzepten, die, bezogen auf die Verfahrenstechnik, zu einer kompletten verfahrenstechnischen Anlage oder Maschine kombiniert werden. Trotz der Darstellung in einer Richtlinie, die den Eindruck eines gemeinsamen systematischen Vorgehens vermittelt, werden die Unterschiede aber bei genauer Betrachtung der einzelnen Entwicklungsschritte und ihrer Ergebnisse deutlich (**Bild 3**):

Während der erste Schritt, die Formulierung der Anforderungsliste, Grundlage jeder Entwicklungsarbeit ist und von für die Entwicklung von Produkten wie von Prozessen gleichartigen Methoden unterstützt wird /6/, wird im nächsten Schritt der maschinenbaulichen Entwicklung gemäß /4/ nach Funktionen und ihrer Realisierung mit Hilfe naturwissenschaftlicher Erkenntnisse gesucht, während nach /3/ in der verfahrenstechnischen Entwicklung ein erstes Grundfließbild erarbeitet wird, welches eine abstrakte Lösung zu der gestellten Aufgabe in Form einer Kombination unterschiedlicher, aber bereits festliegender Unit Operations ergibt, die nach vorgegebenen Regeln dargestellt werden /7/. Als Grundlage hierzu dient die Vorstellung, daß der verfahrenstechnische Prozeß (Prozeß der Stoffumwandlung) immer in die drei Hauptabschnitte nach **Bild 4** zerlegt werden kann. Damit kann die in den Sequenzen "Funktionsanalyse" und "Suche nach Lösungsprinzipien" der maschinenbaulichen Entwicklung beschriebene Suche nach neuen Lösungen nicht mit der Erstellung der Fließbilder aus einem Katalog "aller für das Verfahren erforderlicher Apparate und Maschinen und die Hauptfließlinien" /7/ verglichen werden. Auch bei einem weiteren Ver-

gleich der beiden Vorgehensweisen lassen sich formale und konzeptionelle Brüche nachweisen, die uns über neue Vorgehensweisen nachdenken lassen sollten, mit denen in einer integrierten Entwicklung von Anlage und Prozeß die "offene" und auf die Schaffung neuer Lösungen abgestimmte Methodik der Produktentwicklung für die Gestaltung und Optimierung des Prozesses ebenfalls genutzt werden.

Als Unterstützung zur Konkretisierung dieser Vorgehensweise bietet sich die VDI Richtlinie 2222 /5/ an, die im folgenden um Elemente der verfahrenstechnischen Vorgehensweisen angereichert wird. Der in **Bild 5** dargestellte Vorgehensplan ist in drei Spalten unterteilt. Die linke Spalte beinhaltet die einbezogenen Hilfsmittel wie z.B. DIN 28004 oder Kreativitätstechniken, in der rechten Spalte sind die zu erreichenden Arbeitsergebnisse zusammengefaßt. Die mittlere Spalte basiert entsprechend der Richtlinie VDI 2222 auf einer Unterteilung in vier Phasen: der Planungsphase, der Konzeptionsphase, der Entwurfsphase und der Ausarbeitungsphase. Die am Rand gezeichneten Vorgehensweisen deuten darauf hin, daß entsprechend /6/ ein ständiger Abgleich mit der Anforderungsliste erfolgen muß und daß die interaktive Optimierung von Prozeß und Maschine eine "Schleifenbildung" nach VDI 2221 erfordert.

Wesentlich an diesem Vorgehensmodell ist, daß zur Erreichung der verfahrenstechnischen Ergebnisse in jeder Phase die Chance einer methodische Lösungssuche nach dem sogenannten TOTE-Schema /9/ gegeben wird, in dem aufgrund von Analyse, Synthese und Bewertung nach neuen Lösungen gesucht wird, die dann in den Ablauf der verfahrenstechnischen Entwicklung eingestellt werden und so das Lösungsfeld wesentlich erweitern (**Bild 6**).

Planungsphase

Die Forderung, die zur Problemstellung/Aufgabenstellung geführt hat, kann nach /6/ in ihrer Herkunft auf zwei unterschiedliche Quellen zurückgeführt werden:

- Realer Kunde: Eine Person oder eine Organisation als Fordernde(r).
- Imaginärer Kunde: Ein durch Marktanalysen, Umfragen, Wartungsberichte oder andere Quellen erzeugter Forderungssatz für ein neues System oder eine Änderung an einem bestehenden System eigener Herstellung.

In beiden Fällen ist nach der Festlegung der Aufgabenstellung ihre Klärung und Präzisierung erforder-

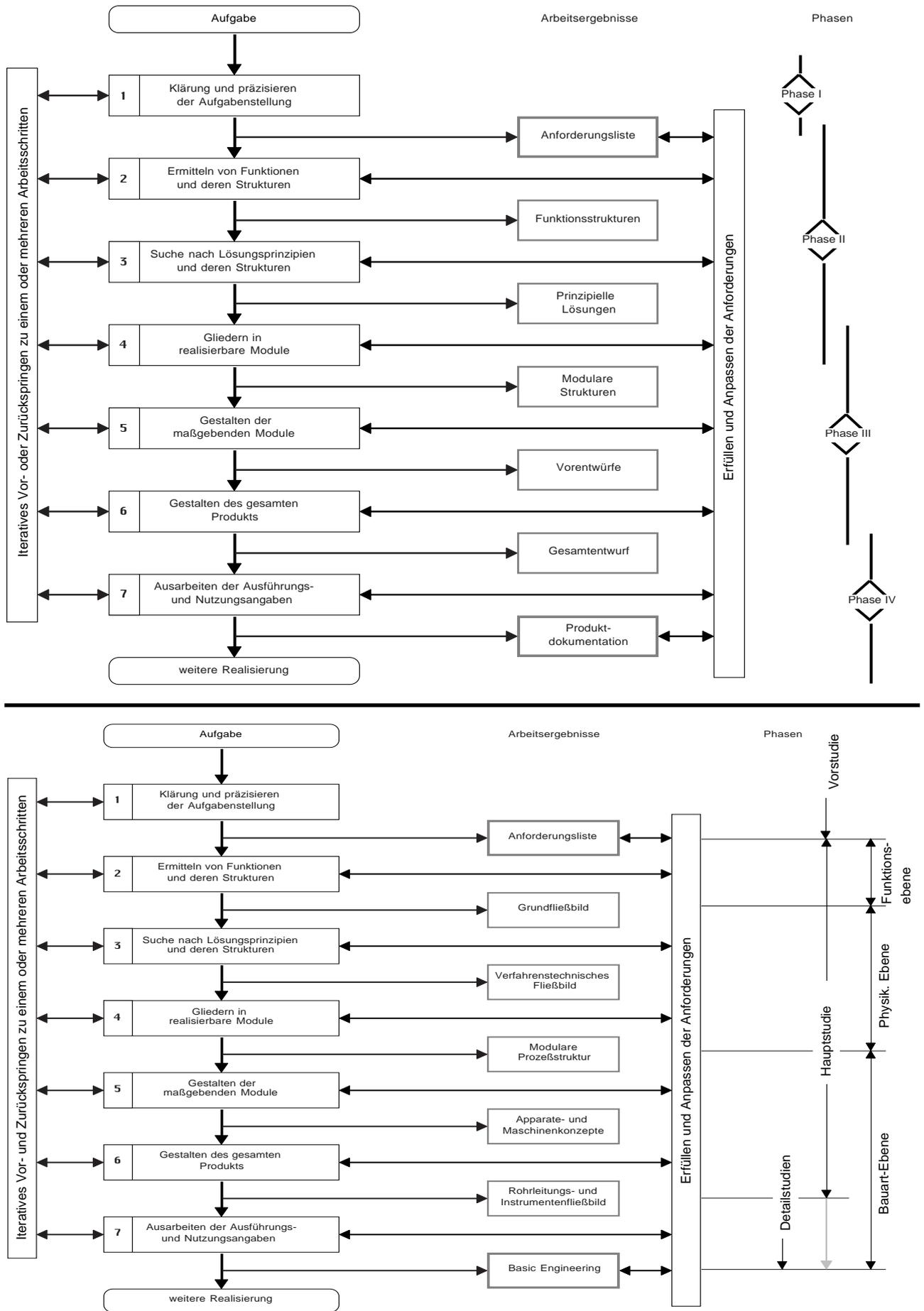


Bild 3: Vorgehensmodelle bei der Entwicklung nach VDI 2221 /4/. Oben: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren im Maschinenbau. Unten: Vorgehen bei der Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse und Anlagen.

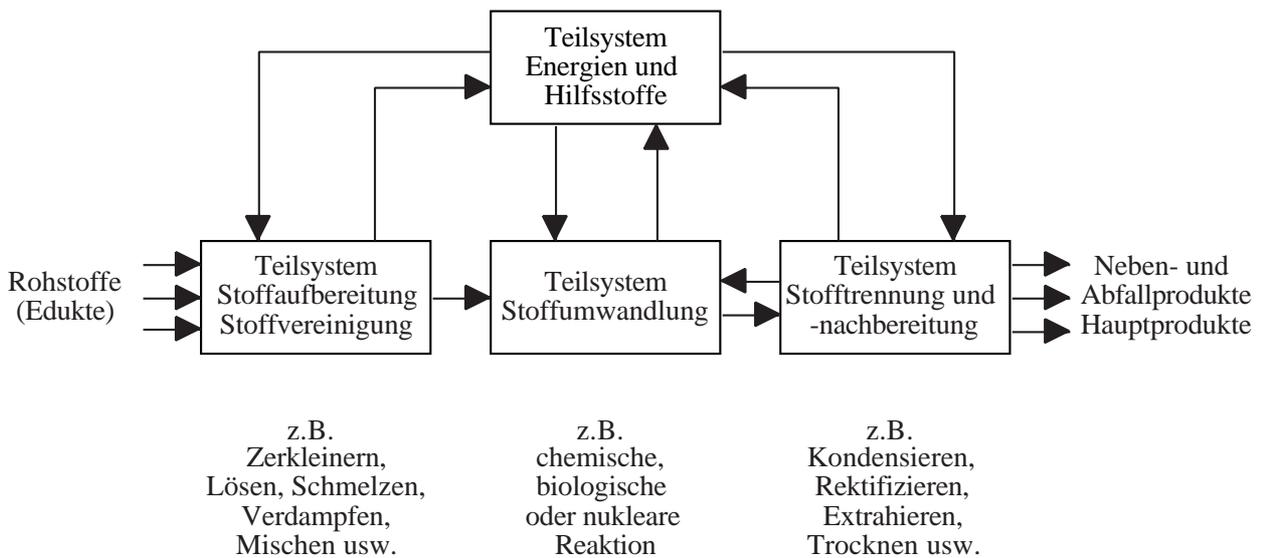


Bild 4: Die drei Hauptschritte eines verfahrenstechnischen Prozesses /3/

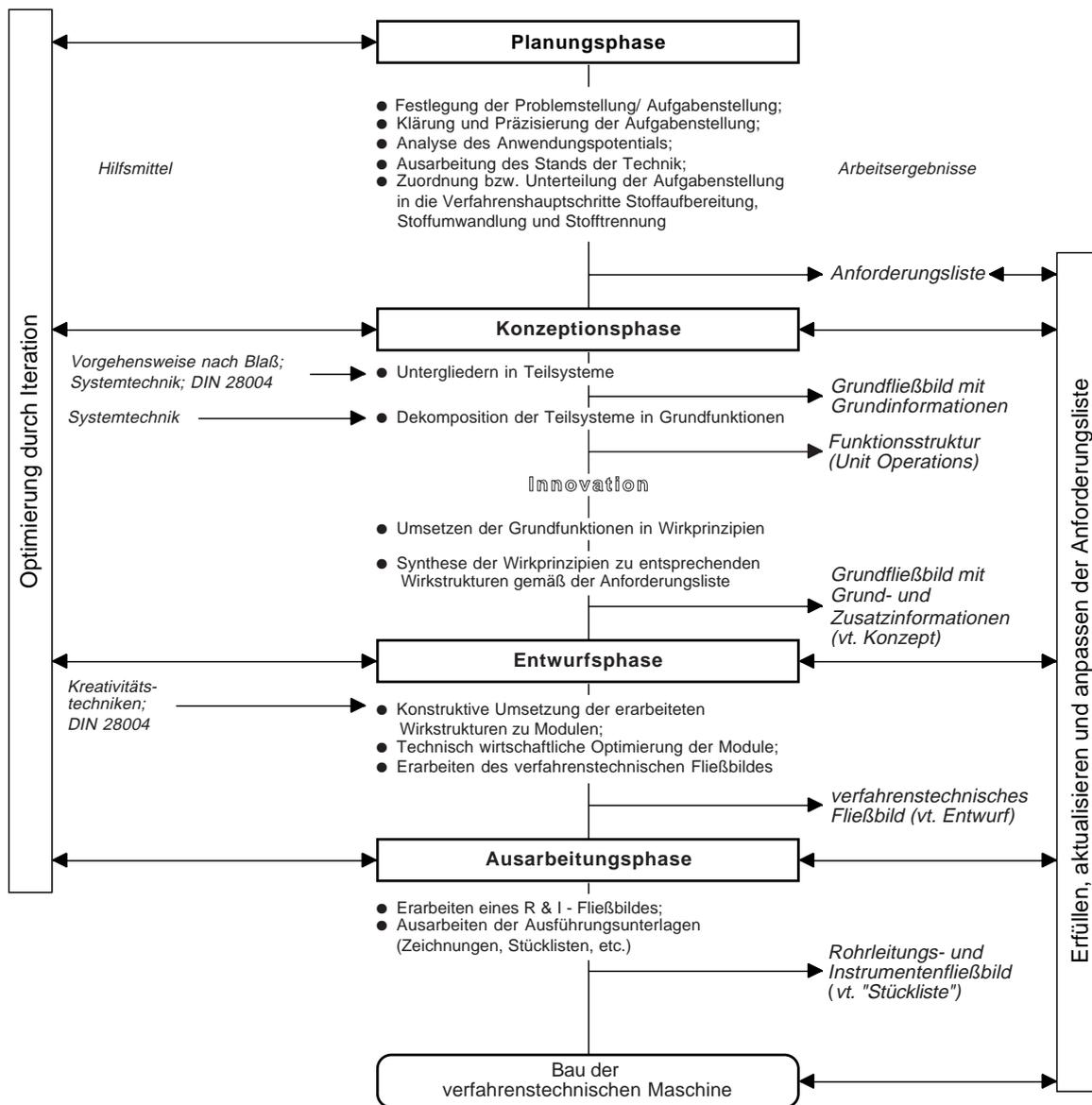


Bild 5: Vorgehensweise zur Entwicklung und Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen nach VDI 2221 und VDI 2222 unter Zuhilfenahme der Systemtechnik und der Vorgehensweisen nach Blaß und DIN 28004

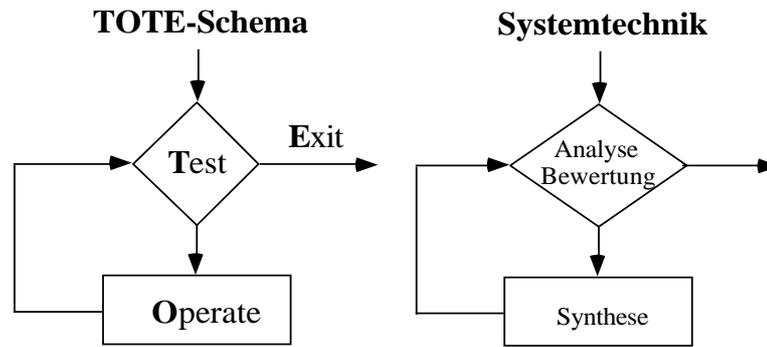


Bild 6: TOTE-Schema und Systemtechnik als Grundelement von Denk- und Handlungseinheiten /9/

lich, um zur Realisierung eines technischen Produktes eine einheitliche "Sprache" auch fachübergreifend zu finden /6/. Diese einheitliche "Sprache" ist die Grundvoraussetzung für eine korrekte Lösung der Aufgabenstellung, da weder der Fordernde und das die Aufgabenstellung bearbeitende Projektteam eine physikalische Einheit darstellen noch das aus Vertretern der Verfahrenstechnik, des Maschinenbaus, der Regelungstechnik usw. zusammengesetzte Team zur Problemlösung über die gleiche Ausbildung, den gleichen Erfahrungshintergrund und damit über die gleiche Sprachregelung verfügen.

Mit den aus der Aufgabenklärung gewonnenen Informationen (Patentrecherche, Konkurrenzanalyse, Marktanalyse usw.) wird eine Detaillierung, d.h. eine Unterteilung bzw. Zuordnung der Aufgabenstellung durchgeführt, wobei die in Bild 4 dargestellten Hauptschritte einen Einstieg bieten können. Es muß aber die Einschränkung gelten, daß ein detaillierter Verfahrensschritt oder eine verfahrenstechnische Maschine nicht zwingend alle drei Hauptschritte eines Prozesses beinhalten muß. Das Arbeitsergebnis "Anforderungsliste" der Planungsphase wird entwicklungsbegleitend bis zum Bau der verfahrenstechnischen Maschine permanent erweitert, aktualisiert, angepaßt und erfüllt.

Konzeptionsphase

Die Konzeptionsphase beginnt mit dem "Untergliedern in Teilsysteme" unter Einbeziehung der Hilfestellungen, die die Systemtechnik, die DIN 28004, die Richtlinie VDI 2222 und auch die Vorgehensweise nach Blaß /3/ bieten. Im Sinne der Systemtechnik wird in diesem Arbeitsschritt das komplexe System der Aufgabenstellung zu Teilsystemen geringerer Komplexität zerlegt /4/. Jede Funktion läßt sich dabei in Form einer Black-Box darstellen /5/, **Bild 7** ist eine sol-

che Darstellung für die Funktion "Stoff fördern" mit den in- und outputs "Energie, Stoff, Signal". Wesentlich gegenüber der Fließbilddarstellung ist, daß diese Funktion noch keine konstruktive Entsprechung hat und daher noch offen ist für neue Lösungsprinzipien, Kombinationen von Prinzipien oder sogar die Infragestellung dieser Funktion überhaupt. Gegenüber der üblichen Maschineentwicklung bildet bei der Entwicklung einer verfahrenstechnischen Maschine meist der Stoffstrom die Hauptfunktion, während der Signal- und Energiefluß eine untergeordnete Bedeutung besitzen .

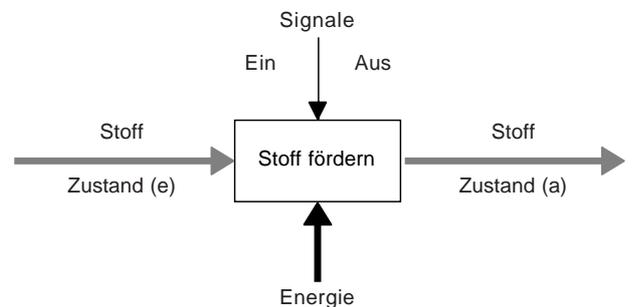


Bild 7: Black Box Darstellung einer Pumpe nach /5/

Die Darstellung eines Teilsystem durch eine Funktionelle Struktur und die in /5/ beschriebene Dekomposition in weitere Grundfunktionen ähnelt der Darstellung in Form des Grundfließbildes, im Gegensatz hierzu stellen die Funktionen aber keine Unit Operations mit einer Entsprechung durch Anlagenkomponenten dar, sondern erlauben eine Rückführung auf naturwissenschaftliche Grundoperationen, die z.T. noch keiner technischen Lösung zugeführt wurden. Dies ermöglicht die Findung innovativer Problemlösungen, welche auf den im Rahmen der Maschinen- und/oder Anlagenentwicklung umzusetzenden verfahrenstechnischen Prozeß optimal abgestimmt sind, wie an dem nachfolgenden Beispiel verdeutlicht werden soll.

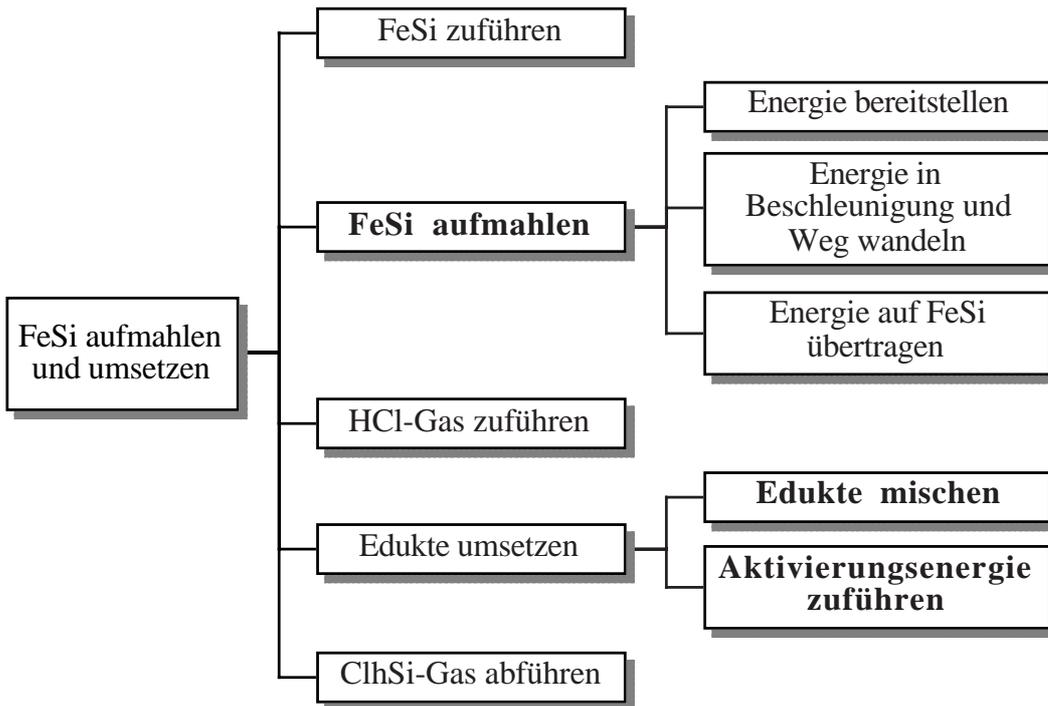
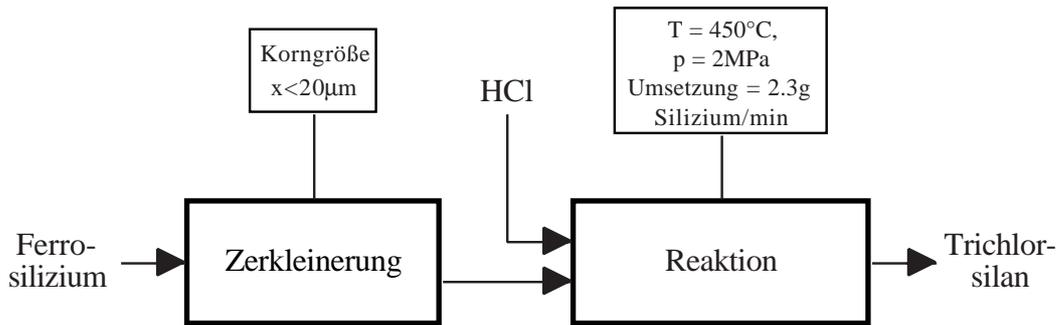


Bild 8: Aufbereitung des Problems in der Funktionsanalyse am Beispiel der Hydrochlorierung von Ferrosilizium zu Trichlorsilan nach /10/. Oben: Grundfließbild mit Grund- und Zusatzinformationen. Unten: Funktionsgliederung für die Gesamtfunktion "FeSi aufmahlen und umsetzen"

Für den Prozeß der Hydrochlorierung von Ferrosilizium zu Trichlorsilan soll eine maschinelle Umsetzung gefunden werden. Diese muß eine Mahlzone beinhalten, in der das Ferrosilizium zum Erhalten reaktiver Oberflächen aufgemahlen wird und einen beheizten Reaktor, in dem die Umsetzung des Ferrosiliziums zu Trichlorsilan unter Zuführung von gasförmigen HCl erfolgt.

Die Aufbereitung des Problems in einem verfahrenstechnischen Fließbild (**Bild 8** oben) gemäß der Vorgehensweise nach DIN 28004 und DIN 30600 um, so entsteht aufgrund des in der DIN 30600 bereitgestellten Bildzeichenkatalogs eine Vorfixierung auf die Hintereinanderschaltung einer für die Anforderungen geeigneten Mühle und eines entsprechenden Reaktors. Das Aufstellen einer Funktionsstruktur (**Bild 8** unten) der Gesamtfunktion "FeSi aufmahlen und umsetzen"

macht deutlich, daß die Teilfunktionen "FeSi aufmahlen", "Edukte mischen" und "Aktivierungsenergie zuführen" nach ihrer Umsetzung mit Hilfe der in /5/ angebotenen Lösungsmethoden für die jeweiligen Wirkprinzipien zu einer gemeinsamen Wirkstruktur einer Reaktionsmühle mit integrierten Funktionen des Mahlens und der chemischen Umsetzung in einem Reaktionsraum /11/ zusammengeführt werden können, die Verfahrensweise dieser Mühle kann wiederum als Fließbild dargestellt werden.

Entwurfsphase

Innerhalb der im Maschinenbau durch die Dimensionierung der Kraftflüsse, die Auswahl der Werkstoffe und die Festlegung der Wirkbewegungen gekennzeichneten Entwurfsphase wird die Dimensionierung

der Stoff- und Energieflüsse und damit die Festlegung der einzelnen Moduln der Anlage oder verfahrenstechnischen Maschine vorgenommen. Durch Berechnungen und Simulationen wird dieser Vorgang unterstützt, es können Kreativitätstechniken (Brainstorming, Syntectic usw.) oder diskursive Lösungsmethoden (Ordnungsschemata, Konstruktionskataloge usw.) zur Anwendung kommen - auch die in DIN 28004 angebotenen Informationen sind im Sinne eines Lösungskatalogs zu werten. Wie im vorhergehenden Schritt liegt die Chance der Innovation in der Abkehr von vorgefertigten Lösungen, im Falle der Entwicklung verfahrenstechnischer Maschinen wird hier wohl der intensivste Kontakt zwischen Verfahrenstechnikern und Maschinenbauern innerhalb des Projektteams herrschen.

Durch die technisch wirtschaftliche Optimierung der konstruktiven Umsetzung der erarbeiteten Wirkstrukturen im Sinne der Arbeitsinhalte der ersten Unterpunkte der Entwurfsphase (Bild 4) existieren die für das Erarbeiten des verfahrenstechnischen Fließbildes notwendigen Informationen:

- Alle für das Verfahren erforderlichen Apparate und Maschinen und die Hauptfließlinien (Hauptrohrleitungen, Haupttransportwege)
- Benennung und Durchflüsse bzw. Mengen der

Ein- und Ausgangsstoffe

- Benennung von Energie und Energieträgern
- Charakteristische Betriebsbedingungen

Über diese Informationen hinaus existieren bei einer interaktiven Arbeit Darstellungen und Dimensionierungsgrundlagen zu neuen Konstruktionen, wie dies in **Bild 9** am Beispiel der oben behandelten Reaktionsmühle gezeigt ist.

Ausarbeitungsphase

Mit der Ausarbeitung des verfahrenstechnischen Fließbildes im Rahmen der Entwurfsphase wird eine alle apparatebaulichen und maschinenbaulichen Komponenten umfassende Darstellung der zu entwickelnden verfahrenstechnischen Maschine realisiert. Dieses Arbeitsergebnis bildet nach nochmaliger Bewertung und Anpassung anhand der aktualisierten Anforderungsliste die Grundlage für die Ausführung der Maschine und Anlage. Im Fall der verfahrenstechnischen Maschine ist dies im wesentlichen die maschinenbaulich-fertigungstechnische Entwicklung der einzelnen Komponenten, die z.B. in Bild 3 unten nicht dargestellt ist. Die Darstellung einer solchen Entwicklung in einem R&I-Fließbild ist unter Umständen nicht mehr angebracht.

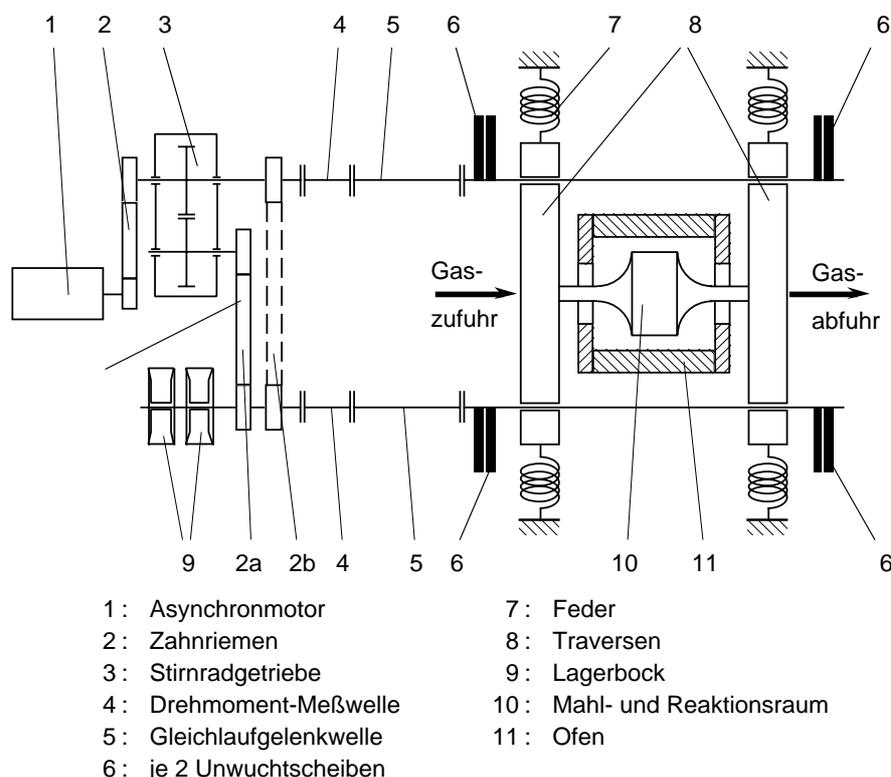


Bild 9: Prinzipskizze der Reaktionsmühle zur Hydrochlorierung von Ferrosilizium zu Trichlorsilan/11/

3 Anwendung der Methodik bei der Entwicklung verfahrenstechnischer Maschinen

Die Erarbeitung einer interdisziplinären Methodik zur Produktentwicklung auf dem Gebiet der verfahrenstechnischen Maschinen ist der methodische Rahmen für den Sonderforschungsbereich 180, eine Reihe von Projekten befassen sich mit dem Entwicklungsprozeß selbst und seiner Modellierung /2, 6, 9, 10/, seiner Unterstützung durch EDV-Systeme, der Qualitätssicherung und der Werkstofftechnik in verfahrenstechnischen Maschinen. In einer beachtlichen Anzahl von Projekten wurden prozeß- und maschinenorientierte Untersuchungen durchgeführt, die sich auf die Realisierung, Verbesserung oder Erweiterung verfahrenstechnischer Prozesse durch Anwendung von Maschinen beziehen. Anhand einiger Beispiele aus diesen Prozessen soll eine kritische Betrachtung zur Anwendung der oben dargestellten Entwicklungsmethodik durchgeführt werden.

3.1 Beispiel 1: Entwicklung eines Hochgeschwindigkeits-Windsichters

Bei diesem Beispiel sei die Konzeptions- und die Dimensionierungsphase besonders betrachtet. Die verfahrenstechnische Aufgabe ist die Entwicklung eines Klassierprozesses für Partikel mit einer Trenngrenze von 1 µm. Die Funktionsstruktur des Sichtvorgangs wird aus den Hauptschritten des Prozesses (Bild 4) detailliert aufbereitet und als Flußbild für den Stoff- und Energiefluß im Klassierungsprozeß in **Bild 10** dargestellt. Der Unterschied dieser funktionsbezogenen Struktur zum Grundfließbild ist offensichtlich, im vorliegenden Fall führte diese auf die physikalische Grundfunktion "Partikel in unterschiedliche Richtungen beschleunigen" mit der Aufgabe der Suche nach entsprechenden Kräften. Ein Funktionskatalog physikalischer Effekte zur Erzeugung von Kräften und seine Auswertung bezüglich ihrer Anwendung zur Beschleunigung von Partikeln führt zu dem in **Bild 11** dargestellten Zusammenhang der Kraftgrößen in Abhängigkeit von den Partikelgrößen - sich überschneidende Linien deuten auf Kraftkombinationen hin, die für eine Klassierung genutzt werden können. Beispielsweise bildet im Korndurchmesserbereich 1 bis 10 µm die Kombination der (volumenabhängigen) Zentrifugalkraft (3) mit der (flächenabhängigen) laminaren Strömungskraft (6) einen Klassiereffekt. Die Graphen für die Lorenzkraft (7) und die Zentrifugalkraft (3) schneiden sich im Bereich kleiner 0,01 µm - beispielsweise ausgenützt bei der Messung von Mo-

lekularmassen, der Schnittpunkt von Auftriebskraft (2) und Strömungskraft (6) wird bei größeren Partikeldurchmesser in der Flotation genutzt. Das Diagramm enthält auch Kraftkombinationen, die bis heute nicht zur Klassierung genutzt werden, obwohl sie geeignet erscheinen.

Auch in der Entwurfsphase gelang die Gestaltung möglicher neuer Prinzipien für die Erzeugung von Wirkflächen und Wirkbewegungen nur durch eine Rückführung auf Grundfunktionen, wie sie in **Bild 12** am Beispiel der Kräftekombination (3)-(6) gemäß Bild 11 dargestellt ist. Die Ausführung der darin mit "P" bezeichneten Funktionen mit Hilfe eines morphologischen Suchschemas führt zu einer vollständigen Übersicht aller Klassiermöglichkeiten nach diesem Prinzip und enthält alle Wirkprinzipien bekannter Windsichter (**Bild 13**). Im vorliegenden Fall schloß sich eine systematische Auswahl der verschiedenen Lösungsprinzipien und eine Präzisierung der Anforderungsliste für das zu entwickelnde Maschinenelement, den Windsichterrotor, an.

Obleich es sich bei dem vorliegenden Beispiel nur um einen Ausschnitt eines verfahrenstechnischen Prozesses und von vornherein um die Entwicklung einer Maschine geht, wird doch in der Vorgehensweise deutlich, daß die im Bereich der Produktanwendung entwickelten Methoden ein Innovationspotential auch für die Entwicklung des Prozesses bilden. Man erkennt auch die notwendige Zusammenarbeit zwischen Maschinenbau und Verfahrenstechnik im Bereich der Aufgabendefinition, der Entwicklung der Funktionsstruktur und der (hier nicht dargestellten) Bewertung und Auswahl der Lösungen.

3.2 Beispiel 2: Entwicklung eines Reaktionsverdichters für das Recycling von Kunststoffen

Im Gegensatz zum vorhergehenden Beispiel handelt es sich hier um die Entwicklung eines neuartigen verfahrenstechnischen Prozesses zum chemischen Recycling von Kunststoffen mit dem Ziel neuer Produktgase, -öle oder -wachse. Die Idee dieses Vorhabens beruht auf der Degradation von Polymeren in überkritischem Wasser, wobei eine thermische und reaktive Zerkleinerung und damit Reduzierung der Molmasse eintritt. Batchversuche in der chemischen Verfahrenstechnik mit Kunststoffgemischen ergaben eine Verflüssigung von bis zu 75% des Aufgabegutes, eine gute Abtrennung anorganischer Materialien und die Reaktionsbedingungen für einen zu entwickelnden

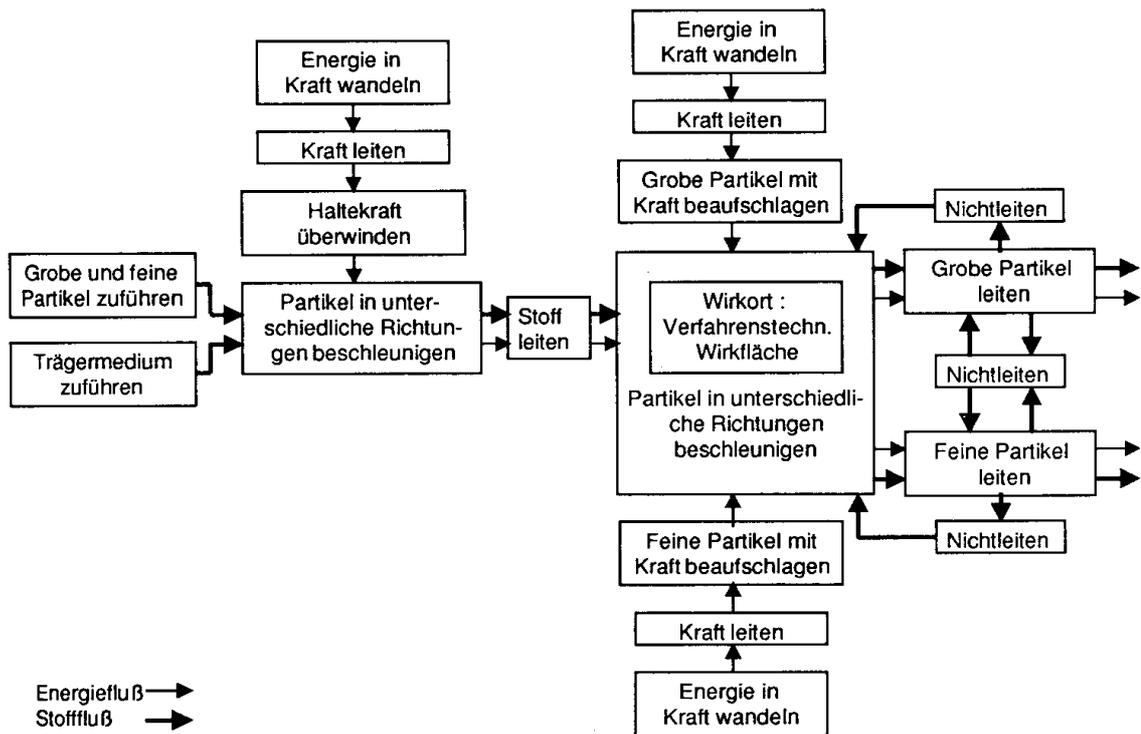


Bild 10: Darstellung des Stoff- und Energieflusses im Klassierprozeß /12/

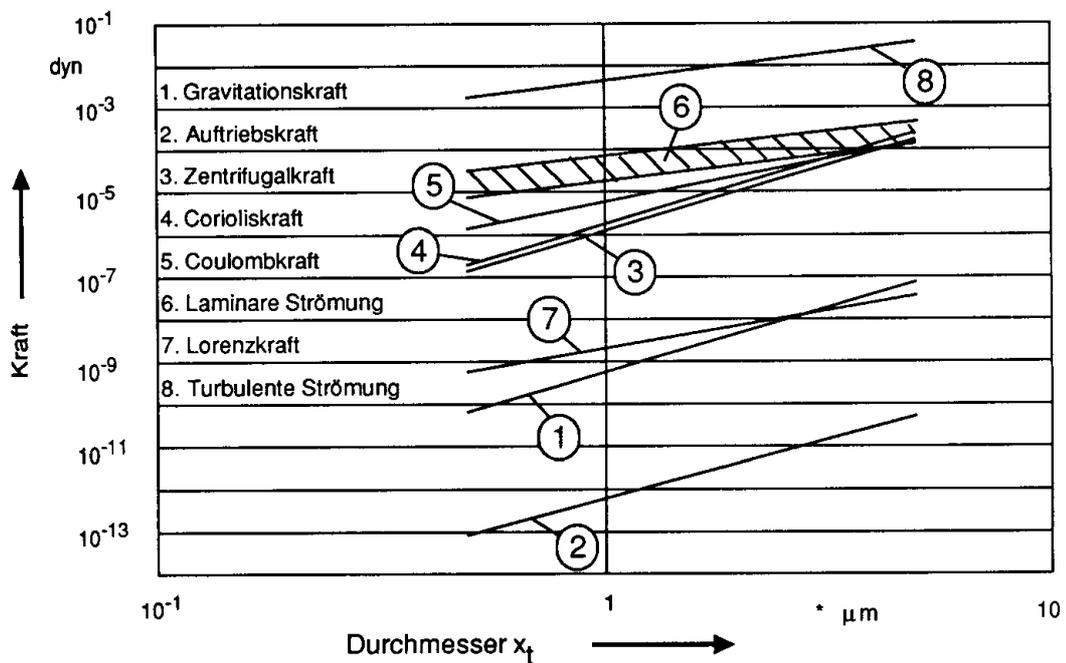


Bild 11: Darstellung der Kraft auf ein Einzelpartikel in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser für verschiedene Potentialkräfte aus dem Bewertungskatalog "Kraftwirkung auf Partikel" /12/

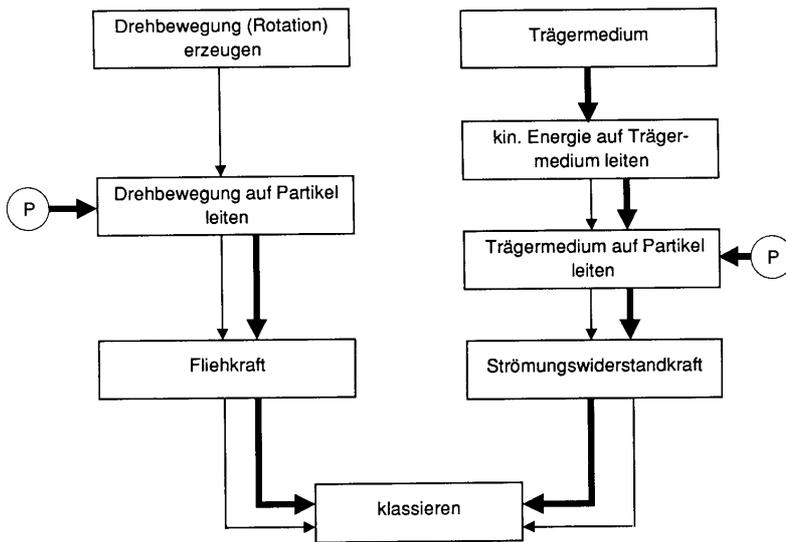


Bild 12: Spezielle Funktionsstruktur für "Partikel durch Strömungswiderstandskraft und Fliehkraft klassieren" /12/

Partikel mit Strömung beaufschlag.		Richtung zur Fliehkraftwirkung		
		↑ ↓	← →	0
Rotation auf Partikel leiten				0
freie Strömung				0
gerichtete Strömung	axial	0		
	radial		0	0
magnetisches Feld				
elektrisches Feld				
Impuls/Stoß Drehteller		0		
Reibung				

Bild 13: Morphologisches Schema zur Suche nach Lösungskombinationen für "Partikel mit Strömungsgeschwindigkeit beaufschlagt" und "Rotation auf Partikel leiten" /12/

kontinuierlichen Prozeß: 450 bis 500°C und 20 bis 40 MPa Druck. PVC-Anteile im Polymergemisch führen zur Bildung von gasförmigen Zwischenprodukten und Korrosionsangriff auf das Reaktormaterial /14/.

Ergebnis der verfahrenstechnischen Überlegungen ist das Grundfließbild (**Bild 14**), das als Grundlage zur Klärung der Aufgabenstellung und zu einer ersten

Funktionsbetrachtung führt. Ableitbar hieraus ist z.B., daß die Kunststoffe in einen Zustand versetzt werden müssen, in dem sie bei den o.a. Bedingungen gefördert werden können. Die Auswertung der Batchversuche und die Umsetzung in einem Team aus Vertretern des Maschinenbaus und der Verfahrenstechnik führte zu einer detaillierten Vorstellung des Prozesses als Grundfließbild - hier erwies sich die Arbeit mit Fließbildern als vorteilhaft, weil der zu erarbeitende Prozeß ganz eindeutig von den Stoffströmen her definiert ist und zunächst der Bereich des eigentlichen Reaktors (Reaktionsverdichters) mit den integrierten Funktionen des Druck- und Temperatureaufbaus einschließlich der Kreislaufförderung aus dem Prozeß heraus definiert werden mußte. **Bild 15** umreißt dann den eigentlichen Entwicklungsbereich der verfahrenstechnischen Maschine.

Mit diesen Angaben kann eine Funktionsanalyse einsetzen, wie sie in **Bild 16** dargestellt ist. Man beachte, daß das Fließbild Bild 14 Festlegungen von Unit Operations enthält, die in der Funktionsstruktur wieder verlassen werden, um den Weg zu Innovationen zu öffnen - dieser Schritt war von nicht unerheblichen Diskussionen im Entwicklungsteam begleitet. Man erkennt so ganz deutlich, daß die funktionsbezogene Betrachtung die Chance einer weit über die bekannten Elemente, z.B. Pumpen, Ventile usw., gehende Innovation erlaubt und daß sie vor allem die Chance einer Lösung mit der Erfüllung mehrerer Funktionen in einem Funktionsraum gibt. Die weitere Vorgehensweise führte zu dem in **Bild 17** gezeigten Reaktionsverdichter, der aus einer Schwingschieber-Kolbenpumpe, die das erzeugte Fluid-Feststoff-Gemisch in die Reaktionszone fördert, aus in den Eduktstrom integrierten statischen Mischern, aus der Reaktionszone und aus der Strömungsmaschine für die Erzeugung des inneren Kreislaufs besteht. Konstruktiv können die Hochdruckpumpen zur Förderung des Gemisches und zur Erhaltung des Kreislaufs zusammengelegt werden. Im Kurbelgehäuse befindet sich der unterkritische Teil des Reaktionsraums, hier dient das Reaktionsgemisch

zur Erzeugung des inneren Kreislaufs besteht. Konstruktiv können die Hochdruckpumpen zur Förderung des Gemisches und zur Erhaltung des Kreislaufs zusammengelegt werden. Im Kurbelgehäuse befindet sich der unterkritische Teil des Reaktionsraums, hier dient das Reaktionsgemisch

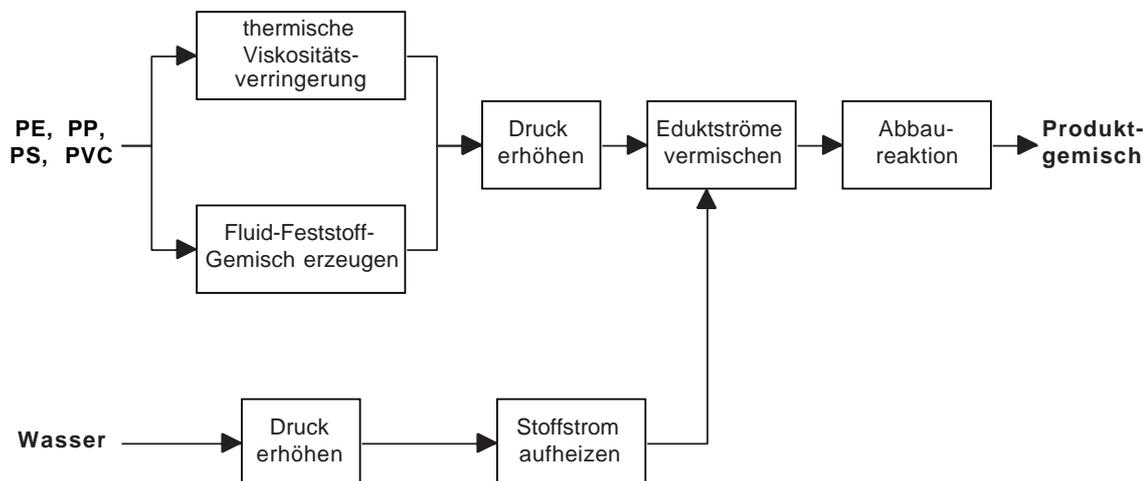


Bild 14: Grundfließbild mit Grundinformationen zum Prozeß "Polymerdegradation" /8/

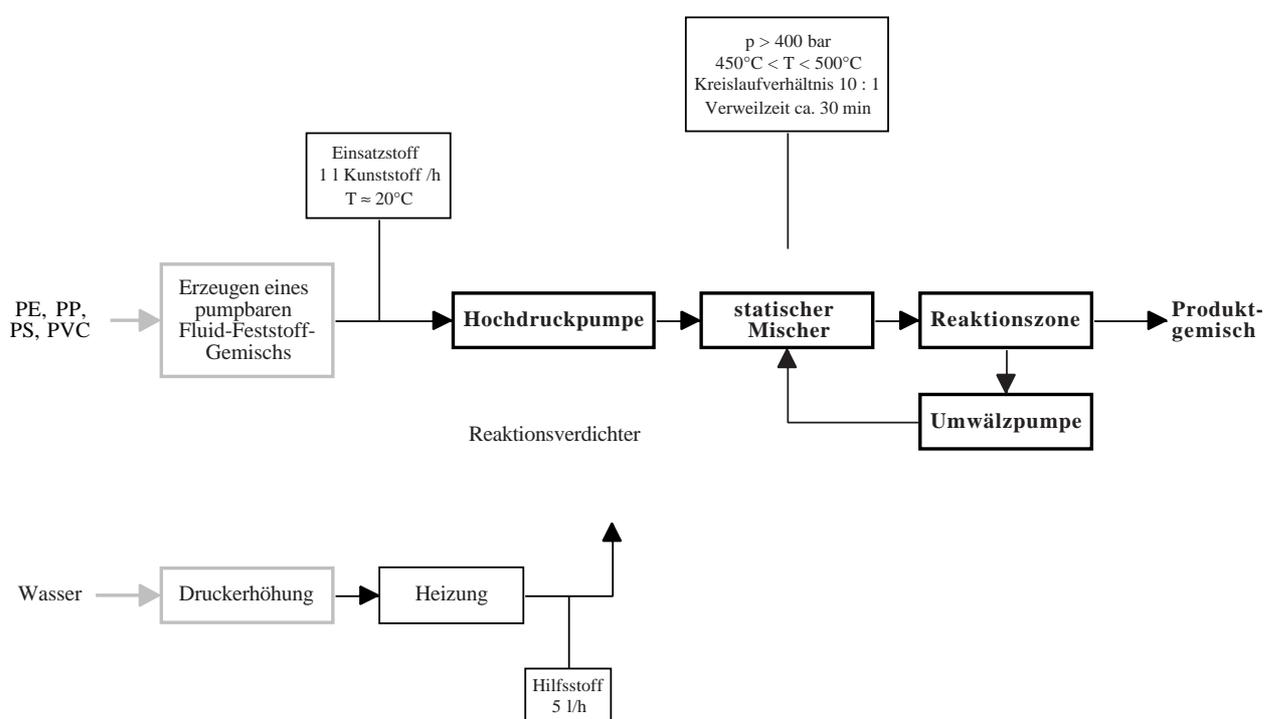


Bild 15: Grundfließbild mit Zusatzinformationen, Entwicklung aus Bild 14 zur Definition des Umfangs und der Anforderungen an einen Reaktionsverdichter /8/

gleichzeitig als Schmiermittel und Sperrflüssigkeit, die einen Leckvolumenstrom durch die konstruktiven Spalte der Pumpe unterbindet. Die Druckdifferenz zwischen Kurbelgehäuse und Reaktionsraum wird über die Strömungsverluste im beheizten Bypass, in dem das Wasser seine überkritische Prozeßtemperatur erreicht, eingestellt. Das Prozeßwasser wird über eine separate Kolbenpumpe in das Kurbelgehäuse eingebracht.

Die Darstellung der Funktionsweise ist als verfahrenstechnisches Fließbild in **Bild 18** dargestellt. Es ist nicht zu übersehen, daß es aus der Analyse der konstruktiven Lösung erstellt wurde und daß die hier ge-

wählte Lösung zur Erhaltung des Kreislaufs einer besonderen Darstellungsart bedarf. Auch hier ist durch die Einbeziehung von methodischen Elementen aus dem Maschinenbau - vorwiegend im Zeitpunkt der Entwurfsphase - eine Lösung für eine verfahrenstechnische Maschine entstanden. Besonders zu erwähnen ist der dritte Partner in diesem Projekt: Die Betriebsbedingungen und der verstärkte korrosive Angriff der Reaktionspartner erforderte die Einbeziehung einer speziellen Werkstoffentwicklung für den Reaktionsverdichter.

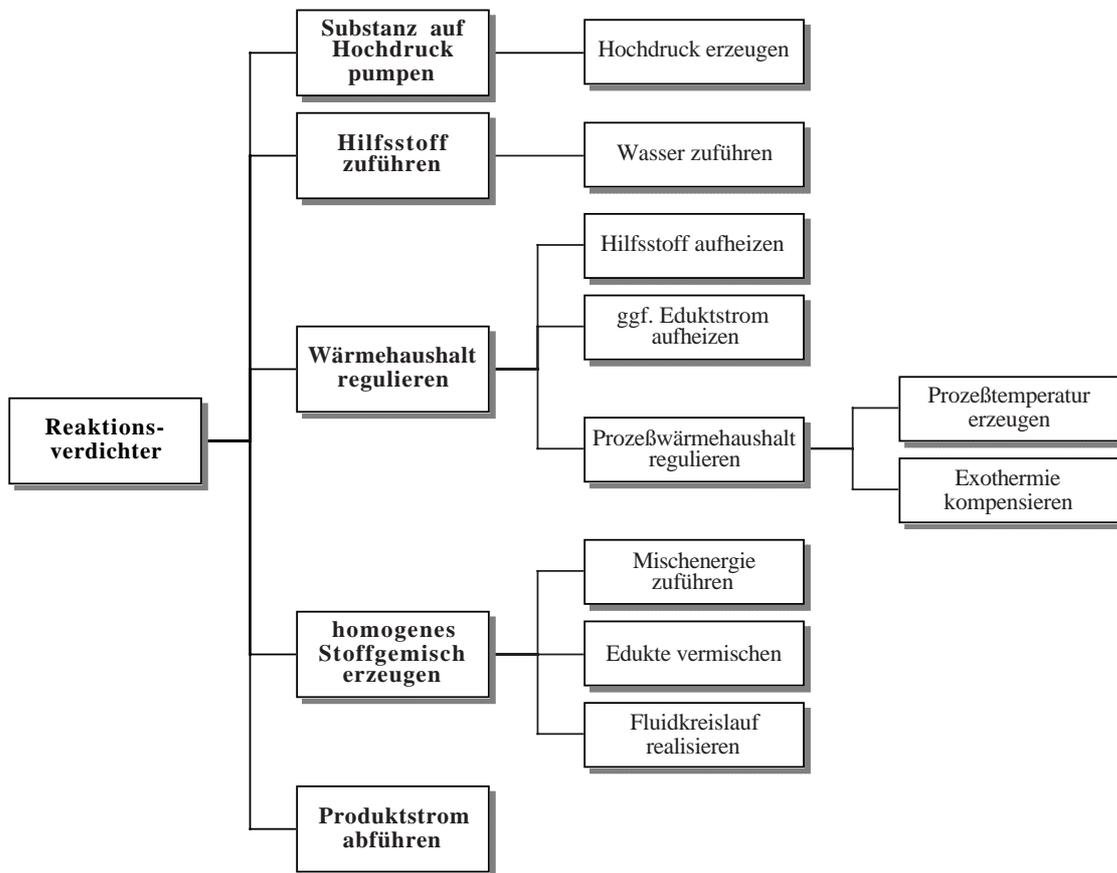


Bild 16: Funktionsstruktur des Reaktionsverdichters für das Recycling von Kunststoffen/8/

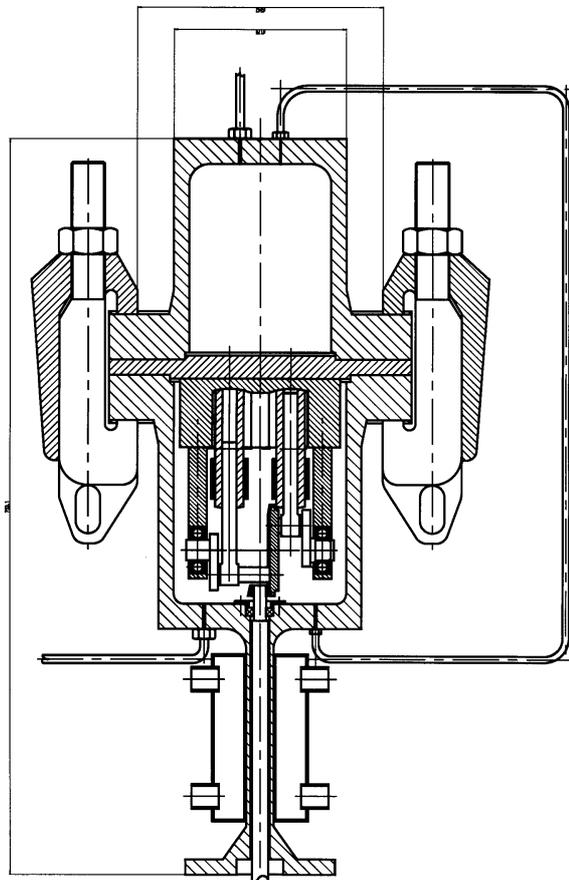
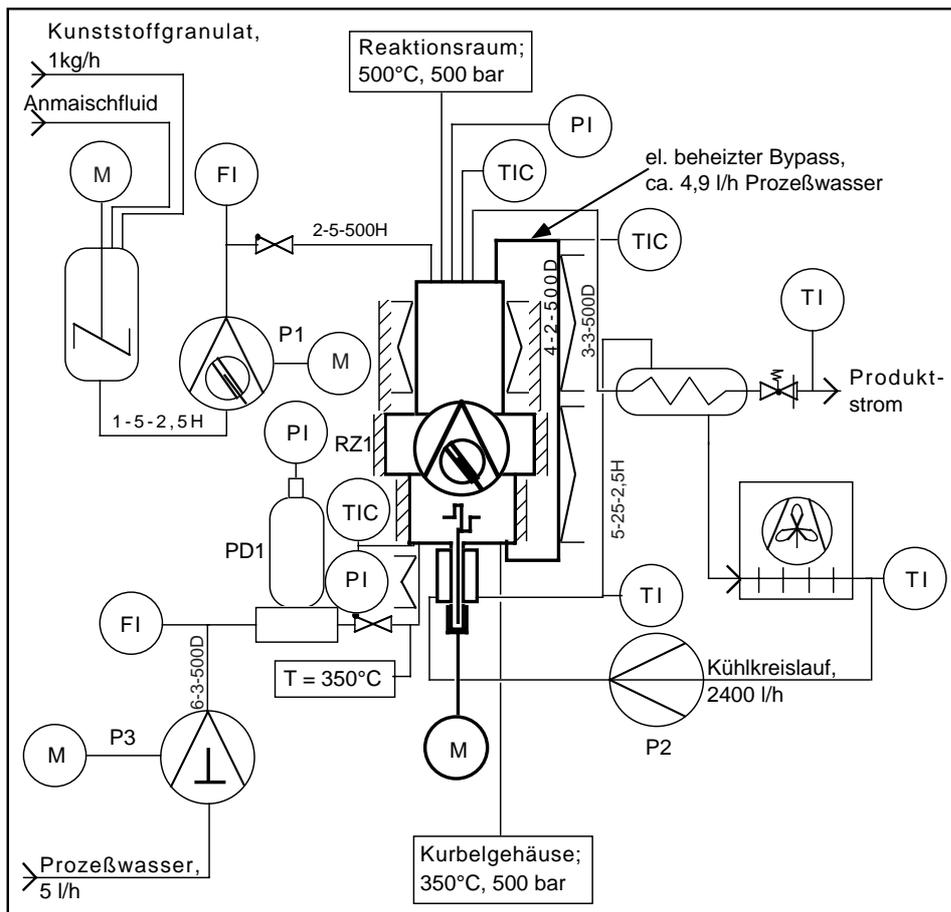


Bild 17: Konstruktionszeichnung der Reaktionszone eines Reaktionsverdichters für das Recycling von Kunststoffen/8/



	P1	P2	P3	PD1	RZ1
Benennung	Schwingschieberkolbenpumpe	Kreiselpumpe	1-Zyl.-Kolbenpumpe	Pulsationsdämpfer	Reaktionszone
Techn. Daten				1l Nennvolumen	3l Reaktionsvolumen
				$p_{zul} = 550 \text{ bar}$	in. Kreislauf 10:1
				Gewicht: 13 kg	
Fördervolumen	1 - 7 l/h gegen 550 bar	2400 l/h	2-8 l/h gegen 550 bar		$V_{\text{Kreislauf}} = 60 \text{ l/h}$
Betriebstemp.	$T = 20^\circ\text{C}$	$T = 35^\circ\text{C}$	$T = 25^\circ\text{C}$		$T = 500^\circ\text{C}$
Werkstoffbez.	2.4856		1.4571		1.4980

Bild 18: Darstellung der Funktionsstruktur des Reaktionsverdichters als verfahrenstechnisches Fließbild /8/

3.3 Beispiel 3: Entwicklung einer Reaktionsmühle

In diesem Beispiel seien die Angaben vervollständigt, die bereits im methodischen Teil des Berichtes angeführt wurde. Aus dem Gedanken der Vereinigung der Prozessschritte Zerkleinerung und chemische Reaktion bei der Herstellung von Chlorsilanen aus Ferrosilicium und Chlorwasserstoff entstand auf dem gleichen Weg der Anwendung konstruktionsmethodischer Vorgehensweisen (**Bild 8**) eine Prototypmühle (**Bild 9**), die eine verfahrenstechnische Optimierung des gleichzeitigen Mahl- und Reaktionsprozesses ermöglichte. Dabei erwies sich, daß der Mahlprozeß zweckmäßigerweise so zu gestalten ist, daß mög-

lichst kein permanenter Freiraum in Strömungsrichtung entsteht und gleichzeitig eine gute Durchmischung von Feststoff und Reaktionsgas anzustreben ist. Dies führte aus den Versuchsergebnissen heraus zu neuen Anforderungen an die Maschine: Beschleunigungen über 45 g und Amplituden über 5 mm führen zu deutlicher Verbesserung von Mahl- und Reaktionsergebnissen, verlangen aber nach einer Umkonstruktion der Mühle nach den Prinzipien von Leichtbau und extrem hohen Dauerfestigkeitswerten. Zur Zeit wird mit diesen Anforderungen in einem durch die DE-CHEMA geförderten Projekt eine Hochleistungs-Reaktionsmühle mit kontinuierlichem Stofffluß entwickelt.

4 Zusammenfassung

Zur Entwicklung von konstruktiven Komponenten und Anlagen für die Verfahrenstechnik mit ihren komplexen Aufgabenstellungen wird am Beispiel der verfahrenstechnischen Maschinen eine systematisch-methodische Vorgehensweise vorgestellt, die eine fachübergreifende Entwicklungsarbeit unterstützt.

Dabei wurde anhand der in der Richtlinie VDI 2221 beschriebenen Methodik zum Entwickeln und Konstruieren Technischer Systeme, der in Richtlinie VDI 2222 beschriebenen Konstruktionsmethodik, von Beispielen zu konstruktionssystematischen Vorgehensweisen in der Verfahrenstechnik, des Einsatzes der Systemtechnik als Problemlösungsmethodik in der Verfahrenstechnik und der DIN 28004 gezeigt, daß alle diese Vorgehensweisen interessante und innovative Elemente enthalten, daß sie aber durch ihre branchenspezifische Ausrichtung und die Belegung durch einseitige Beispiele eine Bearbeitung übergreifender Aufgaben nur schlecht unterstützen. Aus der Kombination der Vorgehensweisen wurde eine Empfehlung gegeben, die bei grundsätzlicher Führung der verfahrenstechnischen Entwicklung durch Fließbilder die Einbeziehung von Methoden innovativer Lösungsfindung aus dem Maschinenbau nutzt, um sowohl die Prozeß- wie die Maschinenentwicklung flexibler zu gestalten.

Die Beispiele zeigen, daß die deutlichen Innovationspotentiale auch zu neuen Forderungen sowohl auf der Prozeß- als auch auf der Maschinenseite führen.

5 Literatur

- /1/ Dietz, P.: Konstruktionssystematische Überlegungen und beanspruchungsgerechtes Gestalten von Maschinen in der Verfahrenstechnik. Konstruktion 45 (1993), Nr. 1, S. 17 - 24. Springer
- /2/ Dietz, P.: Der SFB 180: Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen - eine Übersicht. Berichte und Ergebnisse aus dem Sonderforschungsbereich 180. Kolloquium am 15./16. Februar 1996. Clausthal
- /3/ Blaß, E.: Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse. Otto Salle Verlag, Frankfurt am Main, 1989
- /4/ Richtlinie VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Ausschuß Methodisches Konstruieren. VDI Handbuch Konstruktion

1983

- /5/ Richtlinie VDI 2222: Konstruktionsmethodik; Konzipieren technischer Produkte. VDI Gesellschaft Konstruktion und Entwicklung, Ausschuß Konstruktionsmethodik. VDI Handbuch Konstruktion 1977
- /6/ Kruse, P.: Anforderungen in der interdisziplinären Systementwicklung: Erfassung, Aufbereitung, Bereitstellung. Dissertation; TU Clausthal 1995
- /7/ DIN 28004: Fließbilder verfahrenstechnischer Anlagen, Fließbilderarten, Informationsgehalt. Deutsche Normen 1977
- /8/ 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. Diss. TU Clausthal 1996
- /9/ Hartmann, D.: Modell zur qualitätsgerechten Konstruktion. Diss. TU Clausthal 1995
- /10/ Schönert, K.; Hoffmann, U.; Dietz, P.: Entwicklung und Erprobung einer Reaktionsmühle für nichtkatalytische Gas-Feststoffumsetzungen während der Mahlung ("Reaktionsmühle"). Sonderforschungsbereich 180, Arbeitsbericht 1991-1992-1993. Clausthal 1993
- /11/ Dietz, P.; Bock, U. : Bestimmung des Leistungseintrags in einer Schwingmühle. IMW-Institutsmitteilung Nr. 17 (1992). Clausthal-Zellerfeld
- /12/ Ebert, J.: Ein Beitrag zur systematischen Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen, dargestellt an der Konzeption und Gestaltung einer Feinstklassiermaschine. Diss. TU Clausthal 1989
- /13/ Rübhelke, L.: Konstruktive Lösungen und Auslegungsmethoden für Hochgeschwindigkeitsabweiseradsichter aus Leichtbauwerkstoffen in der Verfahrenstechnik. Diss. TU Clausthal 1994
- /14/ Hoffmann, U. und Gronwald, P.: Chemischer, thermischer und mechanischer Abbau von Polymeren in einem Hochdruckverdichter mit simultaner Reaktion für das Recycling von Kunststoffen (Reaktionsverdichter). Abschlußbericht zum Teilprojekt 12 des Sonderforschungsbereichs 180. Clausthal 1998

Innenhochdruck sorgt für festen Fügeseitz - Leichtbau-Maschinenelemente durch plastische Verformung herstellen

Dietz, P.; Garzke, M.; Grünendick, T.

Die Herstellung und Nutzung kraftschlüssiger Welle-Nabe-Verbindungen durch Innenhochdruckfügen (IHF) ist ein sehr junges Teilgebiet der Maschinenelemente, Veröffentlichungen existieren bisher kaum. Erste Untersuchungen am IMW im Rahmen von Industriekontakten bestätigen eindrucksvoll das Potenzial dieser Verbindungstechnik bezüglich der Drehmomentübertragungsfähigkeit. Der Artikel beschreibt das Fügeverfahren, die konstruktive Gestaltung der Preßverbindung sowie erste Untersuchungsergebnisse.

Internal high pressure assembled press fits are a new technology within machine elements. No publications are available. First investigations due to torque transmission at the IMW clearly show the potential. The paper describes the fitting process, the design and first results.

1 Einleitung

Allgemeine Tendenzen in der Produktentwicklung sind gekennzeichnet durch:

- die Verkürzung der Entwicklungszeiten
- eine "Ausreizung" hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Werkstoffkennwerte
- angepaßte Funktionalität (z.B. Tailored Blanks in der Blechteilekonstruktion)

Maschinenelemente als Basiskomponenten antriebstechnischer Baugruppen und Systeme unterliegen ebenfalls diesen Anforderungen. Oftmals erfüllen sie neben ihren Hauptfunktionen wie "Leiten", "Verbinden" etc. auch sicherheitsrelevante Aufgaben. Daher sind abgesicherte Dimensionierungsgleichungen und Kenntnisse des Betriebsverhaltens unabdingbare Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz unter technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Das aus der Blechteilefertigung bekannte Verfahren des Innenhochdruckumformens (IHU), bei dem flächige oder rohrförmige Ausgangskörper in einem Konturwerkzeug durch die Wirkung eines unter hohem Druck stehenden Mediums in die Endform gebracht werden, wird auch seit wenigen Jahren er-

folgreich zur Herstellung von kraftschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen (Preßverbindungen) eingesetzt. Mit der abgewandelten Verfahrensvariante des Innenhochdruckfügens (IHF) erfolgt z.Z. vorrangig die Herstellung gebauter Nockenwellen für Verbrennungsmotoren /1, 2/, aber auch die Befestigung von Ketten- oder Riemenrädern. Nachfolgend wird die Fertigungstechnologie kurz beschrieben.

2 Innenhochdruckfügen von Preßverbindungen

Die Ausgangsbauteile "Hohlwelle" und "Nabe" besitzen vor dem Fügen im Gegensatz zu konventionellen Längs- oder Querpreßverbänden ein Spiel, d.h. der Bohrungsdurchmesser des Außenteils (Nabe) ist geringfügig größer als der Außendurchmesser der Welle. Übliche Werte für das durchmesserbezogene Spiel liegen zwischen 0,05 und 0,2 mm.

Nachdem die Welle in der Nabe positioniert ist, wird das Aufweitwerkzeug (Sonde) mit den Dichtungen in die Welle eingeführt. Über ein geeignetes Meßsystem erfolgt die exakte Positionierung der Dichtungen unmittelbar an den beiden Nabenrändern. Durch die Sondenbohrung wird das Hydromedium unter Druck zugeführt, wobei sich nur der Ringspalt zwischen Sondengrundkörper und Rohrdurchmesser füllt /3/, **Bild 1**.

Bei weiterer Drucksteigerung weitet sich zunächst nur die Welle lokal unterhalb der Nabe auf, nachdem das Fügenspiel überwunden ist (**Bild 2**, ϵ_s : Rohrdehnung zur Überwindung des Spiels), legt sich die Welle an die Nabe an und beide Bauteile expandieren gemeinsam. Aufgrund der Wahl des Streckgrenzenverhältnis zwischen beiden Fügepartnern, bei der der Rohrwerkstoff gegenüber dem Nabenmaterial die geringere Fließgrenze aufweist, wird die Welle plastisch verformt, das Außenteil weitet sich nur elastisch auf. Nach vollständiger Innendruckrücknahme des Fluids federn beide Bauteile entsprechend der vorgegebenen Werkstoffpaarung von unterschiedlichen Niveaus ausgehend parallel zur Hooke'schen Gerade zurück.

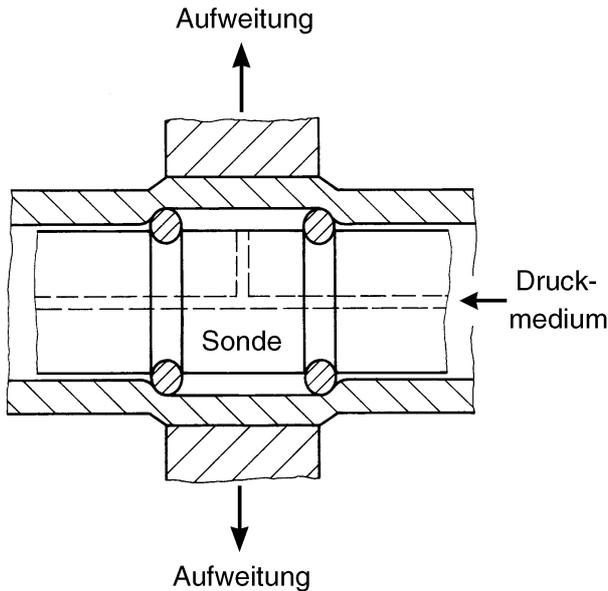


Bild 1: Prinzip des Innenhochdruckfügens von Preßverbindungen

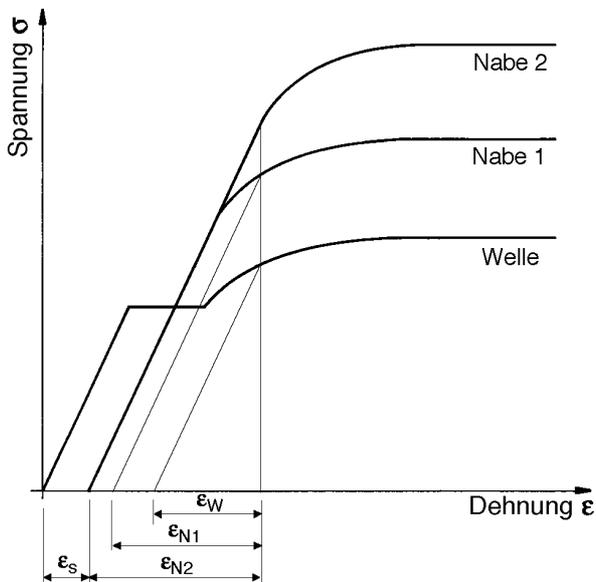


Bild 2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Verbindungen mit höherfestem Nabenwerkstoff

Bild 2 zeigt schematisch den Fügevorgang im Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Werkstoffe mit gleichem Elastizitätsmodul (z.B. Stahl). Die Rückfederung der Nabe (symbolisiert durch ϵ_{N1}) ist bedingt durch die stärkeren Bauteilkräfte erheblich größer als die der Welle (ϵ_W), es stellt sich ein fester Preßsitz zwischen Welle und Nabe ein. Wird die Streckgrenze der Nabe noch höher gewählt (Nabe 2 in Bild 2), so stellen sich nach dem Fügen noch größere Normalkräfte in der Verbindungszone ein, wodurch sich die Tragfähigkeit erheblich steigern läßt. Es sei kurz erwähnt, daß die realen Verhältnisse etwas komplizierter sind, da beide Bauteile

nicht bis zum Punkt $\sigma=0$ zurückfedern. Andernfalls wären die tangentialen Zugspannungen in der Nabe Null und es könnte sich keine Pressung in der Verbindungszone einstellen.

Wird dagegen ein Fügeverband mit Materialien angestrebt, bei denen die Streckgrenze der Welle größer als die der Nabe ist, so läßt sich aufgrund des geringeren Rückfederungsverhaltens der Nabe gegenüber der Welle ($\epsilon_N < \epsilon_W$) kein Preßsitz aufbauen, eine Drehmoment- bzw. Kraftübertragung ist daher nicht möglich, **Bild 3**.

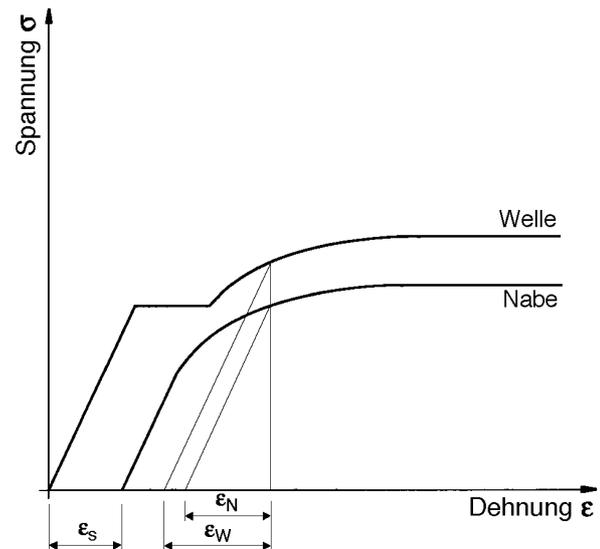


Bild 3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Verbindungen mit niederfestem Nabenwerkstoff

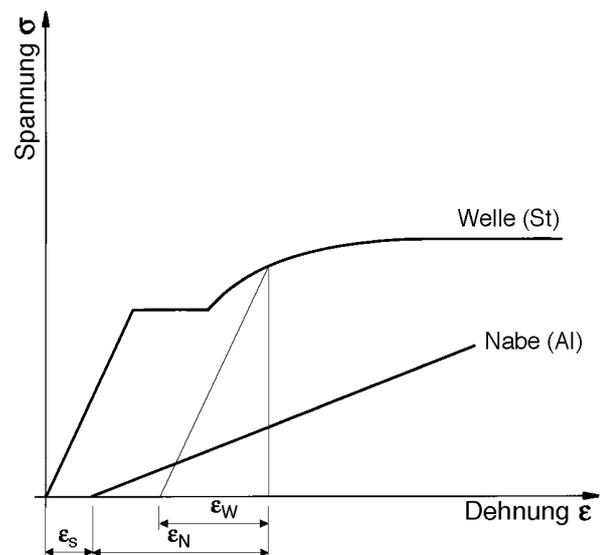


Bild 4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Verbindungen mit Naben aus Aluminiumknetlegierungen

Auf Basis dieser Überlegungen erscheint es ebenso schwierig, Naben aus Aluminiumknetlegierungen

auf Stahlwellen zu befestigen (E-Modul-Verhältnis: $E_{St}/E_{Al} \approx 3$). Der größere Rückfederweg der Al-Nabe ist zwar gegeben, bedingt durch den geringeren E-Modul sind aber auch die Rückfederkräfte des Außenteils entsprechend kleiner, **Bild 4**. Damit würde die Drehmomentübertragung stark eingeschränkt. Weiterhin sind nach dem derzeitigen Stand der Technik fast keine Al-Legierungen verfügbar, die höhere Streckgrenzen als die der üblicherweise verwendeten Rohrwerkstoffe besitzen /4, 5/ (vgl. Kap. 3). Die Höhe der Gleichmaßdehnung des Rohrmaterials könnte in diesem Zusammenhang ein weiteres Hindernis darstellen.

3 Werkstoffe

Bei innenhochdruckgefühten Welle-Nabe-Verbindungen wird der Fugendruck durch die plastische Verformung der Welle und der daraus resultierenden Rückverformungsbehinderung der Welle und Nabe erzeugt. Die Wahl der geeigneten Werkstoffpaarung hängt daher nicht nur vom Streckgrenzenverhältnis sondern auch entscheidend vom Dehnungsverhältnis der Fügepartner ab.

Für eine erste theoretische Abschätzung der Werkstoffpaarung kann folgende aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm abgeleitete Beziehung herangezogen werden:

Unter der Voraussetzung, daß die Rückfederung der Welle geringer als die der Nabe sein muß ($\epsilon_W < \epsilon_N$; vgl. z.B. Bild 2), kann das Hooke'sche Gesetz für den einachsigen Spannungszustand

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1)$$

umgeformt werden in

$$\frac{R_{e, Nabe}}{R_{e, Welle}} > \frac{E_{Nabe}}{E_{Welle}} \quad (2)$$

Hierbei darf der Nabenwerkstoff maximal bis zur Streckgrenze belastet werden und der Wellenwerkstoff muß eine ausreichende Bruchdehnung aufweisen. Folgende interessante Erkenntnisse lassen sich aus obiger Beziehung ableiten: Ein nicht ausreichendes Streckgrenzenverhältnis kann durch ein günstiges Dehnungsverhältnis ausgeglichen werden und mit zunehmenden Verhältnisunterschied wird der Fugendruck des Preßsitzes steigen.

Am IMW wird für die Untersuchungen u.a. die Werkstoffpaarung St 52-3 (Rohr) und 42 CrMoS 4 (Nabe) verwendet. Der St 52-3 zeichnet sich durch

eine niedrige, aber ausgeprägte Streckgrenze aus. Der als Nabenwerkstoff eingesetzte Vergütungsstahl hat eine verhältnismäßig hohe Streckgrenze, so daß ein hohes Streckgrenzenverhältnis $R_{e, Nabe}/R_{e, Welle} \approx 2,5$ zustande kommt. Das E-Modul-Verhältnis beträgt $E_{Nabe}/E_{Welle} \approx 1$ (vgl. Bild 2). Somit sind günstige Voraussetzungen für einen festen Preßsitz gegeben.

Andere Werkstoffkombinationen, wie z.B. zur Herstellung innenhochdruckgefühter Nockenwellen /3/, zeigen ähnliche Streckgrenzen- und elastische Dehnungsverhältnisse. Verwendet man unterschiedliche Werkstoffe, also Stahl als Nabenwerkstoff und ein längsnahtgeschweißtes Aluminiumrohr, so werden die günstigen Streckgrenzenverhältnisse durch die eher schlechten E-Modul-Verhältnisse kompensiert und es stellt sich nur ein geringer Fugendruck ein.

4 Charakteristische Merkmale innenhochdruckgefühter Preßverbindungen

Allein aus dem Verfahren des Innenhochdruckfügens heraus resultieren verschiedene Besonderheiten, die einen entscheidenden Einfluß auf die Produktgüte und Zuverlässigkeit, aber auch auf die Akzeptanz und die Verbreitung dieser Verbindungstechnik ausüben.

Wie alle Maschinenelemente bewegen sich auch IHF-Verbindungen im Spannungsfeld der Fachdisziplinen:

- Konstruktionstechnik/Maschinenelemente
- Fertigungstechnik/Fügetechnik
- Werkstofftechnik/Tribologie

Auf einige Besonderheiten wird dennoch kurz eingegangen.

4.1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente

Zur sicheren Befestigung der Nabe auf der Welle sind entsprechend verformungsfähige Bauteilzonen während der Aufweitung unumgänglich, vgl. Kap. 2. Die Gestaltung der Nabe erfordert daher die Existenz dünnwandiger Bereiche, die im Betrieb für die Kraft- bzw. Drehmomentübertragung verantwortlich sind. Bedingt durch die Steifigkeit dickwandiger Naben (**Bild 5**) sind die sich in der Verbindungszone einstellenden Normalkräfte infolge der erschwerten Bauteilaufweitung nur ungenügend ausgeprägt. Etablieren wird sich somit die Ausführung der Nabe mit dünnwandigen Absätzen entspre-

chend **Bild 6** bzw. generell dünnwandigen Außenbauteilen, die die zum Aufbau des Preßsitzes notwendige Verformung erlauben. Das Konstruktionsprinzip der abgestimmten Bauteilverformung /8, 9/ wird durch diesen Aspekt entscheidend erweitert und gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die Gesamtgestaltung folgt konsequent dem Leichtbaugedanken. Ein weiteres Kennzeichen von IHF-Verbindungen ist die Dimensionierung unter teilplastischer Materialverformung. Derartige Methoden sind am IMW bereits erfolgreich an geschwächten Preßverbindungen und Zahnwellen-Verbindungen erprobt worden /10-13/.

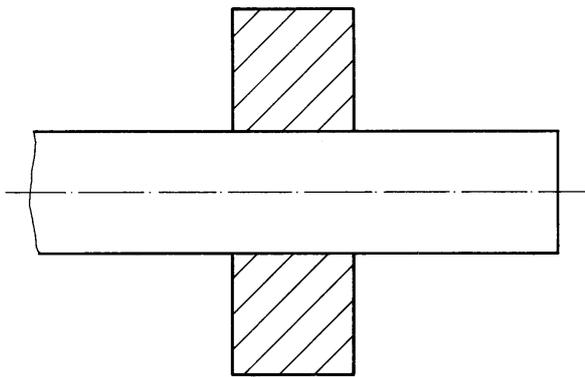


Bild 5: Welle mit dickwandiger Nabe

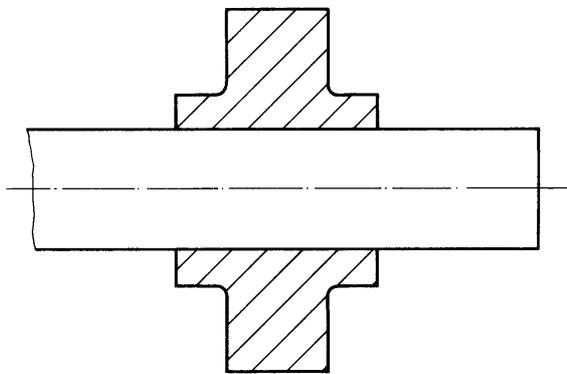


Bild 6: Welle mit abgesetzter Nabe (Verbindungs-ränder sind verformungsfähig)

4.2 Fertigungstechnik/Fügetechnik

Das zum Fügen verwendete Werkzeug (Sonde) muß so gestaltet sein, daß eine lokale Aufweitung der Bauteile und eine sichere Abdichtung des Kompressionsraumes gewährleistet ist. Die Platzanforderungen an die Fügeanlage und das Hydraulikaggregat (Druckerzeugungseinheit, Steuertechnik etc.) sind im Vergleich zu den massiv bauenden hydraulischen Pressen in der Karosserieteilfertigung äußerst gering, da zum Fügen lediglich ein lokal hohes Druckniveau, aber nahezu kein Volu-

menstrom benötigt wird. Weiterhin ist für die meisten derzeitigen Anwendungen das Rohr als standardisiertes Ausgangsprodukt erhältlich, wodurch sich ein erheblicher Kostenvorteil ergibt. Fertigungsmeßtechnische Arbeiten werden parallel zum Fügeprozeß durchgeführt, indem Meßtaster auf der Nabenoberfläche die vom anliegenden Druck des Hydraulikmediums abhängige Bauteilauflagerung registrieren.

Generell sind zwei Verfahrensstrategien realisierbar:

- Druckgesteuertes Fügen: Aufbau des Preßsitzes über einen definierten Hydraulikdruck
- Weggesteuertes Fügen: Aufbau des Preßsitzes über eine definierte Nabenaufweitung

Ein wesentlicher Vorteil des Innenhochdruckfügens ist bereits durch die Verfahrensvoraussetzungen gegeben. Aufgrund des notwendigen Fügespiels ist diese Verbindungstechnik unempfindlicher gegenüber Bauteiltoleranzen als konventionelle Längs- oder Querpreßverbindungen.

Dem fertigungstechnischen Know-How kommt nach dem derzeitigen Stand der Technik die eigentliche Schlüsselfunktion zu.

4.3 Werkstofftechnik/Tribologie

Als Tribologie bezeichnet man die wissenschaftliche und technische Betrachtung von der Beanspruchung der Werkstoff-Oberfläche durch Kontakt und Relativbewegung mit einem Gegenkörper. Die dynamischen, physikalischen und tribologischen Mechanismen, die bei einem tribologischen Prozeß wirken, hängen entscheidend von der tribologischen Beanspruchung ab, wie z.B. Gleiten, Strömen und Stoßen. DIN 50320 gibt hier eine nützliche Hilfestellung für die Zuordnung der tribologischen Beanspruchung zu den wirkenden Mechanismen, die einzeln oder kombiniert auftreten können.

Bei der mittels IHF gefertigten Welle-Nabe-Verbindung tritt an den Randbereichen als tribologische Beanspruchungsart lokales Gleiten auf, die Adhäsion und tribochemische Reaktion verursachen. Bei der Adhäsion treten aufgrund der kleinen Berührflächen (Mikrokontakflächen) an den Rauigkeitsspitzen beträchtliche Spannungen auf, so daß die Rauigkeitsspitzen weitestgehend plastisch verformt werden. Dies bewirkt Kaltverfestigung und mit den zusätzlich auftretenden tangentialen Relativbewegungen örtliches Verschweißen, die sich dann in der Folge als Teilchen abtrennen oder zur

Erhöhung des übertragbaren Drehmomentes beitragen (vgl. Tab. 1). Eine weitere Verschleißerscheinungsform ist die tribochemische Reaktion, die auftritt, wenn Grund-, Gegenkörper und das angrenzende Medium (Öle, Fette, Pulver) chemische Reaktionen miteinander eingehen.

In /17/ werden neuartige Pressverbindungen mit verschiedenartig beschichteten Preßflächen vorgestellt, die abgeleitet aus der gesamten tribologischen Problematik und unter Beachtung der Einsatzfälle entwickelt wurden. Die Erhöhung der Übertragungsfähigkeit wurde durch geeignete verbundstabile Konversionsschichten (Phosphatschichten) erreicht. Diese Beschichtungen bewirken eine höhere Haftreibungszahl und verhindern Tribokorrosion bei örtlichen Gleiten. Die von /17/ getesteten metallischen Schichten mit hoher Adhäsionsneigung nutzen das örtliche Gleiten aus, um lokale stoffschlüssige Verbindungen ähnlich der Kaltpresslöt- bzw. Kaltpressschweißverbindungen zu erzeugen. Als Ergebnis stellt sich eine höhere Übertragungsfähigkeit ein.

Wendet man diese Erkenntnisse auf das Innenhochdruckgefügen an, so ist eine weitere Erhöhung der Drehmomentenübertragungsfähigkeit zu erwarten.

5 Untersuchungsergebnisse

5.1 Zylindrische Verbindungen

Erste systematische Untersuchungen an innenhochdruckgefügenen Preßverbindungen werden z.Z. am Institut für Maschinenwesen durchgeführt. **Bild 7** zeigt ein für die Finite-Elemente-Untersuchungen verwendetes Modell, die sich bei maximalem Fügedruck und nach Druckrücknahme einstellenden Aufweitungen des Nabenaußendurchmessers entlang der Preßfuge sind in **Bild 8** zu sehen.

Ein weiterer Bestandteil der Untersuchungen ist das Verhalten von IHF-Verbindungen unter reiner Drehmomentbelastung. Dazu werden die Prüfverbindungen (Rohr: St 52-3, Nabe 42 CrMoS 4, Bauteile trocken gefügt) auf einem Prüfstand unter quasistatischer Torsion bis zum völligen Durchrutschen belastet. Aus den aufgezeichneten Verdrehwinkel- und Drehmomentwerten ist die Ermittlung der charakteristischen Größen Lösemoment T_l und Rutschmoment T_r möglich. **Bild 9** zeigt exemplarisch diesen Zusammenhang für einen dünnwandigen Prüfling entsprechend Bild A ($T_l=100\%$, $T_r\approx 75\%$).

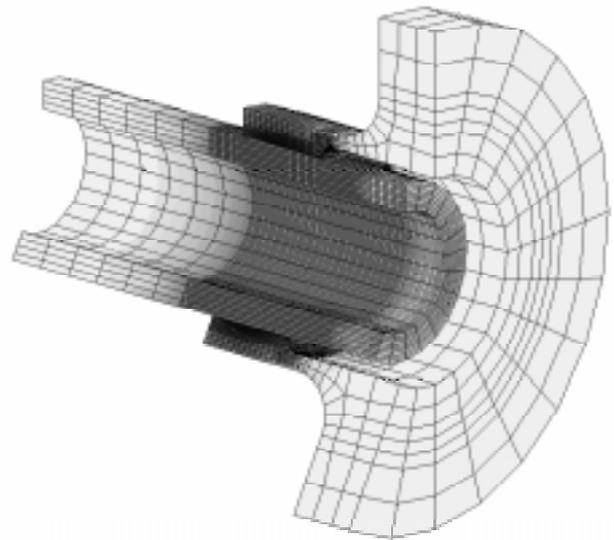


Bild 7: FEM-Modell der Verbindung im gefügten Zustand (Schnitt)

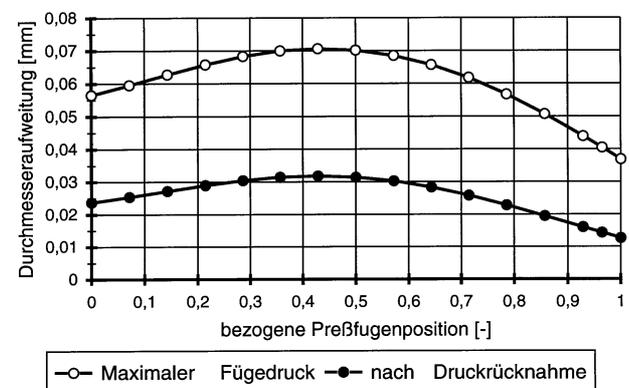


Bild 8: Aufweitung des Nabenaußendurchmessers entlang der Preßfuge (FEM-Berechnung, max. Fügedruck ≈ 3000 bar)

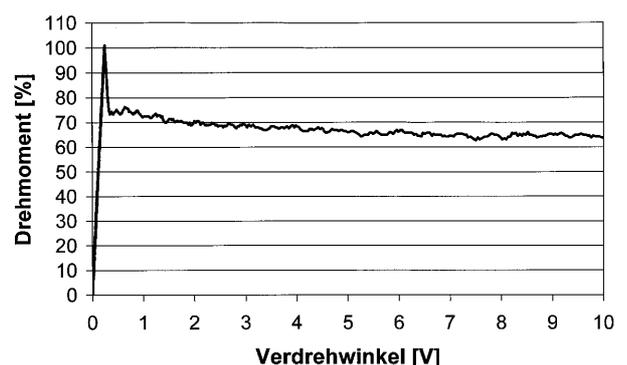


Bild 9: Verdrehwinkel-Drehmoment-Kurve einer innenhochdruckgefügenen Preßverbindung bei quasistatischer Torsionsbelastung vor dem Schwingversuch

Anschließend wird der jeweilige Prüfling einem dynamischen Wechseltorsionsversuch mit einer Amplitude von 80 % des Lösemomentes über 10 Mio. Lastwechsel unterzogen /14/. Unter der Annahme, daß diese Belastungsamplitude ausreichend groß

genug ist, um Relativverschiebungen zwischen Welle und Nabe an den Verbindungsrändern zu verursachen (örtliches Gleiten von Welle und Nabe, auch Wechselschlupf, vgl. z.B. /6, 7/), müßten die in diesen Zonen ablaufenden Triboreaktionen bei der vorliegenden Verbindungskombination zu einer Erhöhung der Drehmomentübertragungsfähigkeit führen. Daher wird zu dessen Überprüfung nach dem Schwingversuch ein wiederholter quasistatischer Torsionsversuch durchgeführt. Bei den bisher geprüften Verbindungen konnte die o.g. Annahme bestätigt werden, **Tab.1** zeigt für zwei Verbindungen die Erhöhung der Drehmomentübertragungsfähigkeit infolge örtlichen Gleitens zwischen Welle und Nabe an den Verbindungsrändern.

Prüfverbindung	Lösemoment T_1 vor dem dyn. Versuch [%]	Lösemoment T_1 nach dem dyn. Versuch [%]
1.1	100	122
1.2	100	135

Tab.1: Erhöhung der Drehmomentübertragungsfähigkeit infolge dynamischer Torsionsbelastung

5.2 Anwendungsbeispiel Riemenrad

Entsprechend den in Kap. 4.1 genannten Gestaltungsmöglichkeiten wurde als ein mögliches Anwendungsbeispiel die Verbindung eines Riemenrades auf einer Hohlwelle bezüglich des theoretisch übertragbaren Drehmomentes mit der Finiten-Elemente-Methode simuliert, **Bild 10**. Die Wahl der Geometrieparameter orientierte sich dabei an entsprechenden Literaturdarstellungen. Der Wellenwerkstoff verfügt über eine ausgeprägte Streckgrenze von 400 N/mm^2 , der maximale Fügedruck wurde auf 4000 bar begrenzt.

Die sich bei maximalen Druck und nach dem Fügen einstellende Kraftverteilung in der Verbindungszone zeigt **Bild 11**. Deutlich ist zu erkennen, dass die Fugenränder das für konventionelle Querpressverbindungen typische Kantentragen nicht aufweisen, die Kerbwirkung wird dadurch herabgesetzt. Die in diesem Bereich reduzierte Anpreßwirkung begünstigt Relativbewegungen zwischen beiden Bauteilen bei Torsion, die zu einer Erhöhung der Drehmomentbelastbarkeit führen kann, vgl. Tab.1. Aufgrund der erhöhten Radkörpersteifigkeit im Bereich des Steges wird die Aufweitung lokal erschwert, wodurch

es nach Druckrücknahme zu einem verringerten Normkraftniveau an dieser Verbindungsstelle kommt.

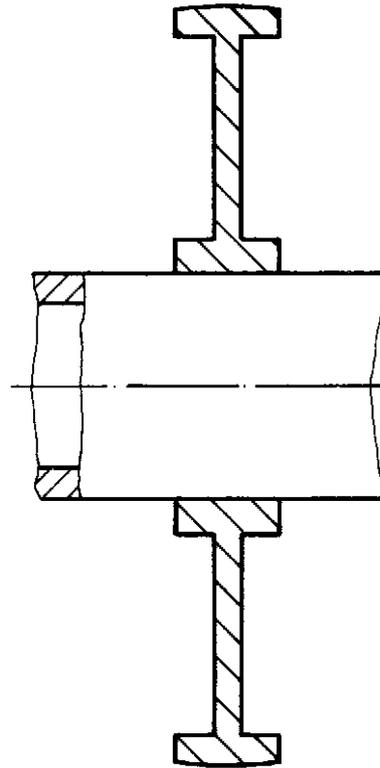


Bild 10: Anwendungsbeispiel Riemenrad (Preßfugendurchmesser 30 mm; Raddurchmesser 100 mm; Verbindungsbreite 14 mm /16/)

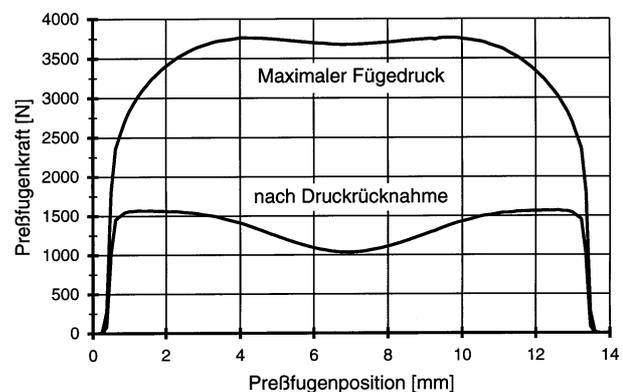


Bild 11: Kraftverteilung im Verbindungsbereich

Das Produkt aus dem Integral der Fugennormalkraft nach Druckrücknahme, dem Reibkoeffizienten und dem Preßfugenradius stellt das theoretisch übertragbare Drehmoment der Riemenradkonstruktion dar, **Bild 12**. Dieser Wert kann zunächst nur als Orientierungsgröße betrachtet werden, da u.a. die Frage der dynamische Beanspruchbarkeit der Verbindung mit FEM-Berechnungen bis heute nicht befriedigend beantwortet werden kann. Der Einfluß der Querkraft aus den Trumbelastungen wurde zudem nicht berücksichtigt.

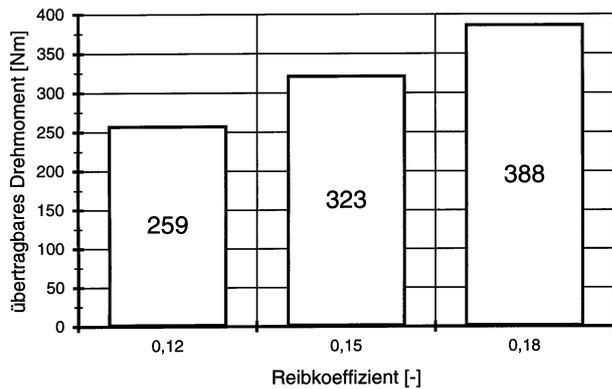


Bild 12: Theoretisch übertragbares Drehmoment in Abhängigkeit vom Reibkoeffizienten für das Anwendungsbeispiel Riemenrad

6 Ausblick und Tendenzen

Die Herausforderungen, die durch diese junge Fügetechnik gestellt werden, bestehen u.a. in der Erarbeiten von Dimensionierungsgrundlagen, die eine Auslegung gebauter Strukturen und Elemente unter technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten gestatten. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung zur generellen Akzeptanz und Verbreitung des Innenhochdruckfügens als ernstzunehmende und bewährte Alternative gegenüber anderen Verbindungstechniken (z.B. Schrumpfen, Kleben). Das IMW als eine führende Forschungsstätte auf dem Gebiet der Maschinenelemente führt seit einiger Zeit Untersuchungen zur Tragfähigkeit von IHF-Preßverbindungen durch /15, 16/.

Entsprechend den unter Kap.4 genannten Merkmalen werden neue Konstruktions- und Gestaltungsprinzipien aufkommen und sich etablieren, die auf die spezifischen Besonderheiten dieser Verbindungstechnik zugeschnitten sind. Die Überlegungen zielen u.a. darauf ab, ähnlich wie im Blechbereich "Tailored shafts" mit angepassten Eigenschaften und Funktionen zu entwickeln. Z.B. könnten durch Reib- oder Laserstrahlschweißen innenhochdruckgefügte Segmente (Welle mit Ketten- oder Riemenrad) mit dem "Rest der gesamten Welle" verbunden werden. Werkstoff- und Fertigungskosten könnten möglicherweise entscheidend reduziert werden, wenn Wellenabsätze statt "Drehen aus dem Vollen" durch Innenhochdruckfügen von Hülsen auf der Welle hergestellt werden würden.

Die Lehrinhalte der Hochschulen sollten dahingehend erweitert werden, daß teilplastische Dimensionierungsmethoden den Ingenieurstudenten spätestens im Hauptstudium vermittelt werden. Das Potenzial der lokalen Auslegung über die Streck-

grenze hinaus ist z.T. als sehr hoch einzustufen /10-13/.

7 Literatur

- /1/ Thiemann, W.; Finkbeiner, H.; Brüggemann, H.: Der neue Common-Rail-Dieselmotor mit Direkteinspritzung für den Smart (Teil 1). Motortechnische Zeitschrift MTZ 60 (1999), Heft 11
- /2/ Aschoff, G.; Ebel, B.; Eissing, S.; Metzner, F.T.: Der neue V6-Viertventilmotor von Volkswagen. Motortechnische Zeitschrift MTZ 60 (1999), Heft 11
- /3/ Brandes, K.: Kraftschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen mit hoher Tragfähigkeit durch Innenhochdruckumformen. VDI Berichte 1384, VDI Verlag, 1998
- /4/ Merkel, M.; Thomas, K.-H.: Taschenbuch der Werkstoffe. Fachbuchverlag Leipzig, 1994
- /5/ Issler, L.; Ruoff, H.; Häfele, P.: Festigkeitslehre – Grundlagen. Springer Verlag, 1995
- /6/ Gropp, H.: Die Übertragungsfähigkeit von Längs- und Querpreßverbindungen bei dynamischer Drehmomentbelastung unter örtlichem Gleiten. Technische Mechanik 4 (1983), Heft 1
- /7/ Leidich, E.: Mikroschlupf und Dauerfestigkeit bei Preßverbänden. Antriebstechnik 27 (1988), Heft 3
- /8/ Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre. Springer Verlag, 4. Auflage, 1997
- /9/ Dietz, P.: Vorlesung Konstruktionslehre II. Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal, 1993
- /10/ Tan, L.: Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit der geschwächten Welle-Nabe-Preßverbindungen im elastischen und teilplastischen Bereich. Dissertation, TU Clausthal 1993
- /11/ Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentenbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung. Dissertation, TU Clausthal 1996
- /12/ Dietz, P.; Schäfer, G.; Garzke, M.: Elastisch-plastische Auslegung von Maschinenelementen. 2. Workshop Konstruktionstechnik, Institut für Konstruktionstechnik der Universität Rostock 1998

- /13/ Dietz, P.: Tragfähigkeitssteigerungen von Maschinenelementen durch teilplastische Verformungen. Konstruktion 51 (1999), Heft 10
- /14/ Garzke, M.; Henschel, J.; Schäfer, G.: Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 1). Institutsmitteilung Nr. 23, IMW 1998
- /15/ Müller, F.: FEM-Simulation des Fügevorganges kraftschlüssiger Welle-Nabe-Verbindungen durch Innenhochdruckumformung. Unveröffentlichte Studienarbeit, IMW der TU Clausthal 1998
- /16/ Martinez, A.; Garzke, M.: Investigations due to torque transmission of internal high pressure assembled press fits. COPES-Abschlußbericht. IMW der TU Clausthal 1999
- /17/ Gropp, H.: Neuartige Pressverbindungen für höchste Belastungen. Antriebstechnik 38 (1999), Heft 7

Gedanken zur Toleranzfestlegung für Zahnwellen-Verbindungen

Li, Z.; Schäfer, G.

Für Zahnwellen-Verbindungen existieren weltweit unterschiedlichste Normen, die alle unterschiedliche Meßverfahren beinhalten. Da verschiedene Meßmethoden zulässig sind und gleichrangig behandelt werden, ist keine einheitliche Beurteilung von Paarbarkeit und Qualität einer Zahnwellen-Verbindung gewährleistet.

World wide there are many different standards for the measurement of involute spline connections. Since each of these standards is approved and allowed to use, it is difficult to guarantee a general evaluation of fitting conditions and product quality.

1 Stand der Technik

Zahnwellen-Verbindungen sind lösbare Verbindungselemente für die Übertragung von Drehmomenten. Eine Zahnwellen-Verbindung besteht aus einer Innenverzahnung und einer in sie gefügten Außenverzahnung. Das Drehmoment wird über die Zahnflanken der Zähne übertragen. Diese Zahnflanken sind überwiegend als Evolventen ausgebildet.

Als Hauptforderungen an die Zahnwellen-Verbindung ergeben sich dabei die sichere Übertragung des Drehmoments und die Gewährleistung eines u. U. funktional erforderlichen Spiels. Daraus resultieren die folgenden grundsätzlichen Problemstellungen bei der Auslegung bzw. Tolerierung von Zahnwellen-Verbindungen:

die Paarbarkeit (Fügen mit definierter Kraft) der Verbindung von Außen- und Innenverzahnung (im Sinne des Austauschbaus) unter Gewährleistung eines bestimmten Spiels und

die Qualität der Verbindung im Betrieb (im Sinne einer möglichst gleichmäßigen Verteilung der äußeren Belastungen auf die Zahnflanken der Verbindung)

Zu diesem Zweck werden für die Paarung von Außen- und Innenverzahnung Abmaße vom spielfreien Zustand festgelegt, um das erforderliche Flankenspiel zu gewährleisten. Toleriert wird dabei die Zahndicke der Außenverzahnung bzw. die Lückenweite der Innenverzahnung. Das mindestens erforderliche Ab-

maß hängt dabei von dem mindestens erforderlichen Flankenspiel und den spielvermindernden Einflüssen der Verzahnungsabweichungen ab. Das maximal zulässige Abmaß wird bestimmt durch das maximal zulässige Flankenspiel sowie die erreichbaren Fertigungstoleranzen beim Verzahn.

Wird eine Außenverzahnung mit einer Innenverzahnung gepaart, so ergibt sich ein Passungssitz ähnlich dem einer Rundpassung von Welle und Bohrung nach ISO 286, jedoch mit wesentlich komplizierterer Geometrie. Wird die Passung von Welle und Bohrung ausschließlich durch die Durchmesser gebildet, so wird sie bei flankenzentrierten Zahnwellen Verbindung durch die am Teilkreisdurchmesser angeordneten Zähne und Zahnlücken mit ihren Zahnflanken gebildet. Wie bei den Rundpassungen, bei denen keine ideal runde bzw. zylindrische Bohrung und Welle miteinander gepaart werden, treten auch bei Zahnwellen-Verbindungen Abweichungen von der Ideal- bzw. Sollgeometrie auf. Diese Abweichungen resultieren aus Unzulänglichkeiten bei der Herstellung der Verzahnungen, **Bild 1**.



Bild 1: Ursachen für Verzahnungsabweichungen

Gegenüber den einfacher zu beschreibenden Rundpassungen ist bei der Passung von Zahnwellen-Verbindungen der Einfluß der Verzahnungsabweichungen auf die Paarungseigenschaften wesentlich größer als der Einfluß des Istmaßes.

Die Prüfung bzw. Passungskontrolle von Zahnwellen-Verbindungen muß daher streng nach dem Taylor'schen Grundsatz erfolgen [WiSe_65]. Das heißt, daß die Ausschußseite als Istmaß (auch als Maß actual bezeichnet) aller voneinander Unabhängigen Be-

stimmungsstücke (Zahndicke bzw. Zahnücke im Teilkreisbogen) und die Gutseite als Paarungsmaß (auch als Maß effective bezeichnet) zu prüfen ist. Das Paarungsmaß ist dabei die Zahndicke bzw. Zahnücke einer formidealen Gegenverzahnung, mit der die zu prüfende Verzahnung gerade noch zu paaren ist. Für diese formideale Gegenverzahnung wird der Begriff, Hüllverzahnung verwendet. In **Bild 2** sind diese Zusammenhänge am Beispiel eines einzelnen Zahns einer Außenverzahnung dargestellt.

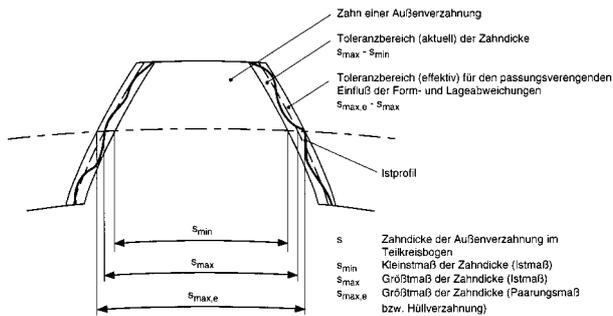


Bild 2: Toleranzproblematik an Zahnwellen

Zur Problematik der Toleranzsysteme bei Zahnwellen-Verbindungen ist eine Vorbemerkung im Hinblick auf die weiteren Ausführungen notwendig: Während bei Laufverzahnung die Toleranzen (z.B. nach DIN 3961) sich aus funktionellen Überlegungen entwickelt haben, die im wesentlichen aus dem Eingriff zweier Zahnflanken - u.U. unter Berücksichtigung von Einzel- und Doppelingriffsphase - abgeleitet sind, bestimmt bei den Steckverzahnungen immer die Wirkung aller Abweichungen an allen Flanken und deren Kombination bei entsprechender Paarung von Welle und Nabe die funktionelle Qualität der Verbindung, z.B. die Exzentrizität, die Lastaufteilung auf die einzelnen Zahnpaare, die Steifigkeit der Verbindung und das Verschleißverhalten. Hier sind die typischen Probleme des Mehrfacheingriffs durchschlagend, wie sie auch bei der Normung von Gewindegeometrien und ähnlichen Systemen zu finden sind. Die Kriterien für den Aufbau eines Passungs- und Toleranzsystems für Steckverzahnungen sind damit grundsätzlich unterschiedlich von denen der Laufverzahnungen, was bei der Erstellung der einschlägigen Normen für Zahnwellen-Verbindungen (z.B. DIN 5480/14) sicherlich in dieser Konsequenz nicht bedacht wurde.

Zahnwellen-Verbindungen besitzen wie Zahnräder (DIN 3960) Einzelabweichungen der Evolventenform an den Zahnflanken (Profilabweichungen), Abweichungen der Zahnrichtung über die Verzahnungslänge (Flankenlinienabweichungen), Teilungsabweichungen in der gleichmäßigen Verteilung der Zähne

am Umfang und Abweichungen des Rundlaufes, der Rundheit und der Parallelität. Diese Abweichungen beeinflussen in unterschiedlicher Art und Weise die Meßergebnisse der einzelnen Prüfmethode.

Anzeigende Meßmethoden haben Anlagepunkte oder Anlageflächen am Prüflingsprofil, die sich bei verschiedenen Meßmethoden in der Art und im Ort unterscheiden, **Bild 3**. Für die Lageabweichung fehlen in allen Normen Angaben zur maßtechnischen Handhabung. Die Überprüfung erfolgt in der Praxis i.d.R. völlig willkürlich mit einem gerade vorhandenen Prüfmittel.

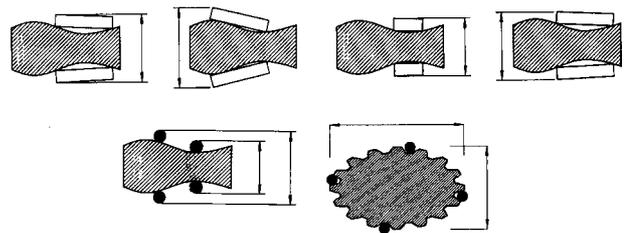


Bild 3: Probleme durch die Meßelemente

Damit sind unterschiedliche Meßergebnisse nicht ungewöhnlich, führen jedoch in der Praxis zu Unstimmigkeiten insbesondere in Kunden-Lieferanten-Beziehungen. Da alle Meßmethoden zulässig sind und gleichrangig behandelt werden, bestehen keine einheitlichen Grundsätze für die Beurteilung der Qualität einer Zahnwellenverzahnung, und aufgrund der oben geschilderten Kriterien bezüglich der Paarungseigenschaften noch weniger Informationen zur funktionellen Qualität einer Zahnwellen-Verbindung. Damit fehlen ebenfalls die Grundlagen für eine entsprechende Qualitätssicherung in der Fertigung. Zudem wird dadurch auch der Nachweis der Qualitätsfähigkeit entsprechend der internationalen Normenreihe ISO 9000 ff. erschwert.

Für eine idealgeometrische Verzahnung würden theoretisch alle Meßmethoden das gleiche Ergebnis für das Istmaß liefern. Je größer die Verzahnungsabweichungen werden, desto stärker differieren die Prüfergebnisse der einzelnen Methoden voneinander. Eine ideale Prüfung des Istmaßes der Zahndicke bzw. Lückenweite liegt vor, wenn die Verzahnungsabweichungen keinen Einfluß auf das Meßergebnis haben. Dies ist jedoch in der Praxis nicht zu erreichen. Am nächsten kommt dieser Forderung die Prüfung mittels Kugeln. Um Unsicherheiten durch die Positionsabhängigkeit der Messungen zu verringern, müssen möglichst viele Meßergebnisse pro Verzahnung gewonnen und statistisch (Mittelwert, Streuung, Klein- und Größtwert) ausgewertet werden. Daraus

ergibt sich jedoch ein weiteres Problem: Werden sehr viele Meßwerte aufgenommen, wächst die Wahrscheinlichkeit, daß ein Meßpunkt gefunden wird, der außerhalb der Toleranz liegt.

2 Die Arbeiten des Instituts zu diesen Problemstellungen

Das Institut für Maschinenwesen IMW beschäftigt sich seit langem mit theoretischen und praktischen Untersuchungen zum Betriebsverhalten von Zahnwellen-Verbindungen. Insbesondere wurde dabei der Einfluß äußerer Belastungen wie Drehmoment, Querkraft und Biegung in unterschiedlichen Arten und Kombinationen auf die resultierenden Beanspruchungen in der Zahnwellen-Verbindung untersucht und entsprechende Ansätze für die Auslegung bzw. den Festigkeitsnachweis für derartige Verbindungen erarbeitet [Weso_96]. Zudem wurden die Einflüsse unterschiedlicher Parameter wie Belastungsart, Schmierung, Relativbewegung, Werkstoffpaarung oder Oberflächenbeschaffenheit auf das Verschleißverhalten von Zahnwellen-Verbindungen untersucht [Schä_95].

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 1 gemachten Feststellungen sind theoretische Untersuchungen zum Einfluß von Verzahnungsabweichungen auf das Passungs- und Laufverhalten von Zahnwellen-Verbindungen durchgeführt worden, **Bild 4** [DiKu_95]. Dabei sind folgende Fragestellung bearbeitet worden:

Welche Verzahnungsabweichungen treten speziell an Zahnwellen-Verbindungen auf bzw. können gemessen werden?

Welche Abweichungen haben Einfluß auf die Funktion einer Zahnwellen-Verbindung?

Welchen Einfluß haben Verzahnungsabweichungen auf die Meßergebnisse einzelner Prüfmethode für Zahnwellen-Verbindungen?

Prinzipiell treten alle an Laufverzahnungen definierten Abweichungen auch an evolventischen Zahnwellen-Verbindungen auf bzw. sind meßbar. Da diese Abweichungen jedoch historisch aus den spezifischen Anforderungen an die Laufverzahnung erwachsen sind, müssen aus funktionaler Sicht für die Zahnwellen-Verbindung Einschränkungen getroffen werden.

Mit Hilfe der FE-Methode sind Untersuchungen zum Einfluß von Teilungsabweichungen auf die Lastverteilung über dem Verbindungsumfang durchgeführt worden, **Bild 5**, bei denen Einflußparameter wie Querkraft, Drehmoment, Drehflankenspiel und Teilungs-Gesamtabweichung berücksichtigt wurden. Bei besser werdender Qualität bzw. sich reduzierender Teilungs-Gesamtabweichung zeigt sich eine deutliche Vergleichmäßigung der Lastverteilung. Bei gleicher Belastungssituation ergibt sich eine Entlastung der höchstbeanspruchten Zahnflanke um etwa 50% je bessere Qualitätsstufe sowie eine Zunahme der Anzahl der tragenden Zähne.

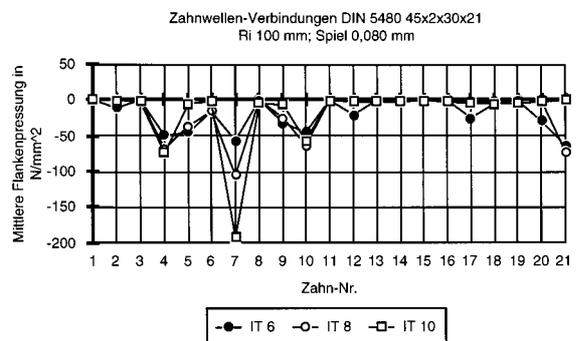


Bild 5: Lastverteilung über dem Umfang

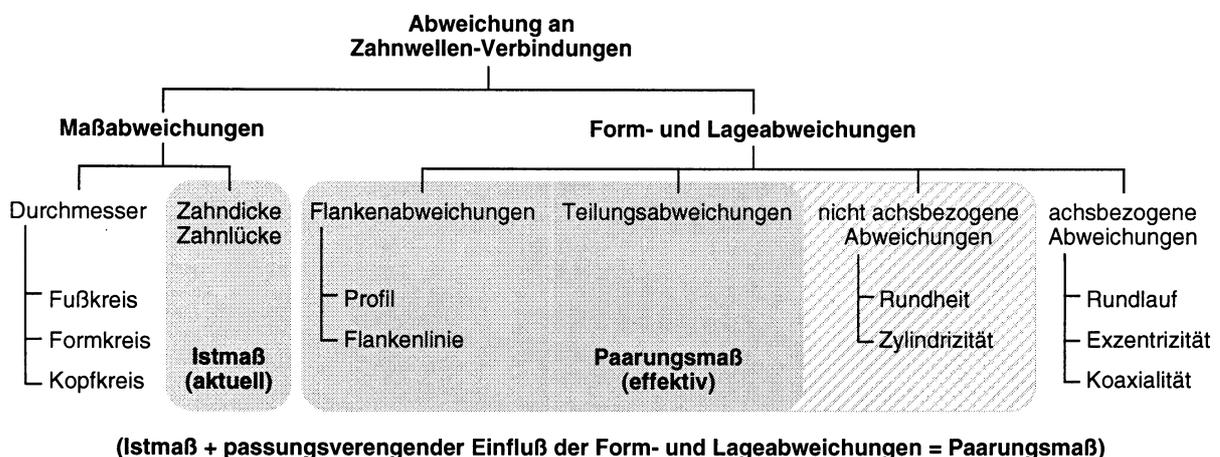


Bild 4: Abweichungen an Zahnwellen-Verbindungen

Bei einer Flankenlinien-Winkelabweichung, die kleiner als das Flankenspiel im Stirnschnitt ist, berührt die Wellenflanke die Nabenflanke bei lastfreier Verdrehung bis zum Kontakt lediglich auf einem kleinen Abschnitt an einem Verbindungsrand. Wird ein Drehmoment auf die Verbindung aufgebracht, findet die Kraftübertragung auf einer von der Last und den elastischen Eigenschaften der Verbindung abhängigen Fläche statt, deren Begrenzung auf einer Seite durch die Kontaktlinie bei lastfreier Verdrehung direkt am Verbindungsrand gegeben wird.

Weisen die Zahnflanken einer unbelasteten Welle eine Flankenlinien-Winkelabweichung auf, so wird die Pressungsverteilung unter Drehmomentbelastung neben der Belastungshöhe und der Größe der Abweichung entscheidend durch die Richtung der Abweichung beeinflusst. Stimmt z. B. die Richtung der Flankenlinien-Winkelabweichung der Wellenzähne, ausgehend vom freien Wellenende, mit der Drehmomentrichtung bei abweichungsfreier Nabe überein, kann die Abweichung den Maximalwert der Flankenpressung gegenüber einer abweichungsfreien Verbindung reduzieren. Zeigt die Flankenlinien-Winkelabweichung in die entgegengesetzte Richtung, fallen der hochbeanspruchte Bereich der drehmomentbelasteten Verbindung und der Kontaktbereich bei lastfreier Verdrehung durch die Abweichung zusammen. Die Folge ist eine deutliche Zunahme der maximalen Flankenpressung, **Bild 6**.

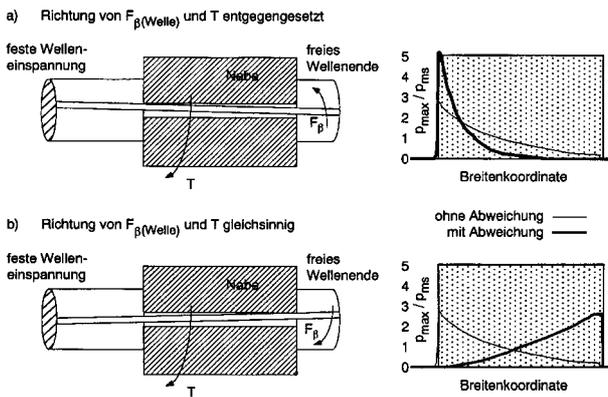


Bild 6: Flankenlinien-Winkelabweichungen

Desweiteren wurden theoretische Voruntersuchungen zum Zentrierverhalten von Zahnwellen-Verbindungen unter Berücksichtigung von Teilungsabweichungen durchgeführt. Dazu wurden 2-D-Simulationswerkzeuge für eine abweichungsbehaftete Verzahnungsgeometrie entwickelt und mittels FEM die Zentrierung bzw. die sich einstellenden Exzentrizitäten zwischen den Verzahnungsmittelpunkten berechnet.

Die Geometrie der Evolventenverzahnung wird darüber hinaus mit verschiedenen Modellierungsmethoden (FEM, CAD, Rechenverfahren nach [Diet_78]) dreidimensional abgebildet. Nach der Abbildung der idealgeometrischen Verzahnung (ohne Abweichungen) wurden Rechenalgorithmen zur Simulation abweichungsbehafteter Verzahnungen entwickelt. Dazu wurden bekannte statistische Zusammenhänge (Bildungsgesetze aus vorhandenen Normen) und neue Erkenntnisse aus den praktischen Messungen genutzt. Somit ist eine systematische Untersuchungen von Maß-, Form- und Lageabweichungen und der daraus resultierenden effektiven Hüllverzahnung (Paarungsmaß) möglich.

Zur Gewährleistung einer systematischen Vorgehensweise wurden zu Beginn der Fügbarkeitsrechnungen nur ebene Abweichungen simuliert (Teilung u. Profil), erst in weiterfolgenden Rechnungen werden räumliche Abweichungen (Flankenrichtung) generiert und entsprechend untersucht.

In **Bild 7** sind die Fügbarkeiten in Abhängigkeit der jeweiligen Naben- und Wellen-Toleranzreihe dargestellt. Die fügbareren Verbindungen sind mit 0, die unfügbareren mit X und die bedingtfügbareren Verbindungen mit n bezeichnet. n ist dabei die Anzahl der unfügbareren Einbaustellungen [Li_98].

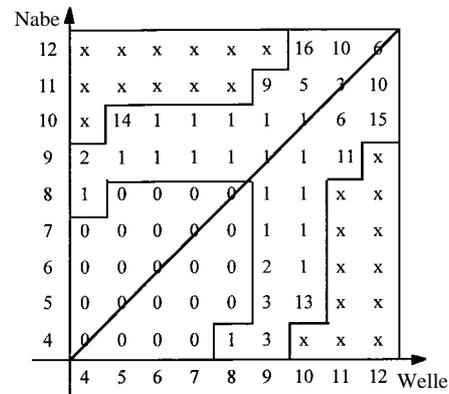


Bild 7: Fügbarkeit von Zahnwellen-Verbindungen DIN 5480-45x2x21 nach IT-Klassen

5 Literatur

Diet_78 P. Dietz: Die Berechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen. Bützelborn: Selbstverlag d. Verf., 1978

DiKu_95 P. Dietz und G. Kunze: Einfluß von Verzahnungsabweichungen auf das Passungs- und Laufverhalten von Zahnwellen-Verbindungen und Zahnkupplungen. Clausthal und Dresden, Abschlußbericht Volkswagen-Stiftung I/66 120, August 1995

Li_98 Z. Li: Rechnerunterstützte Betrachtung und Analyse von Zahnwellen-Verbindungs-Toleranzsystemen. Dissertation, TU Clausthal, 1998

Schä_95 G. Schäfer: Der Einfluß von Oberflächenbehandlungen auf das Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellen-Verbindungen mit Schiebeseitz. Dissertation, TU Clausthal, 1995

Weso_96 K. Wesolowski: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und Teilplastischer Verformung. Dissertation, TU Clausthal, 1996

WiSe_65 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

Dimensionierung von Windentrommeln

Henschel, J.

Die Konstruktion und Dimensionierung von Hebezeugen repräsentiert die Auslegung sicherheitsrelevanter Maschinenelemente. In dem Beitrag werden die Berechnungs- und Gestaltungsgrundlagen eines der Kernelemente der diskontinuierlichen Fördermittel dargestellt. Die Windentrommel stellt in Standard- Hub- und Bergegeräten das zugkräftere Maschinenteil dar. Darüber hinaus wird die Trommel sowohl bei ein- als auch bei mehrlagiger Bewicklung zum Seilspeicher des Zugseiles.

The design of winding drums represents the calculation of safety valid machine elements. The following article gives an introduction in the design of lightweight winding drums.

1 Einleitung

Mit dem Ausfall des Trommelkörpers ist ein hohes Sicherheitsrisiko für Mensch und Maschine verbunden. Aufgrund der Tatsache, daß dieses Maschinenelement im Regelfall ohne Redundanz eingesetzt wird, ist eine Dimensionierung nach dem Prinzip des sicheren Bestehens (safe life) oder zumindest des begrenzten Versagens (fail safe) zwingend erforderlich. Demgegenüber steht der Zwang, immer leichtere Konstruktionen zum Einsatz zu bringen. Die durch die Gewichtsreduzierungen gesteigerten spezifischen Beanspruchungen im Bauteil erfordern für eine abgesicherte Auslegung daher die genaue Kenntnis der tatsächlich auftretenden Spannungen.

Die Forderung nach extremem Leichtbau insbesondere in mobilen Förderanlagen führt in vielen Fällen zur Ausnutzung des teilplastischen Verhaltens in Windenkonstruktionen. Diese Überschreitung der „Ingenieur-Grenzwerte“ im Bauteil ist bereits heute, nachgewiesen durch eine Reihe von Messungen am realen Bauteil, in vielen Windenkonstruktionen üblich. In den meisten Fällen sind solche Entwicklungen nicht durch mechanisch korrekte Berechnungsmethoden begleitet, was in der Vergangenheit zu erheblichen Schadensfällen führte.

Die Beanspruchungen im Trommelkörper bilden sich im wesentlichen aus den Umschlingungskräften des Seiles, die durch den Seilzug entstehenden Biegemomente und Querkräfte nehmen eine untergeordnete Bedeutung ein. Die Größe und Verteilung der durch die Bewicklung entstehenden Lasten und der daraus resultierenden Beanspruchungen in der Trommel werden durch das Spannungs-Verformungsverhalten der verwendeten Seile maßgeblich beeinflusst. Die Entwicklung von Seilen der letzten 20 Jahre und deren Optimierung hin zu erheblichen spezifischen Laststeigerungen hat für die Trommel negative Auswirkungen und führt zu Belastungsanteilen, die in der Vergangenheit vernachlässigt werden konnten. So führt die Eigensteifigkeit des Seils zu örtlichen Biege- und Druckmaxima beim Auflauf auf die Trommel. Darüber hinaus wurde, ebenfalls durch Messungen am realen Bauteil bestätigt, ein starker Einfluß auf die Axiallasten, verursacht durch die Bewicklungsgeometrie, festgestellt.

Neben der Dimensionierung des Trommelkörpers stellt die Gestaltung und Berechnung der Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Trommeln einen weiteren Kernpunkt der Konstruktion dar. Insbesondere durch die Verwendung moderner Verseilungsarten und den damit einhergehenden Änderungen der Seilcharakteristika variieren die Bordscheibenlasten in Abhängigkeit vom Bewicklungszustand dramatisch. In den gültigen Berechnungsgrundlagen wird diese Tatsache nur eingeschränkt berücksichtigt.

Mit dem vorgestellten Systemansatz wird die Abhängigkeit der Trommellasten von den Seilcharakteristika dargestellt. Nur durch die Kombination eines im Verhalten beschreibbaren Seiles und einer geometrisch optimierten Windentrommel ist die Forderung nach extremem Leichtbau erreichbar. Die drei Kernpunkte der Dimensionierung stellen die Analyse der Drahtseileigenschaften, die Berechnung des Trommelkörpers als rotationssymmetrische Kreiszyinderschale und die Dimensionierung der Bordscheiben dar.

In diesen drei Kernpunkten bleibt die Beschreibung im linerarelastischen Bereich des Werkstoffverhal-

tens der Trommelwerkstoffe. Das nichtlineare Steifigkeitsverhalten der Seile wird durch ein Iterationsverfahren berücksichtigt. Hierdurch und durch die Anwendung moderner mathematischer und numerischer Verfahren ist eine gegenüber /1/ genauere Erfassung des Gesamtsystems Seil/Bewicklung/Trommel möglich.

Dem Anspruch, ein Hilfsmittel für den in der Konstruktion tätigen Ingenieur bereitzustellen, wird durch die Aufbereitung der Resultate in Form von Formelsammlungen, Tabellen und Berechnungsprogrammen genügt.

2 Stand der Technik

Bereits um 1900 /2/ greifen erste Veröffentlichungen die Probleme bei der Dimensionierung von Windentrommeln auf. Insbesondere /3/, /4/ und /5/ sowie /6/ und /7/ befassen sich eingehend mit der Berechnung von Trommelkörpern.

Mit /8/, /9/ und /10/ werden moderne Ansätze erarbeitet, welche auf der Grundlage der biegesteifen Kreiszyinderschale beruhen. Mit /1/, ergänzt durch /11/, wurden geschlossene Lösungen erarbeitet, welche bis heute Gültigkeit besitzen.

Durch /12/, /13/ und /14/ wurden Ergänzungen erarbeitet, welche für Teilbereiche detailliertere Lösungen liefern.

Das Maschinenelement Windentrommel wird im Regelfall zur Dimensionierung in die Grundkörper:

- Trommelmantel (rotationssymmetrische Schale)
- Bordscheiben (rotationssymmetrische Scheiben oder Platten)

zerlegt. Zusätzliche Trommelelemente, z.B. Bremsstrommeln oder Stützscheiben, Kupplungs- oder Zahnradanbindungen werden in mechanische Grundkörper, Schalen-, Platten-, oder Scheibenelemente zerlegt und in die Berechnungen mit einbezogen. Alle Veröffentlichungen nehmen ausschließlich rotationssymmetrische Geometrien und Belastungen auf, die Auswirkungen von radialen Stützrippen oder ortsbegrenzten geometrischen Besonderheiten, wie Seilschloß und Auflaufkeile werden nicht berücksichtigt.

Die Berechnung der Beanspruchungen erfolgt bei geschnittenem System unter Übertragung der Rand- bzw. Zwischenbedingungen. Die charakteri-

stischen Eigenschaften zur Dimensionierung des Trommelmantels werden im Regelfall aus dessen geometrischen Abmessungen abgeleitet.

Die Dimensionierung der Bordscheiben, welche ein Ablaufen des Seiles bei mehrlagiger Bewicklung verhindern sollen, erfolgt im Regelfall unter Zugrundelegung der einschlägigen Scheiben- bzw. Schalentheorie.

Die vergleichende Betrachtung der in der Literatur dokumentierten Lastannahmen zeigt, daß die Varianz der resultierenden Bauteilwandstärken bei konstanten Stranglasten groß ist. Diese Tatsache läßt den Rückschluß zu, daß die vorhandenen Berechnungs- und Lastannahmen mit vergleichsweise hohen Unsicherheiten behaftet sind.

3 Das Verhalten der Drahtseile

Der Literatur sind eine Reihe von Untersuchungen zu entnehmen, welche sich mit der analytischen und empirischen Beschreibung des Elastizitätsverhaltens von Drahtseilen auseinandersetzen. Die Basis nahezu aller Untersuchungen ist die Analyse der Geometrie sowie des Längselastizitätsverhaltens und der Querkontraktion des Drahtseiles unter Zuglast.

Für die Berechnung der durch die Bewicklung mit einem Drahtseil hervorgerufenen Beanspruchungen in einer Windentrommel ist darüber hinaus die Kenntnis des Querelastizitätsverhaltens von entscheidender Bedeutung. Wie durch die Untersuchungen von /1/ nachgewiesen, besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der Verformungsfähigkeit des Drahtseiles längs und quer zur Zugrichtung und den resultierenden Beanspruchungen im Trommelmantel.

Die praktische Bedeutung der Kenntnis des Längselastizitätsverhaltens wird in einer Reihe von Anwendungen deutlich. Beispielhaft seien die im Betrieb von Hebezeugen auftretenden Längsschwingungserscheinungen der Förderseile genannt, welche bei der Dimensionierung zu berücksichtigen sind. Die Bemessung von Drahtseilen für Seilbahnen erfordert die genaue Kenntnis der sich unter Last einstellenden resultierenden Längen, um einen gefahrlosen Betrieb zu gewährleisten.

Die meßtechnische Ermittlung des Längselastizitätsverhaltens von Drahtseilen gehört zu den vom Hersteller gelieferten Standardinformationen. Zur analytischen Beschreibung des Verhaltens in

Längsrichtung wird auf die einschlägige Literatur verwiesen.

Die Quantifizierung des Längs- und Querelastizitätsmoduls, als ein auf den Seilabschnitt bezogener Wert des Elastizitätsverhaltens von Drahtseilen, ist in bezug auf die Dimensionierung von Windentrommeln unumgänglich. Das Last- Verformungsverhalten sowohl in Längs- wie in Querrichtung bestimmt die Trommelbelastungen entscheidend. Die hierzu entwickelten Berechnungsansätze erfordern die experimentelle Ermittlung der charakteristischen Parameter.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde eine Vielzahl von unterschiedlichsten Seilmacharten meßtechnisch untersucht.

4 Beanspruchungen und Verformungen

Bild 1 zeigt die am Trommelkörper angreifenden äußeren Lasten. Die Modellbildung zur Berechnung basiert im wesentlichen auf /1/ und /11/ und führt zur Berechnung der Windentrommel als biegesteife Kreiszylinderschale. Die Darstellung der Grundzüge der Abstraktion auf eine biegesteife Kreiszylinderschale dient der Verdeutlichung der zur Berechnung notwendigen Vereinfachungen. Es wird somit möglich, die hierdurch implizierten Schwachpunkte der bisherigen Berechnungsmodelle aufzuzeigen und zu diskutieren.

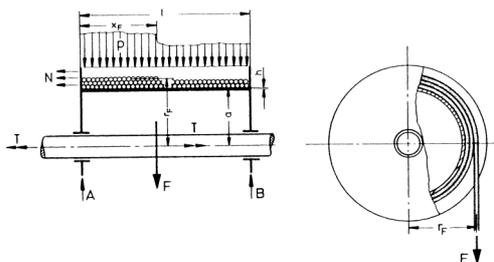


Bild 1: Beanspruchungen an einer Windentrommel /1/

5 Modellbildung und Berechnungsansatz

Im folgenden wird die Umsetzung der theoretischen Grundlagen in ein Dimensionierungswerkzeug für Windentrommeln zusammenfassend dargestellt. Die Berücksichtigung der Einschränkungen der Abstrahierung und die Gewichtung dieser im Hinblick auf die Ergebnsgüte, werden bei der Beschreibung der Ansätze aufgegriffen.

5.1 Die biegesteife Kreiszylinderschale

Unter Bezug auf **Bild 1** gilt für die äußeren Lastkomponenten für den allgemeinen Fall:

$$p_r = f_{(x)}; \quad p_x = f_{(x)}; \quad p_{(\phi)} = 0; \quad 0 \leq x \leq l$$

Wobei im Fall der Windentrommel ein windungsweiser konstanter Trommeldruck zugrunde gelegt wird. Aufgrund der Drehsymmetrie werden die folgenden Schnittkräfte und Momente zu Null:

$$N_{x\phi} = N_{\phi x} = 0$$

$$M_{x\phi} = M_{\phi x} = 0$$

$$Q_\phi = 0$$

Es ergeben sich die in **Bild 2** gezeigten Verhältnisse am infinitesimalen Schalelement.

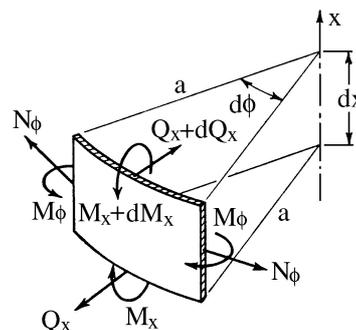


Bild 2: Schnittgrößen am Schalelement

Die resultierenden Gleichgewichtsbedingungen in radialer Richtung sowie das Momentengleichgewicht an der Mittelflächentangente ergeben sich zu:

$$N_\phi d\Phi dx + dq_x a d\Phi - p_{r(x)} d\Phi dx = 0$$

$$Q_x dx d\Phi - dM_x a d\Phi = 0$$

Durch Substitution des Momentengleichgewichts erhält man:

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} + \frac{1}{a} N_\phi = p_{r(x)}$$

Durch die Drehsymmetrie zu x wird die Verschiebungskomponente v in Richtung der Mittelflächentangente zu Null. Hieraus folgt:

$$\varepsilon_{\Phi} = \frac{w}{a} \quad \text{und für } N_x = 0 \text{ folgt } \varepsilon_{\Phi} = \frac{N_{\Phi}}{Et}$$

$$\text{bzw. } N_{\Phi} = Et \frac{w}{a}$$

Die hierbei getroffene Vereinbarung $N_x=0$ ist durch die eingangs erwähnte Trennung der Beanspruchungen in den verschiedenen Ebenen erlaubt. Die spätere Überlagerung der tangentialen und axialen Lastanteile ist durch die rein elastische Berechnung zu rechtfertigen. Des weiteren gilt unter Berücksichtigung der Krümmung κ_x mit der Biegesteifigkeit K :

$$M_x = -K\kappa_x = K \frac{d^2 w}{dx^2}$$

Interpretiert mit dem Momentengleichgewicht an der Mittelflächentangente resultiert:

$$Q_x = K \frac{d^3 w}{dx^3}$$

Die Differentialgleichung zur Berechnung der rotationsymmetrischen Kreiszylinderschale unter stückweise konstantem Druck ergibt sich zu:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{12(1-\nu^2)}{a^2 t^2} w = \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3} p_{r(x)}$$

Hierbei ist zu bemerken, daß der Druck $p_{r(x)}$ im folgenden für jede Seilwindung konstant angenommen wird. Die Berechnung der bei mehrlagiger Bewicklung entstehenden Drücke ist der Darstellung in Kapitel 5.3 zu entnehmen.

1.2 Das Grundmodell

Zur Bestimmung der Lastfunktion bei der Berechnung von Windentrommeln können folgende Annahmen getroffen werden:

Die Belastung $p_x(x)$ beeinflusst im wesentlichen die Schnittgröße N_x . Aufgrund der getroffenen geometrischen Vereinbarungen ist deren Auswirkung auf die Biegelinie der Trommel unbedeutend. Aus die-

sem Grund wird für die Berechnung der Biegeschale angenommen:

$$P_x(x) = 0$$

Eine spätere Superposition der aus den Belastungen entstehenden Beanspruchungen ist aber notwendig, da die Anteile der Axialbelastung, z.B. aus dem „Zug“ der Bordscheiben oder dem Einfluß der Trommelrillung, erheblich sein können.

Die Belastung $p_r(x)$ stellt im wesentlichen den Umschnürungsdruck des Seiles dar, der von der Seillast, dem elastischen Zusammenspiel von Seil und Trommel und dem Verformungsverhalten des „Seilpakets“ bei mehrlagig bewickelten Trommeln abhängig ist und daher von Lastfall zu Lastfall stark schwanken kann.

Zur Berücksichtigung und Erfassung dieser Belastung wird ein mechanisches Modell gewählt das davon ausgeht, daß der Umschnürungsdruck mindestens einer Windung konstant ist und das die (an sich schraubenförmigen Windungen) durch eine Anzahl kreisförmiger Umschnürungen ersetzt werden. Die Größe dieser – annähernd konstanten - Flächenpressung $p_r(x)$ ist das Ergebnis der Berechnung eines hochgradig unbestimmten Systems, welches das Last-Verformungs Verhalten der Trommel unter einer Windung als Basis hat.

Daher wird zunächst eine Schale der Länge l betrachtet, welche durch eine einzige Windung der Breite s belastet wird. Dieses belastete Schalenteil wird von zwei unbelasteten und am Rand befestigten Schalen der Längen l_1 und l_2 berandet. Die belastete Schale erfährt einen konstanten Druck p , die Randschalen den (ebenfalls konstanten) Druck $p=0$. Die Beschreibung des Verhaltens der drei Schalen ist nun mit der Differentialgleichung der biegesteifen Kreiszylinderschale möglich. Diese ist mit Hilfe der Randbedingungen für jede der drei Schalen lösbar.

1.3 Entlastungseffekte

Im folgenden wird ein Ansatz zur Beschreibung des Elastizitätsverhaltens von Drahtseilen, welche auf einen Trommelkörper gewickelt sind, beschrieben. Die Lasteinleitung in den Trommelkörper wird hier von nach /4/, /1/ und /11/ entscheidend beeinflusst.

Folgende Annahmen werden zugrunde gelegt:

Die schraubenförmige Wicklung wird in eine Aneinanderreihung kreisförmiger, geschlossener Ringe zerlegt.

Für den kreisförmigen Seilquerschnitt wird ein quadratischer Ersatzquerschnitt angenommen. Die Fläche des Ersatzquerschnitts ist gleich der Fläche des Seilquerschnitts. Es gilt:

$$s = \frac{d}{2} \sqrt{\pi}$$

Auf die Trommel wirkt dann unter dem Seil ein über die Fläche des Ersatzquerschnitts konstanter Druck.

Die Dehnung der Seilringe wird nach der Formel für kreiszylindrische Ringe berechnet. Die Ringstärke wird hierbei als klein gegenüber dem Radius der Ringe angenommen. Es gilt:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{s^2}$$

Damit ergibt sich eine Druckspannung auf die Seiltrommel von:

$$p = \sigma_s \frac{s}{a+t} = \frac{F_s}{\frac{a+t}{2}}$$

Für die einlagig bewickelte Seiltrommel folgt nun aus den genannten Bedingungen die Beschreibung der Entlastungseffekte.

Zu der Berechnung der mehrlagig bewickelten Seiltrommel werden die Windungen verschiedener Lagen als sich berührende, konzentrische Ringe betrachtet.

Neben der gegenseitigen Entlastung der Windungen einer Lage tritt bei der mehrlagig bewickelten Seiltrommel noch ein weiterer Entlastungseffekt auf. Durch den Druck einer Seillage auf die unter ihr liegenden Lagen werden diese zusammengequetscht. Die damit verbundene Reduzierung des Windungsradius führt zu einer Entlastung in Seillängsrichtung und damit zu einem reduzierten Trommeldruck. Dieser Entlastungseffekt wird primär von dem Elastizitätsverhalten des Seiles quer zur Lastrichtung bestimmt. Als beschreibender Pa-

rameter wird hierzu das Seilquerschnittsmodul E_{sq} verwendet.

Um die Drücke $X_{i,m}$, $i=1, \dots, m-1$, $j=1, \dots, n$, zwischen den einzelnen Lagen an der Stelle der j -ten Windung, insbesondere den resultierenden Druck $X_{1,m}$ auf den Trommelkörper zu bestimmen, wird folgendermaßen vorgegangen.

Für jede Windung j werden alle unbekannt Drücke $X_{1,m}$ bis $X_{m-1,m}$ berechnet.

Der Radius r_i einer Windung in der i -ten Lage:

$$r_i = a + \frac{t}{2} + (i-1)s + \frac{s}{2}, \quad i = 1, \dots, m-1$$

Die Absenkung c_i einer Seilwindung vom Radius r_i unter dem Druck 1:

$$c_i = -\frac{r_i^2}{E_s s}, \quad i = 1, \dots, m-1$$

Die Zusammenpressung des Seilquerschnitts unter dem Druck 1:

$$c_Q = \frac{s}{E_{sq}}$$

Der Druckminderungsfaktor f_i einer Seilwindung in der i -ten Lage auf ihre Unterlage, infolge des Zusammenquetschens des Seilquerschnitts unter dem Druck 1:

$$f_i = \frac{s^2}{2r_i^2} \frac{E_s}{E_{sq}}, \quad i = 1, \dots, m-1$$

Die Druckminderung des Druckes der i -ten auf die $(i-1)$ -te Lage wird dann:

$$\Delta X_{ij} = -f_i X_{ij}, \quad i = 2, \dots, m$$

Die m -te Lage wird unter dem Druck p aufgewickelt, d.h. sie drückt mit $X_{m,m} = p$ auf die $(m-1)$ -te Lage.

Ferner sei c_{Tj} , $j=1, \dots, n$, die Absenkung der Trommel an der Stelle der j -ten Windung unter dem Druck 1,

bei Berücksichtigung der gegenseitigen Entlastung der einzelnen Windungen.

Die 2m-2 Absenkungen an der Stelle der Windung j, können wie folgt beschrieben werden:

$$w_T = X_{1,m} c_{Tj}$$

$$w_{1,m} = X_{1,m} c_1 - X_{2,m} c_1 + \frac{1}{2} X_{1,m} c_Q$$

$$w_{1,m}^* = X_{1,m} c_1 - X_{2,m} c_1 + \frac{1}{2} X_{2,m} c_Q$$

⋮

$$w_{i,m} = X_{i,m} c_i - X_{i-1,m} c_i + \frac{1}{2} X_{i,m} c_Q$$

$$w_{i,m}^* = X_{i,m} c_i - X_{i-1,m} c_i + \frac{1}{2} X_{i-1,m} c_Q$$

⋮

$$w_{m-1,m} = X_{m-1,m} c_{m-1} - X_{m,m} c_{m-1} + \frac{1}{2} X_{m-1,m} c_Q$$

Unter Verwendung der Verträglichkeitsbedingungen,

$$w_T = w_{1,m}; \quad w_{i,m}^* = w_{i+1,m}, \quad i = 1, \dots, m-2;$$

folgt ein lineares Gleichungssystem für die m-1 Unbekannten $X_{i,m}$:

$$e_1 + c_1 X_{2,k} = 0$$

$$c_1 X_{1,k} - e_2 X_{2,k} + c_2 X_{3,k} = 0$$

$$c_2 X_{2,k} - e_3 X_{3,k} + c_3 X_{4,k} = 0$$

⋮

$$c_i X_{i,k} - e_{i+1} X_{i+1,k} + c_{i+1} X_{i+2,k} = 0$$

⋮

$$c_{k-2} X_{k-2,k} - e_{k-1} X_{k-1,k} = -c_{k-1} X_{k,k}$$

mit

$$e_i = \begin{cases} c_T - (1 + f_1) c_1 & \text{für } i = 1, \\ -[(1 + f_{i-1}) c_{i-1} + (1 + f_i) c_i] & \text{sonst} \end{cases}$$

Dieses Gleichungssystem wird nun sukzessive für k=1 bis zur tatsächlichen Lagenzahl m gelöst. Der

Druck p_{Tj} , welcher an der Stelle der j-ten Windung auf die Trommel wirkt, wird berechnet als Summe der Drücke $X_{i,k}$:

$$p_{Tj} = \sum_{k=1}^m X_{1,k}$$

Sind alle j Drücke p_{Tj} bestimmt, so werden – analog zur Berechnung einer mit n Windungen einlagig bewickelten Trommel – n Matrizen V_j einer mit konstantem Druck p_{Tj} belasteten Schale der Länge d berechnet. Die Superposition der Resultate führt zu der mit Entlastungseffekt berechneten Druckbeanspruchung der mehrlagig bewickelten Trommel.

Diese von /1/ erstmals in Form einer Dimensionierungssoftware aufgearbeitete Theorie des Entlastungseffekts einer Bewicklung, verwendet ein im gesamten Wicklungspaket konstanten Seilquerelastizitätsmodul. Die Versuche an Drahtseilen zur Ermittlung der elastischen Kennwerte weisen jedoch eine Abhängigkeit des Querelastizitätsmoduls sowohl von der Lagenzahl als auch von der Stranglast nach.

Die lagenweise Anpassung des Seilquerelastizitätsmoduls in Abhängigkeit der durch den Entlastungseffekt hervorgerufenen Lagendruckreduzierung erscheint somit geboten. In der Realisierung bedeutet dies eine iterative Neuberechnung des Lagendruckes bis zu einer hinreichend genauen Konvergenz gemäß der oben beschriebenen Modellbildung. Die Umsetzung im Rahmen der Überarbeitung der Dimensionierungssoftware STB führte unter Berücksichtigung einer lagenweisen Anpassung des Querelastizitätsmoduls zu einer Reduzierung des Trommeldrucks von 8% bis 12% in Abhängigkeit der Seilcharakteristika.

Das bereits von /1/ dargestellte Verfahren der Entkopplung von Wicklungspaket und Trommelkörper findet in der Berechnung, in modifizierter Form, Anwendung.

/1/ beschreibt die Lastfunktion auf den Trommelkörper durch die Abstraktion auf Windungssäulen mit konstantem Elastizitätsverhalten der Seile. Die Bestimmung dieser „säulenweisen“ Bestimmung des Trommeldrucks impliziert jedoch durch die Tatsache des konstanten Querelastizitätsmoduls der Seile eine Verfälschung der realen Trommellasten. In der vorliegenden Arbeit wird daher eine Windungssäule mit veränderlichem Seilquerelastizi-

tätsmodul und damit angepaßtem Trommeldruck modelliert. Grundlage dieser Überlegung ist die Tatsache, daß bei der Mehrlagenwicklung die Seile der unteren Lagen durch die Mehrlagigkeit höher belastet sind als die Teile der oberen Lagen. Demzufolge ändert sich auch unter der Annahme einer konstanten Seillängsspannung das Elastizitätsverhalten der Seile lagenweise.

Der berechnete, korrigierte Trommeldruck, wirkt auf ein Schalenelement, welches entsprechend dem aufgelegten Seildurchmesser d gewählt wird. Die Aneinanderreihung einer der Anzahl der aufgelegten Windungen entsprechenden Anzahl von Schalenstücken dieser Art ermöglicht mit der Kenntnis der Rand- und Zwischenbedingungen der Einzelschale eine „Zusammensetzung“ des realen Trommelmantels.

Die Abhängigkeiten zwischen den Windungssäulen und deren Auswirkung auf die Beanspruchungen im Trommelkörper werden durch die Aufbringung einer Einheitsverschiebung modelliert. Es ist somit möglich, die „elastische Antwort“ des Trommelkörpers auf die Bewicklung im Grundverhalten darzustellen. Die Berechnung der o.g. Trommeldrücke und deren Einarbeitung in Form von Einflußzahlen transformiert das abstrakte Grundsystem zur Darstellung des realen Trommelkörpers mit absoluten Beanspruchungen.

Die Kopplung der genannten Einzelschalen mit den darüber stehenden Windungssäulen erfolgt durch das Übertragungsmatrixverfahren.

Die vorgestellten Methoden sind in der Dimensionierungssoftware TRODIM implementiert. Die vergleichende Betrachtung der so errechneten Verformungslinien des Trommelkörpers ist in **Bild 3** dargestellt.

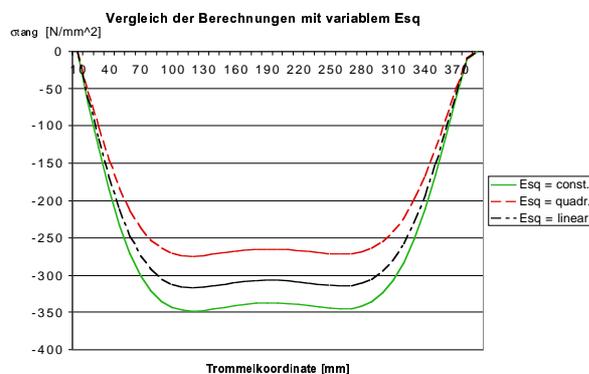


Bild 3: vergleichende Betrachtung

6 Zusammenfassung

Zur Berechnung von Windentrommeln bedarf es eines Systemansatzes, welcher das elastische Verhalten des Seiles einerseits und das elastische Verhalten des Trommelkörpers andererseits erfaßt. Dieser, auf der analytischen Beschreibung des elastischen Verhaltens des Bewicklungspakets basierende Ansatz, ermöglicht die Berechnung der Trommellasten bei der Verwendung von handelsüblichen Seilen. Neben den üblicherweise verwendeten Drahtseilen können auch die deutlich differierenden Beanspruchungen bei der Bewicklung mit Kunststoffseilen berechnet werden. Im Gegensatz zu bisherigen Berechnungsansätzen ermöglicht die im Rahmen der Arbeit entwickelte Dimensionierungssoftware TRODIM die Berücksichtigung eines lagenweise variierenden Seilquerschnitts.

Die Quantifizierung der durch die Bewicklung hervorgerufenen Beanspruchungen im Trommelmantel wird durch die Modellierung des Trommelkörpers als biegesteife Kreiszyllinderschale ermöglicht. Das von /1/ erstmals bei der Berechnung von Trommeln eingeführte Verfahren der Übertragungsmatrizen wird in der vorliegenden Arbeit modifiziert wieder aufgegriffen.

Zur Berechnung der Bordscheibenwandstärke von Trommelwinden wurde eine neue Theorie entwickelt. Diese auf der Kräfteinleitung als Flächenlast basierende Modellbildung ermöglicht die Berücksichtigung des Querkontraktionsverhaltens von Seilen. Durch Versuche am realen Bauteil konnte nachgewiesen werden, daß die Querkontraktionszahl der Seile entscheidenden Einfluß auf die Beanspruchungen in den Bordscheiben haben.

Umfangreiche Versuchsreihen dienen zur Bestätigung der gewonnenen Erkenntnisse.

Eine große Anzahl von Seilen wurde auf einem Spezialprüfstand zur Messung des Querelastizitätsverhaltens von einzelnen und geschichteten Drahtseilen durchgeführt. Die Versuche dienen der Ermittlung des Querelastizitätsmoduls und der Querkontraktionszahl von Seilen, welche in die Berechnungsmodelle Eingang finden.

Messungen am realen Trommelkörper mittels Dehnungsmeßstreifen dienen der Bestätigung der Lastannahmen und der daraus resultierenden Beanspruchungen im Trommelkörper.

Auf der Basis der Berechnungsergebnisse der analytischen Lösungsansätze und der Versuche am Bauteil wurde eine Optimierung mit der Methode der finiten Elemente durchgeführt. Die erreichte

Gewichtsreduzierung des Trommelkörpers beträgt 20 %.

Die Anwendung der vorgestellten Ansätze und Berechnungsmethoden ermöglicht die Konstruktion von Leichtbauwindentrommeln.

Seil und Trommel"; Fördern und Heben, 19/6, 1969, 349-352.

/14/ P. Bolvansky: "Beitrag zur Berechnung der Spannungen in der Seiltrommelwand"; Deutsche Hebe- und Fördertechnik, 3/11, 1985, 27-28.

7 Literatur

- /1/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln. Dissertation, TH Darmstadt, 1971
- /2/ R. Lorenz: "Die Berechnung rotierender Trommeln"; Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 54/34, 1910, 1397-1403.
- /3/ E. O. Waters: "Rational Design of Hoisting Drums"; The American Society of Mechanical Engineers, Transactions, 42/1760, 1920, 463-485.
- /4/ H. Ernst: "Untersuchungen über die Beanspruchung der Seiltrommel von Kranen und Winden"; Mitteilungen aus den Forschungsanstalten Gutehoffnungshütte, 6/8, 1938, 195-215.
- /5/ N. Sag und A. C. Briggs: "Charts Simplify Hoisting Drum Design"; Machine Design, 25/4, 1953, 265-271.
- /6/ T. Egawa und M. Taneda: "External Pressure Produced by Multi-Layers of Rope Wound about a Hoisting Drum"; Bulletin of JSME, 1, 1958, 386.
- /7/ J. Dolan: "Winder Drum Tread Design Investigation"; The South African Mechanical Engineer, 13/12, 1963, 97-138.
- /8/ C. B. Biezeno, Grammel, R.: "Technische Dynamik"; Springer Verlag, Berlin, 1953.
- /9/ M. Eßlinger: "Berechnung einer Seiltrommel"; Der Stahlbau, 23/7, 1954, 150-157.
- /10/ H. Kraitschy: "Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von mehrlagig bewickelten Seiltrommeln"; Schweißtechnik, 24/7, 1974, 315-318.
- /11/ H. J. Neugebauer: "Berechnungsverfahren für ein- und mehrlagig bewickelte Seiltrommeln"; Dissertation, Technische Universität Dresden, 1977.
- /12/ N. W. Bellamy und B. D. A. Phillips: "An investigation into flange forces in winch drums"; The Institution of Mechanical Engineers, Proceedings, 183/1, 1968, 579-590.
- /13/ G. Hoeland: "Ein Beitrag zur Berechnung von Seiltrommeln unter Berücksichtigung der Verformungen und der Reibung zwischen

Erarbeitung von Dimensionierungsgrundlagen für spielbehaftete Längsstift-Verbindungen

Birkholz, H.; Garzke, M.; Otto, St.

Bereits vor zwei Jahren berichtete das Institut in seiner jährlichen Mitteilungsschrift /1/ über die Möglichkeit, spielbehaftete Längsstifte als Welle-Nabe-Verbindung für die Übertragung hoher Drehmomente einzusetzen und zeigte den hierfür zwingend erforderlichen Forschungsbedarf auf. Im Rahmen eines von der DFG geförderten Projektes werden nun am Institut Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, deren Ziel im Titel des Artikels zum Ausdruck kommt.

Already two years ago in their annual report /1/ the institute informed about the possibility of using axial pin connections with clearance as shaft-hub-connection for high torque transmission. The required research work was also shown. Now, financed by the German Research Association, basic investigations are undertaken. The aim of this research work is expressed in the title of this article.

1 Stiftverbindungen

Der Terminus Stiftverbindung bezeichnet gewöhnlich formschlüssige Verbindungen, bei denen zu meist übermaßbehaftete Stifte eingesetzt werden, die im Normalfall Kraftgrößen mittels Scherung, Biegung und Flächenpressung übertragen. Die Aufnahmebohrungen werden herkömmlicherweise bei der Montage der Verbindungspartner durch Bohren und Reiben gefertigt. Die Hauptfunktion besteht in der Zentrierung und der Lagesicherung der Bauteile zueinander (**Bild 1**) ohne größere Ansprüche an die Übertragbarkeit von Kräften und Momenten.

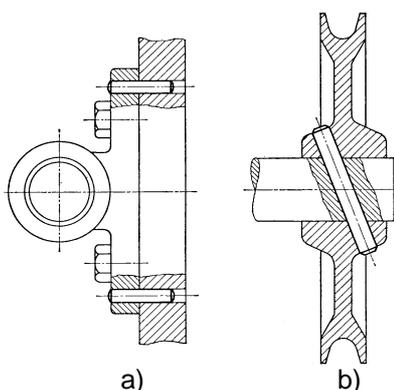


Bild 1: Beispiele für Stifanwendungen /2/; a) Stifte zur Positionierung, b) Nabenbefestigung

In Welle-Nabe-Verbindungen werden Stifte radial, tangential, axial oder diagonal angeordnet. Bei axialer Anordnung in der Paßfuge wird die Bohrung in vormontiertem Zustand gebohrt und gerieben. Dabei besteht die Gefahr, daß – insbesondere bei der Verwendung verschiedener Werkstoffe für Welle und Nabe – die Bohrung verläuft oder die Fertigungsverfahren Bohren und Reiben die für eine Drehmomentübertragung erforderliche Qualität nicht gewährleisten können /3/. Außerdem muß der Nabensitz für die Herstellung der Bohrung frei zugänglich sein, so daß konstruktive Restriktionen bestehen. Aus diesem Grund begrenzt sich das Einsatzfeld meist auf das Fixieren von Naben, Hebeln oder Stellringen mit Wellen oder Achsen. Die Unvollkommenheiten bei der Fertigung und Montage sind vermutlich auch der Grund für den „schlechten Ruf“ dieser Verbindung und haben dazu geführt, daß bis heute keine wissenschaftlich begründeten Methoden zur Tragfähigkeitsberechnung existieren, die auf die besonderen Eigenschaften der Längsstifte eingehen.

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes zu untersuchenden spielbehafteten Längsstift-Verbindungen werden häufig mit dem beschriebenen Montageaufbau und den dargestellten Nachteilen der gepreßten Stiftverbindungen assoziiert; sie unterscheiden sich jedoch grundsätzlich in Aufbau und Funktion.

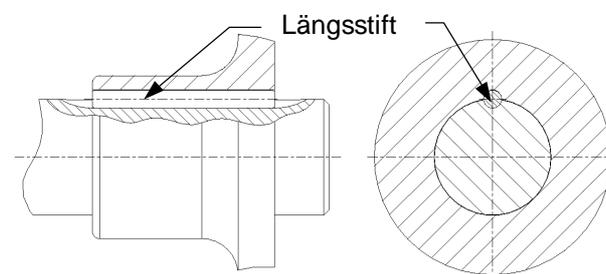


Bild 2: Prinzipieller Aufbau einer spielbehafteten Längsstift-Verbindung

Diese formschlüssige Welle-Nabe-Verbindung eignet sich zur Übertragung hoher Drehmomente. Dabei werden axial am Umfang der Welle angeordnete, zylindrische Stifte als Mitnehmerelemente verwendet (**Bild 2**). Diese Zylinderstifte können in Anzahl und Anordnung variieren.

2 Vergleich: Längsstift – Paßfeder

Spielbehaftete Längsstifte werden in eine – vor der Montage der Bauteile gefertigte – Nut eingelegt. Die Herstellung der halbkreisförmigen Nut ist mit Hilfe neuer Fertigungstechnologien (z.B. Einwalzen, CNC-Schleifen, Erodieren) mit besserer Fertigungsqualität ausführbar als bei den übermaßbehafteten Stiften (vgl. **Kap. 1**). Zu den erforderlichen Spielen und Toleranzen gibt es bisher keine Aussagen. Die Stifte sind mit hoher Maß- und Oberflächenqualität und im Vergleich zu Paßfedern mit geringeren Kosten herstellbar.

Die spielbehafteten Längsstift-Verbindungen sind durch folgende Vorteile gekennzeichnet:

- leichte Montage/Demontage der Nabe aufgrund des reinen Formschlusses
- Vermeidung zusätzlicher Beanspruchungen, weil kein Verspannen von Welle und Nabe erforderlich ist, und
- Übertragung hoher Drehmomente.

In den genannten Punkten unterscheiden sie sich nicht von der Paßfederverbindung, die nach wie vor in der Antriebstechnik eine der am häufigsten eingesetzten formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen ist und die durch einen hohen Normungsgrad gekennzeichnet ist. Die Paßfederverbindung besitzt jedoch in der hohen Kerbwirkung der scharfkantigen Paßfedernut einen wesentlichen Nachteil gegenüber der Längsstift-Verbindung. Untersuchungen /4/ haben gezeigt, daß in ca. 80% der Schäden an Wellen und Achsen konstruktive Kerben – so auch die Paßfedernut – die schadensauslösenden Stellen sind. **Bild 3** verdeutlicht beispielhaft diese Situation.

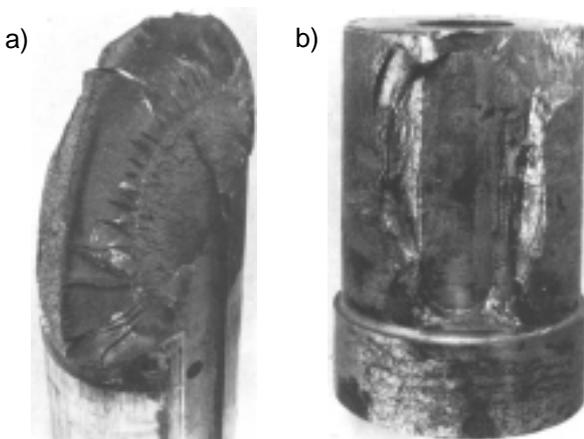


Bild 3: Schadensfälle, bei denen die Paßfeder aufgrund der hohen Kerbwirkung die schadensauslösende Stelle verkörpert /4/; a) Torsionsdauerbruch, b) Ausbrüche

Zur Vermeidung von Schadensfällen werden bei der Dimensionierung von Paßfederverbindungen hohe Form- und Kerbwirkungszahlen berücksichtigt, so daß allein durch Materialanhäufung die Spannung im Übertragungsbereich unterhalb der zulässigen Werkstoffgrenze gehalten wird. Um die maximalen Spannungen im Kerbgrund zu reduzieren, erniedrigt man durch diese Maßnahme die Nennspannungen! Diese Vorgehensweise ist nicht nur unter dem Gesichtspunkt der Kostenersparnis nachteilig, sondern vor allem hinsichtlich des Zwangs zur Leistungssteigerung eine schlechte Problemlösung. Trotz zahlreicher durchgeführter Forschungsvorhaben /5, 6, 7, 8/ bestehen diese Nachteile der Paßfederverbindung weiterhin und werden nur geringfügig durch sorgfältige Ausrundungen des Nutgrundes gemildert.

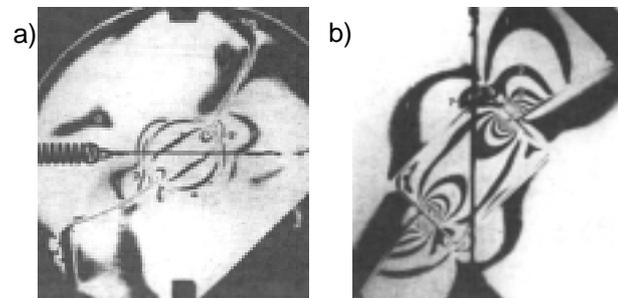


Bild 4: Spannungsoptische Darstellung der Spannungsverteilung in einer a) Längsstift-Verbindung und b) Paßfederverbindung /9/

Längsstift-Verbindungen zeichnen sich aufgrund ihres halbkreisförmigen Nutquerschnitts durch wesentlich geringere Spannungsüberhöhungen in der Kerbe aus. Die spannungsoptischen Bilder, dargestellt in **Bild 4**, verdeutlichen diese Aussage. Während im Modell der Paßfeder Isochromaten¹ der 7. Ordnung auftreten, sind im Modell der Längsstift-Verbindung lediglich Isochromaten der 2. Ordnung zu erkennen. Ihre Tragfähigkeit ist deshalb im Vergleich zu Paßfederverbindungen sehr viel größer, sie erlaubt dadurch eine Reduzierung von Material und Bauraum für die Aufgabe der Drehmomentübertragung. Für die spielbehafteten Längsstift-Verbindungen fehlen aber im Gegensatz zu Paßfederverbindungen abgesicherte Berechnungsvorschriften für eine beanspruchungsgerechte Dimensionierung. Hinzu kommt der Mangel an Erkenntnissen über die Gestalt- und Dauerfestigkeit von Wellen

¹ Isochromaten zeigen Hauptspannungsdifferenzen an. Sie sind ein indirektes Maß für die Beanspruchungshöhe.

und Naben, die durch eine halbkreisförmige Nut geschwächt sind. Für derartige Geometrien existieren keine Form- und Kerbwirkungszahlen $/10/$.

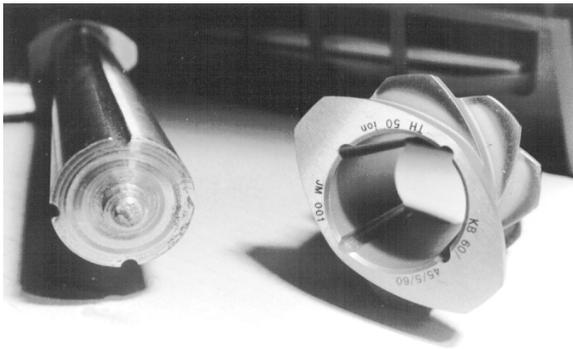


Bild 5: Extruderwelle mit Längsstift-Verbindung $/1/$

Das fehlende Grundlagenwissen über diese Verbindungsart bezüglich Tragfähigkeit und Fertigungsmöglichkeiten ist Ursache dafür, daß der in der Praxis tätige Konstrukteur der spielbehafteten Längsstift-Verbindung – trotz ihrer Vorteile – kein Vertrauen entgegenbringt. **Bild 5** zeigt eines der wenigen Anwendungsbeispiele von Längsstift-Verbindungen, das auch die Wirksamkeit dieser Verbindung mit einer platzsparenden, hochleistungsfähigen Drehmomentübertragung beweist. Weiterhin können gebaute Nockenwellen und Werkzeugmaschinen als Einsatzfelder genannt werden $/1/$, auch die Anwendung in Planetenradgetrieben weist auf Eigenschaften hin, die die hohe Leistungsfähigkeit dieser Verbindung unterstreichen.

3 Ziele des Forschungsprojektes

Das Forschungsprojekt verfolgt die allgemeine Zielstellung, umfassende Berechnungsgrundlagen für

die beanspruchungsgerechte Dimensionierung von spielbehafteten Längsstift-Verbindungen zu erarbeiten und Gestaltungsrichtlinien für deren praktischen Einsatz anzugeben. Damit sollen die Voraussetzungen für eine breite Anwendung dieser bisher unterschätzten Welle-Nabe-Verbindung geschaffen werden.

Der Schwerpunkt der Projektarbeit konzentriert sich zunächst auf die Untersuchung der Einflüsse:

- Geometrie der Verbindungspartner (Welle, Nabe, Stift, Passung),
- Werkstoffe der Verbindungspartner und
- Belastungsart/-kombination

in ihrer Auswirkung auf die Festigkeits- und Tragfähigkeitseigenschaften der Längsstift-Verbindungen.

Bild 6 zeigt die oben genannten Einflußfaktoren und deren detaillierte Aufgliederung in Variationsparameter. Basierend auf Finite-Elemente-Berechnungen werden die genannten Interdependenzen analytisch abgebildet, so daß dem konstruktiv tätigen Ingenieur einfach handhabbare Berechnungsformeln zur Verfügung gestellt werden, die eine optimale Ausführung dieser Welle-Nabe-Verbindung unter funktionellen und belastungstechnischen Gesichtspunkten gewährleisten. Das Dimensionierungsverfahren wird ergänzt durch die Berücksichtigung des Einflusses fertigungs- und montagespezifischer Parameter.

Ein weiteres Ziel der Rechnersimulationen ist die Ermittlung von Formzahldiagrammen. Diese werden sowohl für verschiedene Belastungssituationen als auch Geometrievariationen bestimmt. Sie ermöglichen eine Beurteilung der Kerbspannungen bei statischer Belastung.

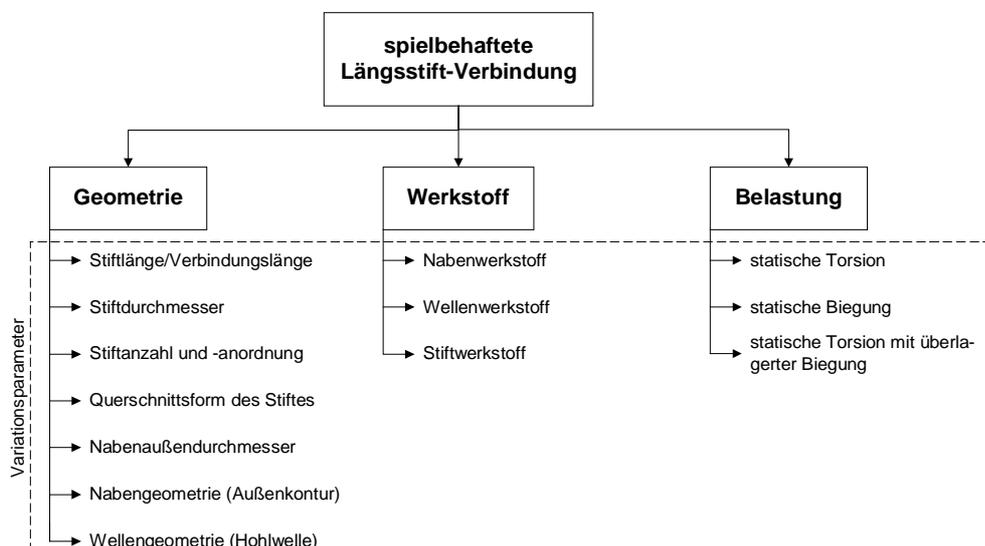


Bild 6: Aufteilung des Projektes in Untersuchungsschwerpunkte

4 Ergebnisse von Voruntersuchungen

4.1 Finite Elemente Berechnungen

Erster Arbeitspunkt im Rahmen der FE-Berechnungen war die Klärung der Randbedingungen für das FE-Modell sowie die Untersuchung des Einflusses der Elementierung auf die Qualität der FEM-Ergebnisse.

Bei den bisher am Institut durchgeführten FE-Analysen an Welle-Nabe-Verbindungen (Zahnwellen-Verbindungen, Preßverbindungen) und Bolzen-Lascheverbindungen handelte es sich stets um Zweikörperkontaktrechnungen. Längsstift-Verbindungen bestehen jedoch aus mindestens drei Kontaktkörpern, von denen sich die spielbehafteten Längsstifte zunächst (am Beginn der Lastaufbringung) radial und tangential frei in der Nut verschieben können. Um eine unkontrollierte Bewegung dieser Kontaktkörper zu vermeiden und letztlich die Konvergenz der numerischen FE-Algorithmen zu ermöglichen, mußten Fesselbedingungen definiert werden, welche die Bewegungsfreiheit der Stifte nicht derart einschränken, daß zusätzliche Spannungen induziert werden.

Zur Lösung dieses Problems wurden basierend auf den Annahmen:

- reine Torsionsbelastung,
- mindestens zwei Stifte am Umfang verteilt und
- gleichmäßige Lastaufteilung auf alle Stifte

mit Hilfe einer im verwendeten FEM-System Marc/Mentat angebotenen Funktion die Freiheitsgrade aller Stiftachsen miteinander gekoppelt. Die-

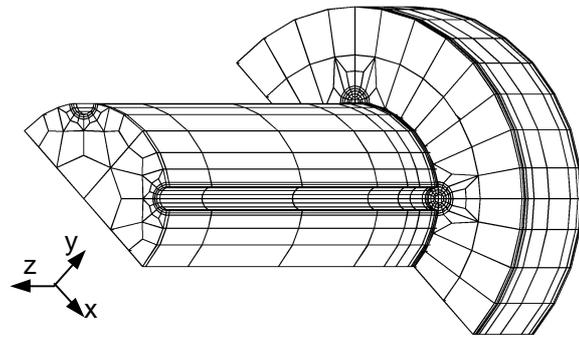


Bild 7: Dreidimensionales 180°-Sektormodell einer Längsstift-Verbindung

se Fesselbedingung in Kombination mit der Fixierung aller Kontaktkörper in z-Richtung (vgl. **Bild 7**) ermöglichte einen fehlerfreien Rechenablauf. Mit dieser Vorgehensweise ergeben sich allerdings folgende Nachteile:

- es müssen mindestens zwei Stifte bei der Berechnung berücksichtigt werden und
- es wird eine gleichmäßige Lastaufteilung auf die Stifte erzwungen.

Unsymmetrische Lastaufteilungen innerhalb der Verbindung, die beispielsweise auch bei der Verwendung mehrerer Paßfedern auftreten, können mit diesen Randbedingungen nicht erfaßt werden.

Für die Voruntersuchungen wurden ausschließlich Halbmodelle verwendet, die neben der Lastsymmetrie (Torsion) auch die Symmetrie der Geometrie (gleichmäßige Stiftverteilung am Umfang) voraussetzen.

Mit den beschriebenen Randbedingungen ist die Untersuchung aller in **Bild 6** gezeigten Einflußpa-

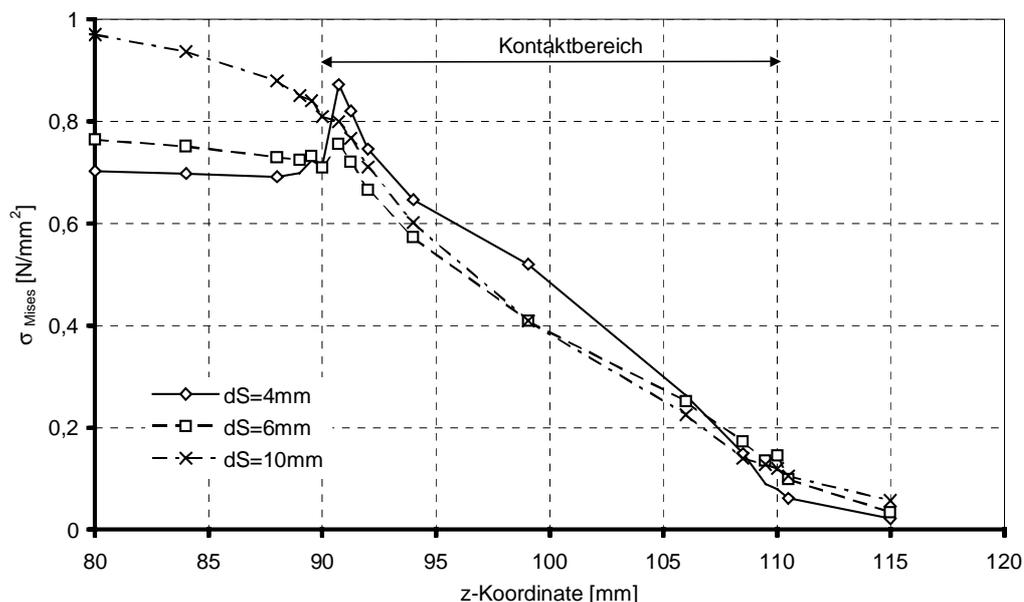


Bild 8: Spannungsverteilung im Kerbgrund der Welle in Abhängigkeit vom Stiftdurchmesser (normiert auf die maximal auftretende Vergleichsspannung der untersuchten Verbindungen) /11/

parameter nicht möglich. Hier werden in den nächsten Arbeitsschritten Verbesserungen erarbeitet.

Neben der Bestimmung von Formzahlen für die Welle und die Nabe wurde auch der Einfluß der Verbindungslänge l , der Stiftanzahl z und des Stiftdurchmessers d_S auf die Spannungsverteilung innerhalb der Verbindung in ersten FEM-Rechnungen analysiert. An Hand des Parameters Stiftdurchmesser d_S werden im folgenden einige Ergebnisse exemplarisch vorgestellt.

Im Rahmen dieser Parameterrechnungen wurden 4-Stift-Verbindungen mit Stiftdurchmessern von 4 mm, 6 mm oder 10 mm untersucht. Dabei wurden die Belastung, der Wellenaußendurchmesser d_W und die Geometrieverhältnisse d_N/d_W und l/d_W (Nabenaußendurchmesser d_N) als konstant vorausgesetzt.

Aus der in **Bild 8** dargestellten Mises-Vergleichsspannung für den Wellenquerschnitt ist zu erkennen, daß sich aufgrund des Steifigkeitssprungs am Beginn der Verbindung ein Spannungsspeak ausbildet. Der Effekt, welcher sich mit Erhöhung des Stiftdurchmessers einstellt, konnte in seiner mechanischen Auswirkung schon bei Zahnwellen-Verbindungen nachgewiesen werden. Infolge des abnehmenden nutzbaren Wellenquerschnitts steigen die Beanspruchungen außerhalb des Kontaktbereichs an. Gleichzeitig verringert sich die Spannungsspitze am Kontaktbeginn. Im Diagramm wird deutlich, daß – bezogen auf die verwendeten Abmessungen – bei einem Stiftdurchmesser von 6 mm eine optimale Spannungsverteilung erreicht wird, denn die Spannungen vor und im Kontakt sind nahezu identisch.

Im Gegensatz zu den Spannungskonzentrationen am Kontaktbeginn wird der Spannungsabfall über der Verbindungslänge durch diesen Untersuchungsparameter nur geringfügig beeinflusst.

4.2 Experimentelle Untersuchungen

Der experimentelle Teil der Forschungsarbeiten beschränkt sich zunächst auf die Untersuchung verschiedener Längsstift-Verbindungen unter reiner Torsion. Ziel der Untersuchungen ist die Bestimmung des maximal übertragbaren Drehmomentes unter der Voraussetzung rein elastischer Verformungen und des dabei auftretenden Verdrehwinkels.

Für diese Versuche wurde der in **Bild 9** abgebildete Verspannkasten eingesetzt [12], bei dem die Last-

aufgabe über einen Hebelmechanismus mit angeschlossener Kraftmeßdose erfolgt. Zur Lasteinleitung kann wahlweise eine zu verspannende Rahmenkonstruktion oder eine Zugspindel eingesetzt werden. Letztere findet dann ihre Anwendung, wenn die zu untersuchenden Bauteile extrem torsionssteif sind, so daß die Auswertung der lastabhängigen Verdrehwinkel auf der institutseigenen Koordinatenmeßmaschine erfolgen muß. Die 3D-Meßmaschine ist hinreichend groß, so daß der gesamte Versuchskasten auf dem Arbeitstisch der Meßmaschine montiert werden kann und während des Versuchs geometrische Messungen durchführbar sind. Aufgrund der massiven Kastenbauweise ist der Einfluß der Verspannkastensteifigkeit auf das Meßergebnis äußerst gering.



Bild 9: Verspannkasten für statische Torsionsuntersuchungen

Für die Bestimmung des maximal übertragbaren Torsionsmomentes genügt der Einsatz einer handelsüblichen Meßuhr zur Registrierung des Beginns der teilplastischen Bauteilbeanspruchung bzw. des Bruchs oder Durchrutschens der Verbindung bzw. des Bauteils (**Bild 10**).

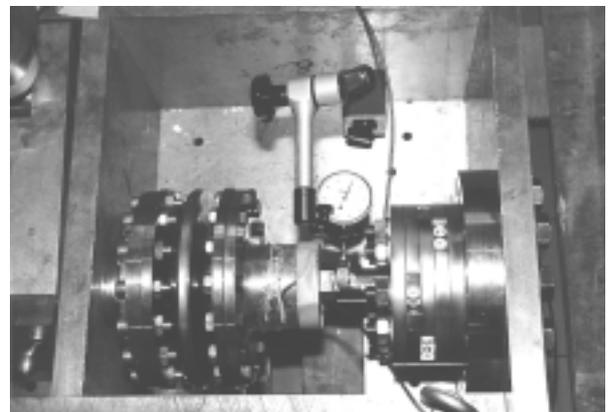


Bild 10: Prüfanordnung mit Meßuhr zur Bestimmung der Deformation

Es wurden Längsstift-Verbindungen mit unterschiedlichen Durchmesserhältnissen d_N/d_W ge-

prüft. Für eine Verbindung mit dünnwandiger Nabe ist die Verformungskennlinie in **Bild 11** exemplarisch dargestellt.

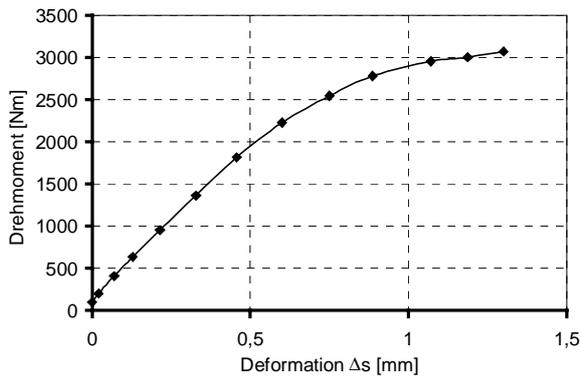


Bild 11: Verformungskennlinie für eine Längsstift-Verbindung mit einem Durchmesserverhältnis $d_N/d_W = 1,3/13$

Die plastischen Deformationen beginnen in einem Lastbereich zwischen 2000 Nm und 2500 Nm. Erstaunlich war bei den Versuchen, daß das Drehmoment bis auf 3000 Nm gesteigert werden konnte, ohne daß ein Bruch auftrat. Aufgrund der sehr hohen plastischen Deformationen und der Gefahr eines Wellenbruchs wurde der Versuch bei dieser Lasthöhe abgebrochen. Entgegen den Erwartungen zeigte sich somit, daß bei reiner Torsionsbelastung und den gegebenen Geometrie- sowie Werkstoffparametern nicht die Stifte die versagenskritischen Komponenten darstellen sondern die Welle.

5 Zusammenfassung

Die Entwicklung neuer Fertigungstechnologien ermöglicht heute die einfache und preisgünstige Herstellung von Längsstift-Verbindungen. Im Vergleich zu Paßfederverbindungen erzeugt die ausgerundete Längsstiftnut geringere Spannungskonzentrationen, Drehmomente können daher mit vergleichsweise kleineren Abmessungen der Welle-Nabe-Verbindung übertragen werden.

Mit dem hier vorgestellten Forschungsprojekt sollen auf Grundlage theoretischer und experimenteller Untersuchungen standardisierbare Berechnungsgrundlagen erarbeitet werden, die eine beanspruchungsgerechte Dimensionierung der spielbehafteten Längsstift-Verbindung ermöglichen.

Die vollständige Erforschung einer Welle-Nabe-Verbindung bis zur Angabe von Tragfähigkeits- und Grenzwerten für den in der Praxis tätigen Konstrukteur erfordert jedoch über diese Arbeiten hinaus die Ermittlung der Gestaltfestigkeit und die

Untersuchung anderer Schadensmechanismen (z.B. Reibdauerbeanspruchung). Dies könnten Themenstellungen für ein Folgeprojekt sein.

6 Literatur

- /1/ Burgtorf, U.; Garzke, M.; Schäfer, G.: Spielbehaftete Längsstift-Verbindungen – eine unterschätzte Welle-Nabe-Verbindung? Institutsmitteilung Nr. 22. Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, 1997
- /2/ Habenauer, H.; Bodenstein F.: Maschinenelemente – Gestaltung, Berechnung, Anwendung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg u.a., 1996
- /3/ N.N.: Stifte und Stiftverbindungen. Merkblatt 451. Beratungsstelle für Stahlanwendung, Düsseldorf, 1982
- /4/ Allianz Versicherungs AG: Handbuch der Schadenverhütung. Allianz Versicherungs AG, Berlin und München, 1979
- /5/ Raab, W.; Weigand, M.; Renneisen, A.: Die Beanspruchung von Paßfederverbindungen – Literaturrecherche und -auswertung. FVA Forschungsheft Nr. 317, Darmstadt, 1990
- /6/ Raab, W.: Paßfederbeanspruchung, FVA Forschungsreport, Darmstadt, 1997
- /7/ Raab, W.: Lebensdauer von Paßfederverbindungen unter besonderen Einsatzbedingungen. FVA Forschungsreport 1998, Frankfurt
- /8/ Linke, H.: Rationeller Tragfähigkeitsnachweis für Getriebewellen nach neuer Vorschrift DIN 743. FVA Forschungsreport 1998, Frankfurt
- /9/ Kuske, A.: Über den Einfluß der Formgebung auf die Spannungsverteilung – Konstruktion und Optimierung von Welle-Nabe-Verbindungen mit spannungsoptischen Versuchen, Verbindungstechnik Heft 4, 1973
- /10/ Kollmann, F. G.: Welle-Nabe-Verbindungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg u.a., 1984
- /11/ Faulwasser, M.: Beanspruchungsverhalten drehmomentbelasteter Längsstift-Verbindungen. unveröffentlichte Studienarbeit, IMW, TU Clausthal, 1998
- /12/ Garzke, M.; Henschel, J.; Schäfer, G.: Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 1). Institutsmitteilung Nr. 23. Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, 1998
- /13/ Morelos Avila, R.: Trabajo experimental y numerico a la union eje-cubo por medio de varillas cilindricas. unveröffentlichte Diplomarbeit, IMW, TU Clausthal, 1999

Bauteiloptimierung durch DMS-Technik und FEM-Untersuchungen

Klemp, E.; Mupende, I.; Schäfer, G.

Die Bestimmung von mechanischen Spannungen kann auf verschiedene Arten erfolgen – analytisch, experimentell und numerisch. In diesem Artikel werden anhand eines Beispiels die verschiedenen Verfahren sowie mögliche Ergebnisse dargestellt. Zunächst wird die auftretende mechanische Dehnung mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS) experimentell ermittelt. Die Resultate dieser Messung bieten dann erste Anhaltspunkte für die Finite Elemente Methode (FEM). Mit Hilfe der Kombination beider Untersuchungsmethoden können im weiteren Verlauf Optimierungen der Bauteilgeometrie durchgeführt werden, ohne daß eine erneute experimentelle Untersuchung erforderlich ist.

The measurement of mechanical stress can be carried out by means of different methods including analytical, numerical and experimental proceedings. Within this article the different proceedings as well as their combination are described by an example. To find the right starting point for the Finite Element Method, a very effective numerical calculation, first the experimental strain measurements are carried out. By means of strain gauges the mechanic stretching at the surface of the part can be measured. Only the combination of these methods leads to a detailed stress prediction without any additional experiment, which has been necessary by now, and therefore to an effective way to optimise the construction.

1 Einleitung

Ausgangspunkt bei einer Festigkeitsoptimierung an Baugruppen und Maschinenteilen bildet u.a. die Fragestellung nach der Überschreitung der zulässigen Werkstoffkennwerte. Dabei bieten sich verschiedene Möglichkeiten an, wobei Computersimulationen alleine, wie z.B. die Finite-Elemente-Berechnung, aufgrund unklarer Lastannahmen und Randbedingungen nicht immer zur eindeutigen Ursachenklärung beitragen können. Messungen an der Gesamtstruktur unter Betriebsbedingungen durch den Einsatz von Dehnungsmessstreifen (DMS) bieten einen zielgerichteteren Ansatz, erfordern jedoch eine gewisse Erfahrung bei der Applikation und der Auswertung der Meßdaten.

An einem realen Bauteil soll hier ein möglicher Weg vorgestellt werden, wie mit Hilfe der Kombination von DMS-Messung und Finite Elemente Methode eine Bauteiloptimierung erreicht und damit ein zeitaufwendiges experimentelles Vorgehen vermieden werden kann.

2 Problemstellung

An einer Holzspänepresse (**Bild 1**) traten nach Belastungssteigerung Risse im Pressenoberteil auf. Diese Schäden können nicht nur zum Versagen des Maschinenteils, sondern auch zum Stillstand der ganzen Produktionslinie führen. Zur Ursachenklärung und Optimierung der Konstruktion trat der Hersteller an das IMW heran, da er selbst nicht über die Kapazitäten und die Ausstattung verfügte.

Die Untersuchungen wurden in drei Schritten durchgeführt:

1. Lokalisierung der Schwachstellen durch visuelle Begutachtung unter Berücksichtigung der verschiedenen Betriebsarten, Festlegung der relevanten Stellen zwecks Spannungsermittlung mit DMS, Betriebsmessung vor Ort und Auswertung der Meßergebnisse
2. FEM-Untersuchungen und Vergleich mit den DMS-Ergebnissen
3. Optimierung der Konstruktion.

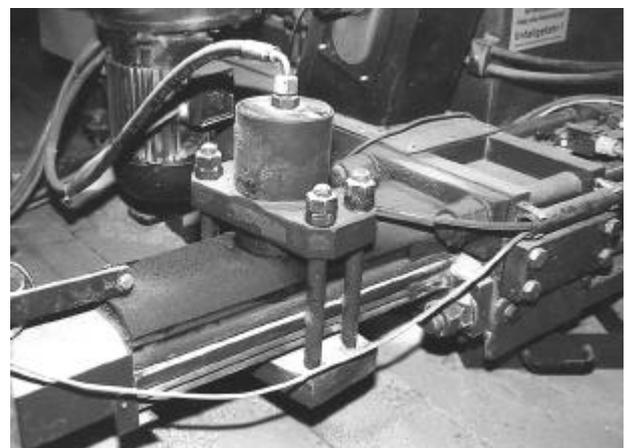


Bild 1: Holzspänepresse im Betrieb, Ober- und Unterteil der Presse werden über eine geschlossene Rahmenstruktur verspannt

3 Messen mit Dehnungsmeßstreifen

Um an einem Bauteil, oder genauer gesagt auf seiner Oberfläche, die im Betrieb auftretenden Dehnungen messtechnisch zu erfassen, werden Dehnungsmeßstreifen (DMS) verwendet. Das Prinzip des DMS beruht auf dem physikalischen Prinzip, daß ein Draht seinen elektrischen Widerstand ändert, wenn er gedehnt bzw. gestaucht wird. Bei den im Handel erhältlichen DMS sind diese Drähte fest auf einer Folie angebracht. Diese Folie wird üblicherweise auf die zu untersuchende Stelle des Bauteils geklebt. Die am Bauteil im Belastungsfall auftretenden mechanischen Dehnungen werden direkt auf die Folie und damit auf den Draht übertragen. Die daraus folgende Änderung des elektrischen Widerstandes des Drahtes wird nun gemessen. Die Messwerte liefern ihrerseits die mechanische Dehnung auf dem Bauteil, die sich bei elastischem Werkstoffverhalten mit Hilfe des Hook'schen Gesetzes in eine proportionale Spannung umrechnen lässt. Da jedoch die absolute Widerstandsänderung nur sehr gering ist ($< 0,1 \text{ Ohm}$), erfolgt die Erfassung nicht direkt über ein Ohmmeter, sondern unter Zuhilfenahme der Verschaltung über eine Wheatstonesche Brücke. Bei dieser Schaltung wird nicht der Widerstand, sondern die Brückenmittelspannung (UB) gemessen (**Bild 2**). Sie bietet weiterhin zum einen die Möglichkeit die sehr geringe Widerstandsänderungen zu erfassen und kann andererseits zu einer Kompensation von Meßeinflüssen, wie zum Beispiel der Änderung der Temperatur verwendet werden.

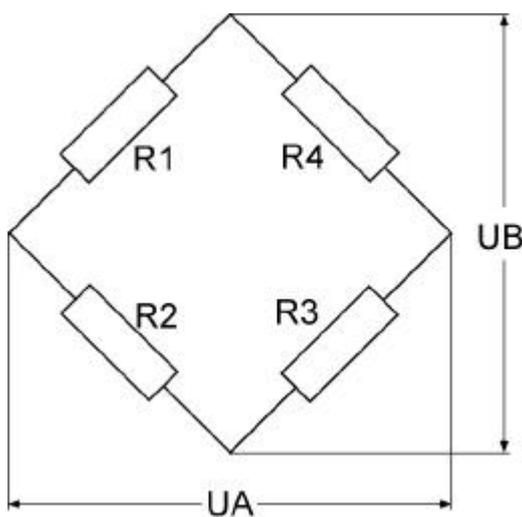


Bild 2: Wheatstonesche Brückenschaltung

Allerdings läßt sich nicht ohne weiteres von der Widerstandsänderung im DMS auf die absoluten

Werte der Dehnung oder der mechanischen Spannung schließen. Hierzu muß die Meßkette vor Meßbeginn kalibriert werden. Diese Kalibrierung kann auf verschiedene Arten durchgeführt werden, je nachdem, ob die Randbedingungen bereits bekannt sind, oder ob die Belastungen gänzlich unbekannt sind. Bei der Messung mit einer bereits bekannten Belastung besteht die Möglichkeit, den Ablesewert einfach durch Dreisatz in eine mechanische Belastung umzurechnen (Prinzip Haushaltswaage). Bei unbekanntem Belastungen (und Dehnungen) muß hier eine Kalibrierung der gesamten Meßkette vorgenommen werden. Dies geschieht in den meisten Fällen über die elektrische Simulation einer mechanischen Spannung. Dazu wird ein Widerstand parallel zu einem DMS verschaltet, ein sog. Shunt. Er simuliert eine mechanische Belastung und „verstimmt“ die Wheatstonesche Brücke. Da die Größe des Parallelwiderstands bekannt ist, kann nun auf die mechanische Dehnung im DMS zurückgeschlossen werden und es entsteht eine Referenz der Widerstandsänderung zur mechanischen Dehnung. Diese Vorgehensweise war in dem Fall der Holzspänepresse notwendig, da hier weder die exakte mechanische Belastung im Bauteil, noch die auftretenden Dehnungen bekannt waren.

Da mit dieser Verschaltung zusätzlich eine Temperaturkompensation vorgenommen werden konnte - Verschalten von mechanisch belasteten in gegenüberliegenden Brückenweigen (R1&R4) - war der Einfluß der Temperaturänderung eliminiert worden.

In dem hier vorliegenden Fall der Holzspänepresse wurde die Dehnungsermittlung mit einer Halbbrücke und Temperaturkompensation durchgeführt. Dies bedeutet, daß R1 als aktiver DMS auf dem Bauteil appliziert wurde und R4 als der dazugehörige passive Temperaturkompensations-DMS. Bei Verwendung der Halbbrückenschaltung werden die Meßstreifen R2 und R3 vom Meßverstärker simuliert - UA bezeichnet hier die Brückenspeisespannung und UB die Meßspannung.

4 FEM-Untersuchung

4.1 Allgemein

Die Methode der Finiten Elemente ist ein numerisches Berechnungsverfahren, bei dem die Gesamtstruktur in endlich kleine Teilelemente diskretisiert wird. Für diese Teilelemente lassen sich mit Berechnungsansätzen der Kontinuumsmechanik Näherungslösungen ermitteln. Die Berechnung dieser Lösungen geschieht oftmals aufgrund der to-

hen Elementanzahl (große Anzahl an zu berechnenden Gleichungssystemen) und der einfacheren Behandlung der Randbedingungen (z.B. Auswahl von Fesselungen, Lastaufgaben etc.) durch Computer.

4.2 Modell und Randbedingungen

Von der Geometrie des Bauteils wurde für die Kontaktberechnung ein vernetztes Modell der dreilagigen oberen Preßbacke erstellt, bei dem die zu verarbeitenden Holzbriketts durch Federn ersetzt und mit dem Volumenmodell der Backe gekoppelt wurden. Die Fesselung der Preßbacke wurde so gewählt, daß nur eine Bewegung in der Lagerungsstelle um die Z-Achse zulässig war. Die Steifigkeit der anzusetzenden Federn wurde experimentell in Druckversuchen verschiedener Holzbriketts ermittelt. Auf eine Berücksichtigung der unteren Preßbacke konnte aufgrund der Symmetrie und der geschlossenen Kraftleitung an der realen Konstruktion verzichtet werden. Kräfte, die aus dem Materialtransport resultieren, wurden durch entsprechende Schubbelastungen an der Unterseite der Preßbacke berücksichtigt. Die Kompressionskraft des vertikal wirkenden Zylinders wurde über eine Druckbeanspruchung auf der oberen Preßbackenlage aufgegeben (**Bild 3**).

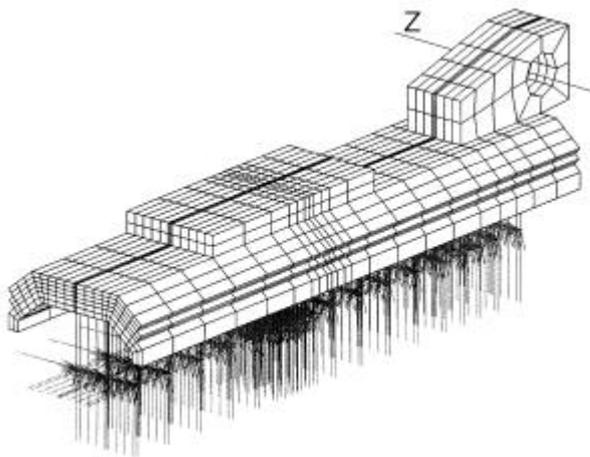


Bild 3: FEM mit Federn ohne Kompensationskraft

5 Ergebnisse

Bei der Durchführung der DMS-Betriebsversuche traten an den Stellen M2 und M3 (**Bild 4**) hohe Spannungen auf. Bei der Untersuchung ergab sich sowohl aus den Ergebnissen der DMS-Messungen, als auch aus der numerischen Berechnung, daß die höchsten Beanspruchungen an der Querkraft-

einleitung der Querzylinder (M3) und an der Verbindungsstelle mit dem Gelenk (M2) auftreten. Die ebenso sehr hohen Belastungen an M1 führten nicht zu einem optisch wahrnehmbaren Versagen.

Aufgrund der konstruktiven Ausführung war zu erwarten, daß an diesen beiden Stellen (M1 und M2) in etwa gleich hohe Belastungen auftreten. Allerdings zeigte sich schon bei den DMS-Messungen, daß dies nicht der Fall war. Da auch die FEM-Berechnungen markante Unterschiede an dieser beiden Stellen zeigten, wurde nach den Ursachen an diesen Stellen gesucht. Die detaillierten mechanischen Betrachtungen zeigten, daß die Ursache in der versteifenden Wirkung des Gelenkes zu suchen war. Bei der Konstruktion dieses Bauteils war nicht erwartet worden, daß durch diesen konstruktiv hervorgerufenen Steifigkeitssprung eine zu hohe Belastung an den geschweißten Verbindungsstellen auftreten könnte. Somit ließen sich die Beanspruchungen in Verbindung mit möglichen Schweißspannungen auf der Oberseite des Bauteils erklären.

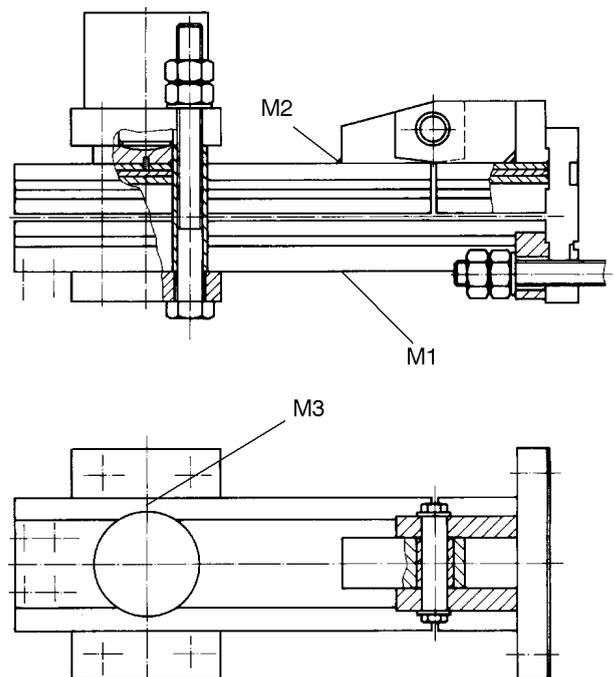


Bild 4: Holzspänepresse, Darstellung der DMS-Meßstellen

Bei der Analyse und dem Vergleich der Meßergebnisse aus den DMS-Versuchen und den numerischen Berechnungen stellte sich heraus, daß lediglich Abweichungen zwischen dem experimentellen Verfahren und den numerischen Berechnungen von ca. 7% auftraten. Aus dem Vergleich der bei-

den Verfahren konnten die Tendenzen der Beanspruchungen und der Beanspruchungsverläufe abgeleitet werden. Damit war sichergestellt, daß die Annahmen bei der Krafteinleitung und der Befestigung (Randbedingungen) bei den FEM-Berechnungen richtig ausgewählt worden waren. Mit dieser Bestätigung konnten weitere FEM-Simulationen zur Bauteiloptimierung durchgeführt werden, ohne daß neue experimentelle Betriebsversuche notwendig waren.

6 Bauteiloptimierung

Hervorgerufen durch den Spannungsunterschied zwischen den Meßstellen M1 und M2, wurde der Einfluß der Versteifung auf die Festigkeit der Konstruktion gezeigt. Diese Versteifung führt nicht, wie zunächst angenommen zu einer Erhöhung der Belastbarkeit der Konstruktion, sondern zu einer Schwächung. Um die Beanspruchungen zu senken, mußte auf eine verformungsweichere Gestaltung übergegangen werden.

Mit Hilfe der in den Betriebsversuchen ermittelten Dehnungen konnte die FEM-Berechnung verifiziert und optimiert werden. Die weiterführenden Simulationen wurden mit 3 verschiedenen Gelenkgestaltungen (zwei schräge und eine ausgerundete) durchgeführt. Dabei ergaben die beiden schrägen Gelenkseiten fast keine Verbesserung in der Spannungshöhe und in deren -verteilung an der Stelle M2. Das ausgerundete Gelenk hingegen hat erwartungsgemäß zu einer Minderung der auftretenden Spannungen und zu einer Abflachung deren Verläufe geführt. Die Ausführung des Gelenkes als ausgerundetes Element führte durch den kontinuierlichen Wandstärkeübergang mit geringerer Kerbwirkung zu deutlich besseren Ergebnissen (**Bild 5**).

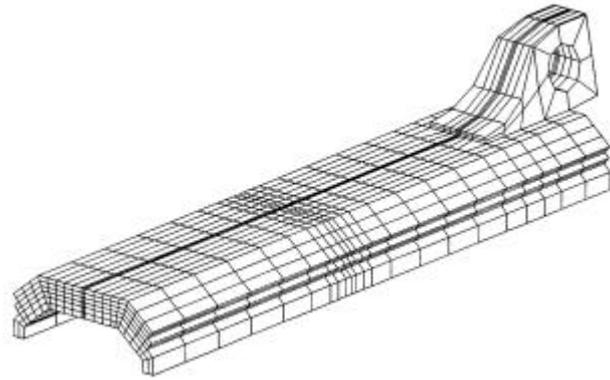


Bild 5: Optimierte Geometrie mit schrägen Seitenwänden und großzügiger Verrundung im Schweißnahtbereich des Gelenkes

7 Zusammenfassung

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen zeigten sich gute Übereinstimmungen zwischen den DMS-Betriebsmessungen und den numerischen Simulationen mit der FE-Methode. Anhand der fast identischen Ergebnisse (Abweichung von 5% - 10% zwischen den beiden Methoden), konnte die numerische Berechnung verifiziert werden.

Die Kopplung von FEM-Simulation mit den DMS-Messungen ermöglicht sowohl eine Plausibilitätspüfung der Messungen, als auch eine Bestätigung der bei den Berechnungen vorgenommenen Annahmen und Randbedingungen. Dieses Vorgehen empfiehlt sich besonders bei komplexen Bauteilen und stellt die Basis für eine schnelle und zuverlässige Bauteiloptimierung dar.

8 Literatur

- /1/ Buck, K. E.; Scharpf, D.W.; Stein E.; Wunderlich, W.: Finite Elemente in der Statik, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1973
- /2/ Hoffmann, K.: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen, Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Darmstadt, 1987

Probability for probabilistic criteria - Design with brittle materials

Rubio Eire, M. D.

Designing with ceramic materials is nowadays a very good solution for specific technical problems, but it has also several great handicaps. First problem is the necessity to use numerical methods for a good application of resistance theory to brittle materials. Second one is to achieve a correct interpretation and use of their characterisation parameters. The KERB program, a FEM subprocessor developed at the IMW, offers a solution to both of them

Heute bieten keramische Werkstoffe in Konstruktionen sehr gute Lösungsmöglichkeiten für spezifische technische Anwendungen. Es gibt aber auch einige wesentliche Nachteile. Erstens müssen numerische Methoden für die Anwendung der Festigkeitstheorie spröder Werkstoffe verwendet werden. Zweitens muß eine korrekte Interpretation und Verwendung der charakteristischen Parameter erreicht werden. Das KERB-Programm ist ein FEM-Subprozessor und wurde am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal entwickelt und bietet Lösungen für beide Probleme.

1 Design with ceramic materials

Ceramics offer nowadays different advantages in relation with metals and organic materials. This causes that this kind of materials are everyday more important for technology applications in multiple fields /1/ due to their multiple advantages as low thermal expansion, resistance to high temperatures, lower density, higher corrosion and erosion resistance, higher toughness and lower thermal conductivity.

Despite the numerous advantageous properties of engineering ceramics, designers still hesitate to use them for load bearing applications. The main subjective reason seems to lie in the different methodology, based on probabilistic fracture mechanics, which is required for designing with brittle as opposed to conventional, ductile materials.

Ceramics are prone to brittle failure due to their intrinsically high yield strength and low fracture toughness. Their inability to relax stress concentrations

at the tips of microscopic surface or volume flaws can result in any one of these flaws propagating catastrophically in an uniform tensile stress field.

Failure of ceramic components is caused by unstable extension of natural crack-like defects, which are always present due to manufacturing and surface treatment. These defects are responsible of the brittle behaviour of ceramics. A crack behaves as a stress concentrator that creates a stress state in the material much more higher that it would suffer as a ductile one.

Assuming that a component fails if any one flaw initiates fracture (the weakest link hypothesis), and that there is no interaction between flaws, the probability of failure P_f , equals to the probability of encountering at least one destructive flaw in the component. If the component is divided in N subvolumes or surfaces, the probability of survival would be:

$$P_s = (1 - P_{fi})^N \cong \prod_{i=1}^N \exp(-P_{fi}) = \exp\left(-\sum_{i=1}^N P_{fi}\right)$$

$$= \exp(R_f) \quad (1)$$

or what would be equivalent

$$P_f = 1 - \exp\left(-\frac{1}{V_0} \int_v \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m dV\right) \quad (2)$$

Where R_f (risk of failure) is the most probable number of destructive flaws, that means, their mean number in a large set of identical components. This is obtained by integrating the local density of destructive flaws over the volume assuming that flaws of different length are uniformly distributed over the volume.

It can be shown /2/ that any distribution of flaw lengths which for a $\rightarrow \infty$ converges towards zero as fast as a^{-k} , where k is any constant, leads to the Weibull distribution of strength

$$P_f = 1 - \exp\left(-\frac{1}{V_0} \int_V \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m dV\right) \quad (3)$$

with the Weibull modulus m , σ_0 the characteristic stress, σ_u the minimum stress where no failure component occurs (usually set to zero in the experimental characterisation) and V_0 a certain reference or unit volume. The integration should be made only in those regions of the component under tension, but it has been proved thea compression can also generate a local risk of failure.

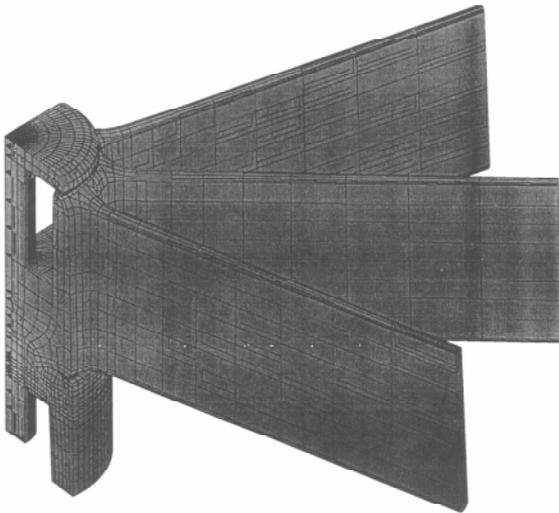


Figure 1: Ceramic ventilator calculated with KERB

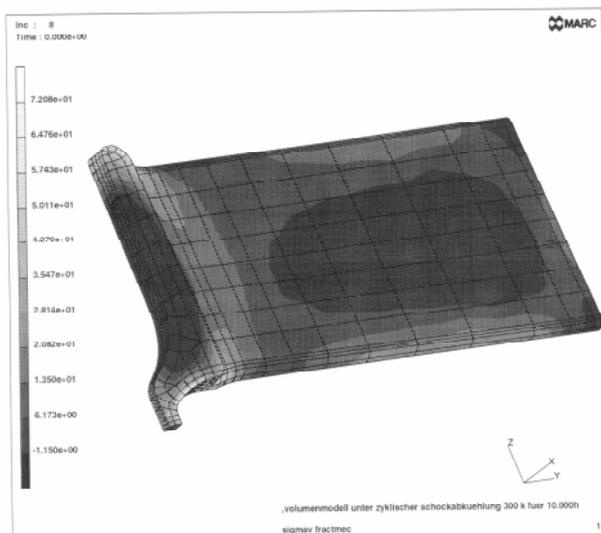


Figure 2: Ceramic ventilator calculated with KERB

2 Use of the subroutine KERB

Nowadays to calculate the resistance of ductile components it is necessary its calculation through FEM programmes, due to the complex multiaxial stress state which suffer when loaded, it is even more necessary to apply its potential to brittle materials. Commercial powerful FEM programmes offer the user the possibility to run his own private calculations in each integration point, with the data calculated by the programme as tensions, deformations, temperature.... This possibility was used in the IMW to develop a subprocessor programme which enables the user to calculate the Risk of failure associated to each integration point, according to the material data provided by the user. These calculations are run at the same time as the FEM job with a special subroutine (KERB)

The different fracture criteria could be resumed in two main groups, first of all, phenomenological criteria, based in experimental results, and second one, Fracture Mechanic's criteria based, as its own name says in the Fracture Mechanic theory. Both types are implemented in this subprocessor.

Both of them need the stress state in each point of the component, to calculate with it the resultant risk of failure associated to each integration point. Obtained the complete risk of failure of the piece the calculation of the Probability of failure is a direct result of it.

Those criteria can be applied not only to static load cases (contact, mechanical, thermal or coupled jobs) but also to cases where loads act over the piece during different time intervals and even to fatigue cases.

Apart from the Risk of failure fields for different criteria, the programme allows the user to calculate another important variable, the intensity of failure, variable which minimise the meshing size influence which could distort local results, and as said before, offers also global data as the probability of failure for the whole component, and a security design factor, taking as reference a desired P_f given by the user.

The use of subroutine KERB assures a high degree of confidence for the results as it has been thoroughly checked.

3 Data scattering

The aim of this stay was to find a way to reflect in a numerical method the experimental characterisation of this kind of materials and also its usual parameter scattering.

The first goal was to find a way to calculate uniaxial parameters used in the characterisation of ceramics (eq. 3), usually, the characterisation of these is done using the experimental data obtained for three or four-point-bending tests /3/ with a quite diverse geometry and stress state from what a uniaxial case would be, these data are translated into uniaxial data using geometrical integrals quite difficult and most times impossible to calculate in a theoretical way /4/.

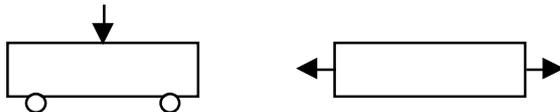


Figure 3: Equivalence of experimental characterisation

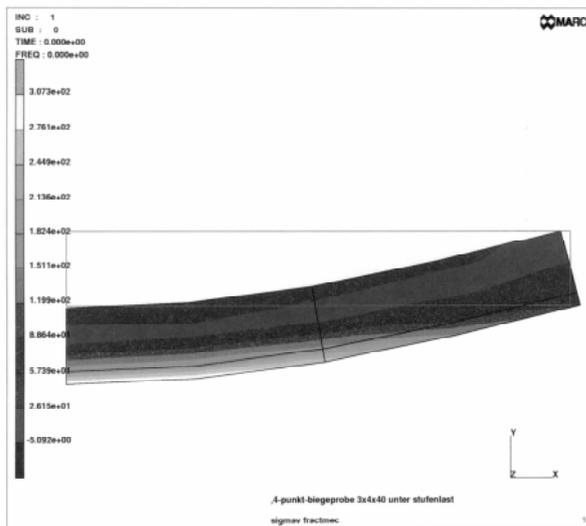


Figure 4: 3-point testing bar equivalent tension, calculated with KERB

The programme KERB has been modified along this stay to calculate the uniaxial equivalent data, running under a experimental card, based in the experimental data given by the user. Now the user can indicate in the input card that he wants to run his FEM model as an experimental case (that indicates the programme that the user is given experimental data $\langle m_{exp}, \sigma_{\theta} \rangle$ and not characteristic values

$\langle m, \sigma_{\theta} \rangle$) and the programme will return, based in the geometry, stress state and experimental data of the FEM job, the uniaxial equivalent characterising values needed to work with the material for general purposes design. To calculate them, the programme uses basically a normalised integral of the FEM model and bases its theoretical background in the equations:

$$m = m_{exp} \tag{4}$$

$$V_{ef} = \frac{1}{\sigma_{max}^m} \int_V \sigma^m dV \tag{5}$$

$$\sigma_0 = \sigma_{\theta} \sqrt[m]{\frac{V_{ef}}{V}} \tag{6}$$

Being V the unit volume considered as representative for the material (V_0) and V_{ef} the equivalent uniaxial volume for the experimental run as flexure one.

Another well known problem is the scattering of the experimental data due to the material production. To resume it in a simple way, although the characterisation of ceramics is done with a certain number of tests, this set of tests is run usually with a kind of material produced in a short period of time. Their properties vary depending strongly on the production process, so if the experimental characterisation is run with a set of probes all produced in a short term of time, it could be assumed that they are produced in the same way with almost the same properties ($m_{exp1}, \sigma_{\theta1}$), but perhaps the same characterisation run a coupled of weeks later would offer as result a complete different pair of experimental characterising data ($m_{exp2}, \sigma_{\theta2}$).

That should drive to calculate ceramic characteristic properties not only like a simple pair of experimental data (m_{exp}, σ_{θ}) but to consider them as probabilistic data themselves (although they have been calculated through a proper statistical process) given by its media and variance. They would follow a normal distribution quite common for the material characterisation data depending on production variables, and could be supposed as independent ones, although this will be checked with a future experimental procedure.

It should be possible to obtain the estimated media and variance for each of them (supposing they followed a normal distribution) equalling them to their

estimators (to accept the estimator of the variance as correct it will be necessary to have a number of data relatively high as it has a deviation of $-\sigma^2/N$) /5/:

$$\mu = \bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} \quad (7)$$

$$\sigma^2 = s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (8)$$

With this data uniaxial characterisation (m, σ_0) of the population is found and also two normal distributions with their media and variance for (m, σ_0). The programme KERB has been modified to enable the user to introduce, as external data, couples of values (m_i, σ_{0i}) (that could be calculated with ($m_{\text{expi}}, \sigma_{0i}$)) through the simple geometrical integral mentioned before with a previous run). With them it calculates their media and variance, considering them as independent variables (fact that should be checked in future experimental studies as it was mentioned before).

The supposed distribution followed by each of them, would be a normal distribution quite usual for experimental results depending on scattering variables as production ones, and those distributions can be easily normalised as:

$$\alpha_m = \frac{m - \bar{m}}{\sigma_n}$$

$$\alpha_{\sigma_0} = \frac{\sigma_0 - \bar{\sigma}_0}{\sigma_{\sigma_0}} \quad (9)$$

Or what would be equivalent:

$$m = s_m \alpha_m + \bar{m}$$

$$s_0 = s_{s_0} \alpha_{s_0} + \bar{\sigma}_0 \quad (10)$$

With this data it will be possible to calculate for any ceramic material not only the P_f of the FEM job but its media and variance depending on the media and variance of their material properties.

Based in a Taylor's approximation of any function:

$$f(x) \cong f(x_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_0} (x - x_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{x_0} (x - x_0)^2 + \dots \quad (11)$$

This expression could be applied to a general function, depending on several independent variables considered them normalised as done through eq. 9 /6/:

$$F(x_i) \cong F(x_{0i}) + \sum F_i^I \alpha_i + \sum \sum \frac{1}{2} F_{ij}^{II} \alpha_i \alpha_j \quad (12)$$

In this case all this mathematical process was applied to the P_f depending on the characteristic properties of ceramics (m, σ_0), and could be used to calculate through it the media and variance of the function.

Taking the complete expression of the P_f :

$$P_f(m, \sigma_0) = 1 - \exp(-R_f(m, \sigma_0)) = P_f(\alpha_m, \alpha_{\sigma_0}) \quad (13)$$

and the Taylor expression (eq. 7), it is possible to express the media and variance of P_f , with the previous normalisation of the variables (m, σ_0). The value of the media is, as it would be expected:

$$P_f^0(m, \sigma_0) = P_f(\bar{m}, \bar{\sigma}_0) \quad (14)$$

To calculate the covariance of the P_f it was used an approximation till the first derivative term, due to the complexity of the operation and to be this work a first display of the problem

$$\text{Var}(P_f) = E\left[(P_f - P_f^0)(P_f - P_f^0)^T\right] = \sum \sum P_{\alpha_i}^I P_{\alpha_j}^I E(\alpha_i \cdot \alpha_j) \quad (15)$$

Taking the two possible normalised variables ($\alpha_m, \alpha_{\sigma_0}$) the expression would result as:

$$\text{Var}(P_f) = (P_{\alpha_m}^I)^2 E(\alpha_m \cdot \alpha_m) + P_{\alpha_m}^I P_{\alpha_{s0}}^I E(\alpha_m \cdot \alpha_{s0}) + (P_{\alpha_{s0}}^I)^2 E(\alpha_{s0} \cdot \alpha_{s0}) \quad (16)$$

to evaluate the value of :

$$E(\alpha_m \cdot \alpha_{s0}) = E(\alpha_m)E(\alpha_{s0}) + \text{Cov}(\alpha_m, \alpha_{s0}) \quad (17)$$

it was supposed that α_m and α_{s0} act as independent variables, thing that will have to be checked in a experimental way. That means that the term $\text{Cov}(\alpha_m, \alpha_{s0})$ was supposed as null.

So the implemented expression was:

$$\text{Var}(P_f) = (P_{\alpha_m}^I)^2 E(\alpha_m)^2 + P_{\alpha_m}^I P_{\alpha_{s0}}^I E(\alpha_m)E(\alpha_{s0}) + (P_{\alpha_{s0}}^I)^2 E(\alpha_{s0})^2 \quad (18)$$

With this expression the programme was able to calculate the variance and media of the global probability of failure of any component run with a FEM programme, depending on the media and variance of (m, σ_0) .

Being the different terms in the previous expression:

$$P_{\alpha_m}^I = \sigma_m P_m^I$$

$$P_{\alpha_{s0}}^I = \sigma_{s0} P_{s0}^I \quad (19)$$

and

$$P_{s0}^I = -m \cdot R_f \cdot \exp(-R_f) \quad (20)$$

$$P_m^I = \exp(-R_f) \cdot \left(\frac{1}{V_0 4\pi} \right) \int_V \int_{\Omega} \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma} \right)^m \ln \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0} \right) d\Omega dV \quad (21)$$

4 Conclusions and Resume

The first part of the changes introduced during this stay, the calculation of the characteristic properties $\langle m, \sigma_0 \rangle$ taking as basis $\langle m_{exp}, \sigma_{\theta} \rangle$, offers a power-

ful way to calculate characteristic variables of ceramics through a simple implementation of the geometry and load case for any experimental geometry case. The integrals run by the programme will be quite handy for experimental characterisation and enables a quite fast and powerful way to translate experimental results to theoretical ones, thing that can be very useful for people working in this field.

The calculation not only of the P_f of a component but its variance, depending on the scattering of the variables (m, σ_0) , will make possible to calculate ceramic components taking into account the different production circumstances given usually during the production of a set of components, this seems really important when the actual experimental characterisation of ceramics, produced supposedly with the same material, shows a wide scattering depending on slight changes in the production variables.

Initial checks show quite possible the concordance between experimental and numeric results, but it will be necessary to run experimental results to get a thorough stochastic comparison of the model.

5 Acknowledgements

The Author would like to thank the TMR-Programme for the opportunity to come to the IMW, Clausthal, to develop the numerical part of the work through its COPES programme.

6 Bibliography

- /1/ W. Kollenberg, Rheinbach. Stand und Entwicklungspotential der Technischen Keramik
- /2/ Thiemier, T.: Lebensvorhersage für keramische Bauteile unter mehrachsiger Beanspruchung, Diss. Universität Kalsruhe, 1989
- /3/ Standard Practice for Reporting Uniaxial Strength Data and Estimating Weibull Distribution Parameters for Advanced Ceramics. ASTM, C 1239-95
Monolithische Keramik Mechanische Prüfungen bei Raumtemperatur. DINV ENV (843-5) (1997)
- /4/ Discrimination of Multiaxiality Criteria with the Brazilian Disc Test. Journal of the European Ceramic Society 17, p 689-696, 1997 A. Brückner-Foit, T. Fett, D. Munz & K. Schirmer.

On the contribution of Notches to the Failure Probability of Ceramic Components. Journal of the European Ceramic Society 16, p 1027-1034, 1996 A. Brückner-Foit, A. Heger, D. Munz.

/5/ A. Norte Checa. Estadística teórica y aplicada. Ed. Santiago Rodriguez, S.A., 1987. pp 482-483.

/6/ J. A. Bea Cascarosa. Tesis Doctoral 1996. Univ. de Zaragoza

Die Anwendung der Feature-Technologie im Konstruktions-Informationssystem

Beisheim, N.; Müller, N.

Der Aufbau von Konstruktions-Informationssystemen als wissensbasierte Systeme erfordert eine durchgängige Strukturierung der Daten. Mit Verknüpfung von Daten wie Fertigungsparametern, Toleranzen und Werkstoffdaten an die Formgeometrie eines Bauteils spricht man von Feature-Technologie. Informationssysteme werden heute für viele Bereiche entwickelt, um Erfahrungswissen nachgelagerter Bereiche schon in frühen Phasen der Konstruktion von Produkten berücksichtigen zu können. Ein neuer Aspekt des hier vorgestellten Systems ist die Integration von Methodendaten in das Feature.

Construction information systems as knowledge-based systems require a constant structure of the data. With linkage of data such as manufacturing parameters, tolerances and material data to form geometry of a component one speaks of feature technology. Information systems are developed today for many areas, in order to be able to consider know-how of stored areas already in early phases of the design of products. A new aspect of the system is the integration of method data into the feature.

potential an Iterationen und somit an Zeit und Kosten ist schematisch dargestellt.

Eine weitere Möglichkeit zur Verkürzung der Prozesskette ist die Akquirierung von Erfahrungswissen über den gesamten Entwicklungs- und Fertigungsprozeß hinweg. Dieses Wissen wird aufbereitet, in einer Datenbasis gespeichert und steht jedem an der Entwicklung oder Fertigung eines Produktes beteiligten Firmenbereich zur Verfügung. Für die Nutzung eines solchen Erfahrungsspeichers ist die durchgängige Verknüpfung der Daten unerlässlich. Erst dadurch wird aus den Einzeldaten wie Qualitätsmeßwerte, Fertigungstechnologiedaten oder Methodenparameter spezifisches Wissen. Wird dieses Wissen der nachfolgenden Bereiche dem Konstrukteur schon in frühen Phasen seiner Arbeit zur Verfügung gestellt, kann er die Auswirkungen

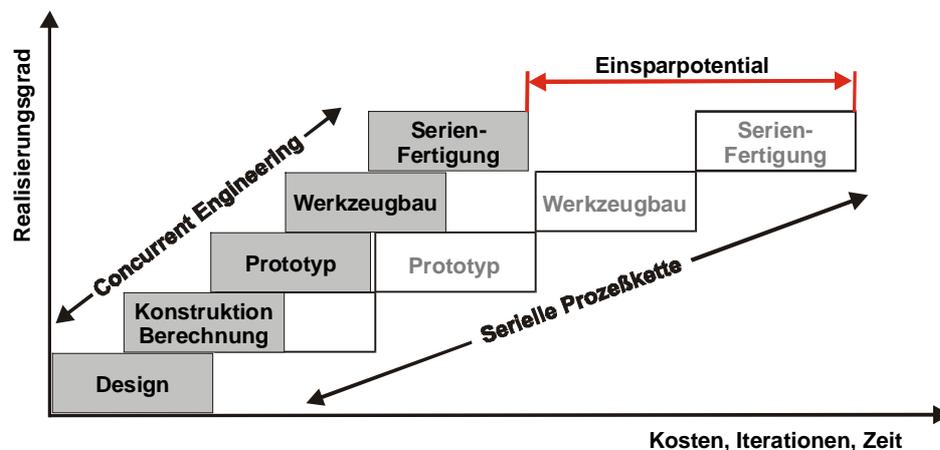


Bild 1: Potential von Concurrent Engineering

1 Einführung

Eine der wichtigsten Anforderung an den Produktionsprozeß heutzutage ist die Verkürzung der Zeit zwischen Konstruktionsbeginn bis zur Fertigung eines Produkts. Ansätze zur Verkürzung der Prozesskette bietet das Simultaneous Engineering oder auch Concurrent Engineering, bei dem verschiedene Arbeitsgänge, die traditionell sequentiell abgearbeitet werden, möglichst parallel arbeiten wie in **Bild 1** dargestellt. Diese Arbeitsform stellt sehr restriktive Anforderungen an die interdisziplinäre Zusammenarbeit der daran Beteiligten. Das Einspar-

seiner Entscheidungen auf die weitere Realisierung des Produkts sehen.

Das hier vorgestellte Konstruktions-Informationssystem geht über konventionelle Ansätze hinaus. Der Konstrukteur wird nach der Auswahl der Technologien, der Werkzeuge zur Fertigung und dem Werkstoff über die zu erwartende Maßtoleranzen nach der Herstellung informiert. Er kann somit entscheiden, ob die zu erwartende Toleranz die Funktionserfüllung des Bauteils einschränkt oder sogar verhindert.

Das am Institut für Maschinenwesen im Rahmen eines Forschungsvorhabens erstellte Konstrukti-

ons-Informationssystem erfüllt die Aufgabe, den Konstrukteur bei der Frage der optimalen Gestaltung von tiefgezogenen Blechbauteilen zu unterstützen.

Der Anwender des Systems kann nach Auswahl des Geometrie-Grundelementes aus der Datenbasis die zur Fertigung dieser Elemente benötigten Verfahren mit den Betriebsmitteln, Werkzeugen, Schmiermitteln kombinieren. Die noch verbleibenden Parameter wie die Fertigungsparameter Ziehkraft, -geschwindigkeit usw. werden vom Programm durch formelmäßige Zusammenhänge ermittelt. Die Daten über Prozesse, Verfahren, Methoden etc. beim Tiefziehen sind als Objekte in den Prototyp integriert worden. Sie bilden also die Wissensbasis des Systems, die fortlaufend mit neuen Datensätzen erweitert werden kann.

Wurden im Prototyp die restlichen Maße für die Geometrie festgelegt bzw. berechnet, kann der Konstrukteur diese akzeptieren und sie in das CAD-System übernehmen. Durch die einzugebende Zuordnung der Daten in der Datenbasis untereinander und zur Geometrieform ist die Gestalt des Tiefziehteils auf diese Weise mit allen Fertigungs- und Werkstoffinformationen verknüpft. Man spricht dann von Feature-Daten.

So kann z.B. unter Einbeziehung von vortrainierten künstlichen neuronalen Netzen (KNN) in das konstruktionsunterstützende System die Rückfederung nach dem Tiefziehvorgang, die sich als Maßtoleranzen auswirkt, für ein Teil vorherzubestimmt werden [1]. In Abhängigkeit der Feature-Geometrie, Werkstoff, Betriebsmittel etc. werden auf Grund des Prozeßverhaltens die Toleranzen vorherbestimmt. Dieser Wert kann dann mit in die Datenbasis übernommen und als Toleranz-Semantik mit dem Form-Feature zum Feature verknüpft werden. Liegt die Rückfederung außerhalb des durch die Funktion des Bauteils vorgegebenen Toleranzbereichs, dann muß der Konstrukteur mittels Auswahl neuer Technologien oder Werkstoffe den Fertigungsprozeß

optimieren.

Die Einbeziehung der Vorhersage der Fertigungstoleranz in diesen Prozeß bringt dem Konstrukteur einen entscheidenden Vorteil zur Verkürzung der Prozeßkette :

Er kann durch die Anwendung des Systems davon ausgehen, daß das Bauteil, das er konstruiert und für das er die anderen Randbedingungen wie Werkstoff, Technologie und Fertigungsparameter festgelegt hat, auch als Realteil die vom System vorherbestimmte Fertigungstoleranz besitzt. Mit diesem Prototypen kann nun die Optimierung der Bauteilgeometrie unter geometrischen, fertigungstechnischen und werkstofflichen Gesichtspunkten erfolgen. Der Konstrukteur ist dadurch in der Lage, den iterativen Vorgang der Gestaltoptimierung eines Produkts zwischen den Bereichen Konstruktion und Fertigung zu verkürzen oder sogar zu vermeiden.

2 Feature-Technologie

Die Feature-Technologie ist eine Methode zur Verknüpfung von Geometrie und nichtgeometrischen Informationen wie in **Bild 2** dargestellt. Die Definition von „**Feature = Geometrie + Semantik**“ macht deutlich, daß erst durch die datentechnische Verbindung der Geometrieform mit den übrigen Daten wie Fertigungsparameter, Toleranzwerte, Werkstoffdaten oder Berechnungsmethoden ein System aller Produktdaten als integriertes Produktmodell entsteht. Mit Semantik werden sämtliche Daten bezeichnet, die mit einer bestimmten Geometrie verknüpft werden. Die angefügte Semantik ist abhängig vom Ziel, das mit dem Feature verfolgt werden soll und kann so z.B. konstruktionsorientiert, ferti-

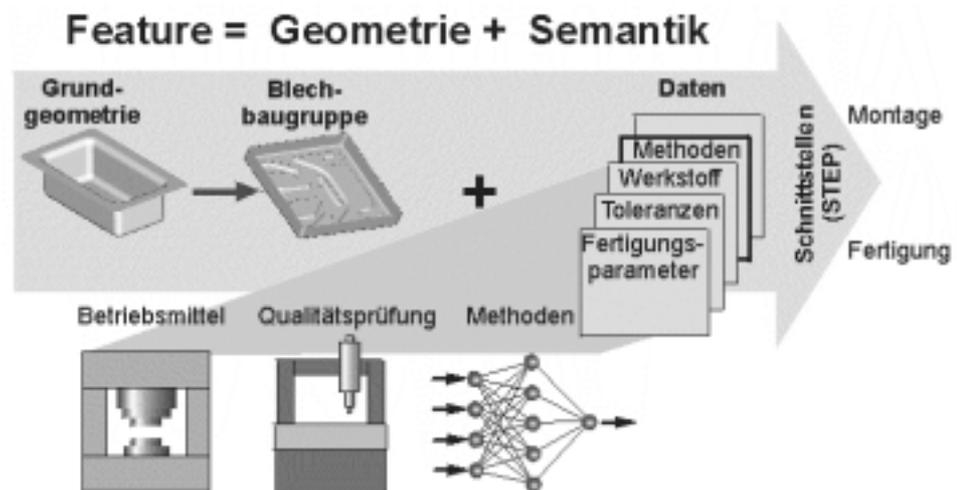


Bild 2: Darstellung der Feature-Technologie

gungsorientiert, montageorientiert oder qualitätsorientiert sein /7/. Bei der Entwicklung des hier vorgestellten Konstruktions-Informationssystems hat sich gezeigt, daß Feature-Technologie besonders bei der Einbeziehung von Methodenwissen in ein solches System sehr vorteilhaft ist /3/. Gerade die Anwendung von Methoden wie neuronale Netze oder Fuzzy Logic macht die restriktive Zuordnung der Input-, Output- und Methodenparameter des jeweils eingesetzten Werkzeugs zur Geometrieform erforderlich.

Durch die Strukturierung der in der betrieblichen Praxis vorliegenden umfangreichen Daten in den einzelnen Unternehmensbereichen wie Qualitätssicherung (Geometriemaße, Toleranzen etc.) und Arbeitsvorbereitung (NC-Programme, Maschinenparameter etc.) lassen sich diese durch eine Strukturierung mittels Feature-Technologie über Abteilungsgrenzen hinweg als firmenspezifisches Erfahrungswissen nutzen.

Die Vorteile für die Bauteileentwicklung durch Feature-Technologie sind :

- Durchgängige Semantik der Daten, Methoden und Informationen über den gesamten Konstruktions- und Entwicklungsprozeß hinweg
- Strukturierung der Daten und Sachmerkmale mit den zugehörigen Geometrieformen bei Bauteilen und -gruppen
- Datenhaltung von Information und Wissen zur Geometrie
- Möglichkeit zur Einbindung der Feature-Technologie in Applikationen über normierte Schnittstellen z.B. STEP
- Datenhaltung über den Produktlebenszyklus von Bauteilen
- Aufbau von Katalogen mit Geometrie und Semantik
- Verbesserung der Kommunikation zwischen Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Fertigung
- Änderungen bzw. Ergänzungen der Semantik lassen sich mit einem Editor am Feature durchführen
- Standardisierung von Konstruktions- und Fertigungsinformationen

Ein weiterer Vorteil der Feature-Technologie liegt in der Einbindung von Methodenwissen an die Geometrie. Durch die verstärkte Anwendung der rech-

nerunterstützten Methoden zur Auslegung und Dimensionierung von Bauteilen im Bereich der Produktentwicklung z.B. Festigkeitsberechnungen, FEM und der Vorhersage von Verhaltensmustern von Bauteilen wird es erforderlich, die entsprechenden Informationen und Daten in einem durchgängigen System zu verwalten. Die so gespeicherten Informationen können den am integrierten Prozeß beteiligten Personen zur Verfügung gestellt werden.

Ein Beispiel für eine solche Integration von Methodenwissen und Geometrie-Feature ist das hier vorgestellte Konstruktions-Informationssystem zur Vorhersage einer Fertigungsmaßtoleranz.

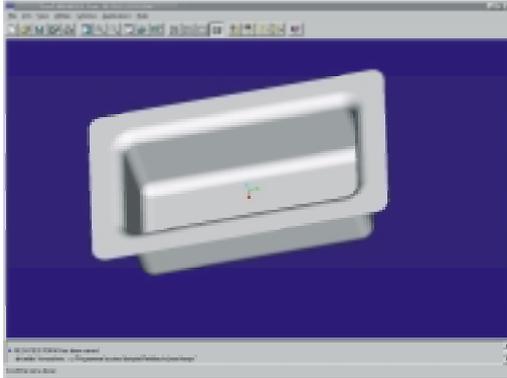
Der Tiefziehvorgang von Blechen ist ein sehr komplexer Umformvorgang. Durch die Elastizität der Bleche kommt es zur Rückfederung nach dem Umformprozeß und damit zu Abweichungen der Ist- von der Sollgeometrie, die durch iteratives Vorgehen mit Änderung der Prozeßparameter, Toleranzen und/oder der Werkzeuggeometrie beseitigt wird. Diese Größen beeinflussen die Spannungen, Formänderungen und Oberflächenbeschaffenheit während des Tiefziehvorgangs zeitlich und örtlich verschieden.

Es gibt deshalb kaum gesicherte Methoden zur Vorherbestimmung der Parameter für das optimale Ergebnis eines Tiefziehteils. Deswegen sind auch heute noch iterative Schritte zur Ermittlung der Parameter nötig. Vom Erfahrungswissen des Maschinenbedieners, Formbauers und Blechkonstrukteurs ist die Anzahl der Iterationen und damit die Länge der Rüstzeit des Umformprozesses abhängig.

Ein neuer Ansatz ist die Vorherbestimmung der Parameter mit Hilfe trainierter künstlicher neuronaler Netze. Mit dieser Methode können iterative Schritte eingespart und Entwicklungszeit bis zur Produktionsreife verkürzt werden. Die genaue Vorgehensweise zur Umsetzung der Methode zur Vorhersage der Rückfederung von Tiefziehteilen ist in /1/, /2/ und /6/ erläutert.

Allgemeine Informationen über künstlichen neuronalen Netze sind in /4/ und die konkrete Anwendung der KNN bei der Methode zur Vorhersage der Rückfederung von Tiefziehteilen ist in /1/ beschrieben. Die Möglichkeiten der Verschachtelung solcher Netze zur Lösung komplexer Aufgaben ist in /5/ dargestellt.

Einbindung des Konstruktions-Information-System in das CAD-System (1)



Auswahl der Grundgeometrie (2)

Einlesen der Geometriemaße (8)

Geometrieauswahl

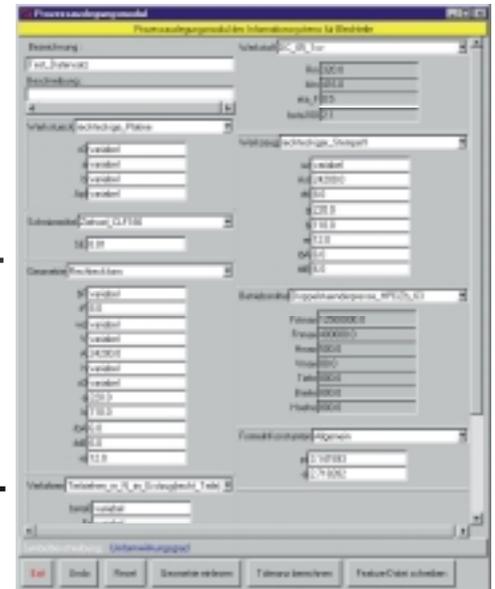
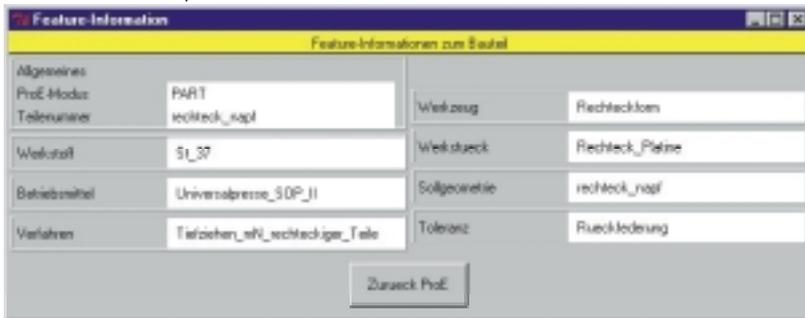


Ausgabe der Geometrie- und Feature-Informationen im CAD-System (10)

Funktionsgeometrie-daten (3)

Prozeßauslegung (4)

Geometrie-daten (8)



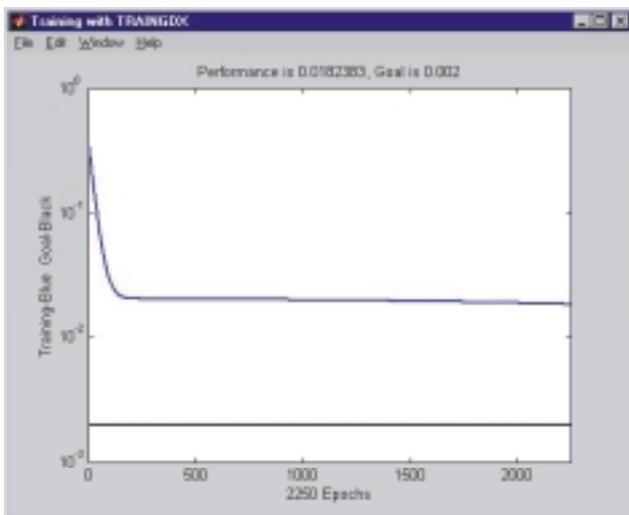
Feature-Informationen (9)



Bestimmung KNN (5)

Bestimmung der Rückfederung durch KNN (7)

Training und Verifizierung der KNN



Parameter der KNN (6)



Bild 3: Struktur und Bildschirmfenster des Konstruktions-Informationssystems Feinblech

3 Aufbau und Struktur des Konstruktions-Informationssystems

Das System verbindet die einzelnen Werkzeuge CAD-Programm, Prozeßauslegung, Datenbanktechnik und KNN zu einem konstruktionsunterstützenden Gesamtsystem. Die Struktur ist in **Bild 3** dargestellt. Die Nummer in den Klammern zeigt das jeweilige Bildschirmfenster bzw. die Operation des Systems an. Wegen der Übersichtlichkeit der Darstellung sind nur die wesentlichen Fenster abgebildet.

Der Einstieg zum System erfolgt im CAD-Programm ProE (1). Möchte der Konstrukteur ein Tiefziehteil entwickeln, sucht er aus einer Datenbank mit Hilfe eines Klassifizierungsschlüssels ein geometrisch ähnliches Teil (2). Bei diesem Teil legt er dann in einer Eingabemaske mit sämtlichen parametrisierten Geometriemaßen die für die Funktion des Bauteils erforderlichen Maße fest (3). Die anderen Maße werden danach in dem Prozeßauslegungstool (4) z.B. durch die Wahl bestimmter Werkzeuge (Stempel und Niederhalter) festgelegt. Hier werden nun auch die anderen Parameter wie Werkstoff, Verfahren, Betriebsmittel, Schmierzustand beim Tiefziehen und Werkstück (Platine) bestimmt.

Sind nun alle Parameter ausgewählt, berechnet bzw. eingegeben, so besteht die Möglichkeit, Toleranzen festzulegen oder zu berechnen. Dazu ist in das Konstruktions-Informationssystem die Nutzung von KNN zur Bestimmung der Rückfederung als Längenänderung nach dem Tiefziehen integriert worden :

Das geeignete Netz wird anhand des Werkstoffs, der Geometrieform und Betriebsmittel automatisch ermittelt. Die benötigten Parameter werden dann ausgelesen oder abgefragt und dem Netz übergeben (5). Die KNN sind also in einem separaten Arbeitsschritt vorher anzutrainieren und zu verifizieren (6). Das Netz berechnet die Rückfederung und übergibt das Ergebnis der Rechnung an das Prozeßauslegungstool (7). Der Konstrukteur kann dann entscheiden, ob die berechnete Toleranz innerhalb der für die Funktion des Bauteils benötigten Toleranz liegt. Wenn nicht, sind die Verfahrensparameter, die im KNN genutzt werden, zu verändern und die Rechnung zu wiederholen, bis die Rückfederung innerhalb der Toleranz liegt.

Sämtliche semantischen Daten werden dann abgespeichert :

Die nun vollständig bestimmten Geometriedaten werden im CAD-System zur Regenerierung der Zeichnung verwendet (8), alle anderen Daten werden als Feature-Informationen mit der Geometrie verknüpft (9). Wird diese spezielle Geometrie wieder aufgerufen oder später in der Prozeßkette weiterverwendet, können die Feature-Informationen abgerufen und ausgewertet werden (10). Die zur Fertigung gehörenden Parameter wie Werkzeug, Werkstoff, Verfahren, Betriebsmittel, Schmierzustand und Werkstück sind dann bekannt, können aber auch ohne die Einbindung in das CAD-System in nachgelagerten Bereichen der Konstruktion verwendet werden.

4 Einbindung von Datenbank- und WWW-Technologie in das System

Um das Konstruktions-Informationssystem Feinblech noch flexibler und leistungsfähiger zu machen, wurden die Daten in einer Datenbank abgelegt. Der Zugriff auf die Datenbank kann mit WWW-Browsern plattformunabhängig durchgeführt werden wie in **Bild 4** dargestellt. Auf diese Weise ist das System auch in verteilter Produktentwicklungs-umgebung einsetzbar:

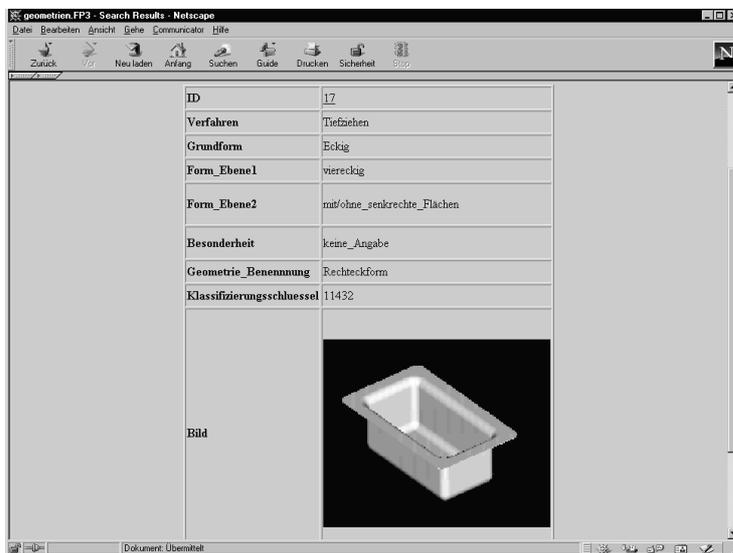


Bild 4: Ausgabeseite für die Geometrie im WWW-Browser

Aus der Arbeitsvorbereitung, Werkzeugbau, Fertigung und Qualitätssicherung werden die Betriebsmitteldaten, Verfahrensdaten und Geometriedaten in das Datenbanksystem über HTML-Seiten eingegeben. Für eine praxismgerechte Nutzung des Systems müssen alle Daten bzw. Features in der Datenbank abgespeichert werden können. Das Sy-

stem kann dazu mit einer durchgängigen Datenkette zwischen den Programm-Modulen, dem CAD-System, dem KNN und der Datenbank über Schnittstellen wie ODBC versehen werden. Die Gesamtstruktur des Systems ist in **Bild 5** dargestellt.

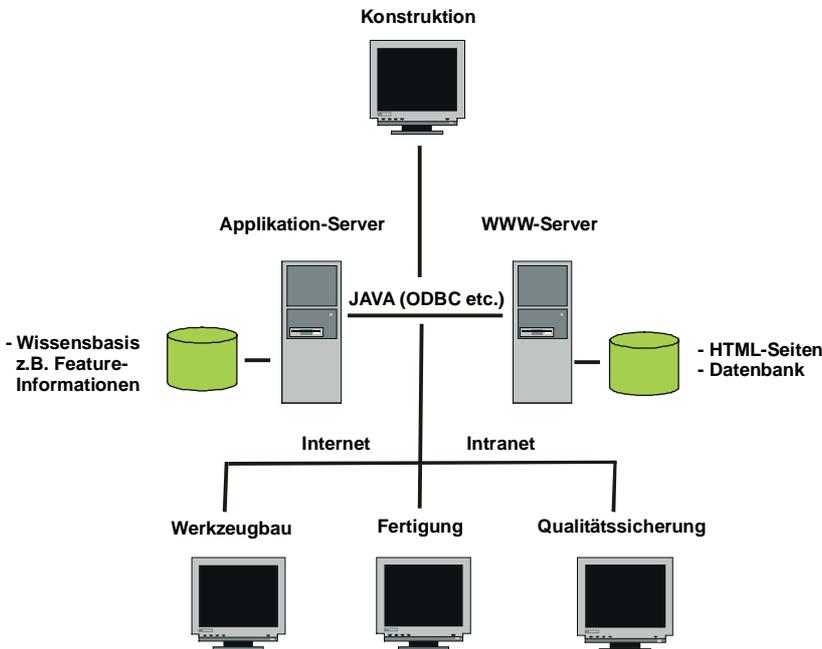


Bild 5: Anbindung des Informations-Systems an das WWW

5 Zusammenfassung

Es wurde ein Konzept zur Integration der Feature-Technologie in ein wissensbasiertes System zur Unterstützung des Konstrukteurs und Formbauers bei der Konstruktion von tiefgezogenen Blechbauteilen entwickelt und umgesetzt. Das System wurde an einer einfachen Grundgeometrie aufgebaut und verifiziert. Die Informationen für die Datenbasis des Systems entstammen den Bereichen Geometrie/Gestalt, Fertigungstechnologie und Werkstoff. Es wurde ein System erstellt, das die Optimierung der Geometrietoleranz der Bauteilgeometrie unter werkzeuggeometrischen, fertigungstechnischen und werkstofflichen Gesichtspunkten vornimmt. Der Konstrukteur hat dadurch ein Hilfsmittel, um den iterativen Vorgang der Gestaltoptimierung eines Produkts zwischen den Bereichen Konstruktion und Fertigung zu verkürzen oder sogar zu vermeiden. Die Basis dafür ist, daß er auf alle relevanten Daten aus den Bereichen Werkstoff, Verfahren, Fertigung, Werkzeuge etc. mittels der Datenbasis zugreifen kann und diese für ihn in geeigneter Weise aufbereitet sind.

Außerdem wurde mit dem Konstruktions-Informationssystem Feinblech ein System auf Basis

von Feature-Technologie mit der zusätzlichen Integration von Methodendaten in das Feature realisiert. Die Methodendaten entstammen in diesem Fall künstlichen neuronalen Netzen. Mit diesen wird die Rückfederung der tiefgezogenen Blechbauteile vorherbestimmt. Zusammen mit der Einbindung von Datenbank- und WWW-Technik ist so ein innovatives Werkzeug zur Unterstützung des Konstrukteur in frühen Phasen der Konstruktion von Tiefziehbauteilen entwickelt worden. Die Themengebiete für die Optimierung und Erweiterung des Systems sind :

- Komplexe Geometrien
- Vererbung von Features
- Verteiltes Arbeiten
- Durchgängige Datenbankfunktionalität

6 Literatur

- /1/ Heinen, F.; Tawil, M.: Untersuchung der Rückfederung tiefgezogener Bleche, Institutsmitteilung Nr. 23 (1998)
- /2/ Dietz, P.; Tawil, M.; Beisheim, N.: Arbeits- und Ergebnisbericht zum Projekt B4: Konstruktionssystematische Grundlagen für funktions- und produktionsgerechte Feinblechstrukturen, Arbeits- und Ergebnisbericht SFB 362 (1999)
- /3/ Müller, N.; Beisheim, N.: Finanzierungsantrag zum Projekt B12: Virtuelle verteilte Produktentwicklung von Blechbauteilen auf Basis der Feature-Technologie, Finanzierungsantrag SFB 362 (1999)
- /4/ Zimmermann, H.-J.: Neuro + Fuzzy : Technologien – Anwendungen, VDI-Verlag (1995)
- /5/ Beisheim, N.: Einsatz von neuronalen Netzen und Fuzzy Technologie in der vorbeugenden Störfallsimulation, Institutsmitteilung Nr. 24 (1999)
- /6/ Heinen, F.: Entwicklung einer Methodik zur Rückfederungsvorhersage an Tiefziehteilen, Dissertation, TU Clausthal (1998)
- /7/ VDI-Richtlinie 2218: Feature-Technologie, Hersg. VDI Düsseldorf (1999)

Stahlinformation und -auswahl mit den internetbasierten Systemen *Stahlikon* und *Starkit*

Große, A.

In diesem Artikel soll einleitend auf die Problematik des Werkstoffauswahlprozesses in der Produktentwicklung, der häufig durch Informationsdefizite gekennzeichnet ist, eingegangen werden. Danach wird die Implementierung der internetbasierten Systeme Stahlikon und Starkit erläutert sowie der Funktionsumfang und das Arbeiten mit den beiden Systemen näher beschrieben.

This article at first introduces into the problems of materials selection in product design. Lack of information is often characteristic for this selection process. After that, the implementation of the internetbased systems Stahlikon and Starkit is described as well as the functions and the use of both systems.

1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes "Rechnergestützte Stahlauswahlmethodik für Konstrukteure", das von der Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. gefördert wird, ist ein Informationssystem zum Thema Stahl (*Stahlikon*) und ein Auswahlssystem (*Starkit*), das den Konstrukteur zum "optimalen" Stahl für seine aktuelle Aufgabe führt, auf Internetbasis entstanden. Die nahezu abgeschlossenen Arbeiten sind unter der Web-Adresse www.stahlauswahl.de zu finden und können dort kostenfrei getestet und genutzt werden.

2 Werkstoffauswahlprozess

Der Werkstoff hat einen großen Einfluss auf den Erfolg eines Produktes. In vielen Fällen nehmen die Materialkosten über 50% der Produktgesamtkosten ein. Aufgrund der Vielzahl möglicher Werkstoffe für eine Konstruktion ist es schwierig, den technisch und wirtschaftlich besten Werkstoff herauszufinden. Für den Vorgang der Werkstoffauswahl stehen dem Konstrukteur häufig keine Hilfsmittel zur Verfügung. Zur korrekten Auswahl benötigt der Konstrukteur zahlreiche Informationen über Werkstoffe, die ihm wegen der oben erwähnten Vielfalt gezielt und gefiltert präsentiert werden müssen. Erschwerend kommt hinzu, dass durch die Umstellung der Normen von nationaler auf europäische Ebene neue

Werkstoffbezeichnungen gültig sind. Mit dem System *Stahlikon* wird dem Konstrukteur bei der Suche nach Werkstoffinformationen und -eigenschaften geholfen. *Stahlikon* unterstützt dabei die Werkstoffbezeichnungen nach DIN und EN. Das System *Starkit* liefert nicht nur Informationen, sondern beinhaltet einen Bewertungs- bzw. Auswahlprozess, sodass die geeignetsten Werkstoffe in Abhängigkeit der Aufgabe oder gestellter Anforderungen angegeben werden können.

3 Web Server www.stahlauswahl.de

Zur Darstellung der Projektarbeiten ist ein Web Server mit der Adresse www.stahlauswahl.de von der Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. und dem Institut für Maschinenwesen angemeldet und eingerichtet worden.

3.1 Web Seiten

Die Web Seiten stellen die Schnittstelle zwischen dem Anwender und den beiden Systemen *Stahlikon* und *Starkit* dar. Außerdem sind auf den Web Seiten noch weitere Informationen, Links, Literatur und Kontaktadressen zum Thema Stahl zu finden.

3.2 Implementierung von *Stahlikon* und *Starkit*

Die Projektarbeiten umfassen die beiden Systeme *Stahlikon* und *Starkit*, die unter einem eigenständigen Web Server am Institut für Maschinenwesen installiert sind. Das Konzept für die Stahlinformation und -auswahl ist in **Bild 1** dargestellt. Über jeden beliebigen Rechner mit Internetzugang kann auf die Seiten und die beiden Systeme zugegriffen werden. Der eingerichtete Web Server, ein Apache Web Server mit der Erweiterung Apache Jserv Servlet Engine unter Windows NT, sorgt dafür, dass die für die Stahlinformation und -auswahl entwickelten JAVA-Servlets ausgeführt werden können. In diesen JAVA-Servlets werden u.a. auch die Datenbankabfragen in der standardisierten Abfragesprache SQL (Structured Query Language) generiert. Damit der Zugriff auf die Datenbanken auf diese

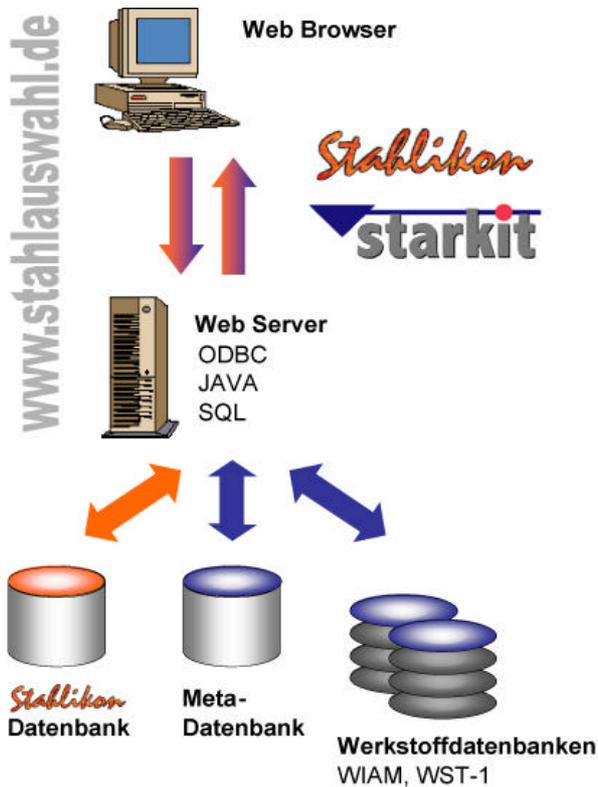


Bild 1: Konzept zur Implementierung der Stahlauswahlarbeiten

Weise funktioniert, müssen die Datenbankdateien als ODBC-Datenquellen (Open Database Connectivity) eingerichtet werden. Die hierfür erforderlichen Treiber (Microsoft Data Access) sind entweder separat oder über das Office-Paket von Microsoft zu installieren. Abschließend müssen dem System in der ODBC-Konfiguration die jeweiligen Pfade der Datenbanken mitgeteilt werden. Die verwendeten Datenbanken befinden sich zur Zeit auf demselben Rechner wie der Web Server. Bei der *Stahlikon*-Datenbank handelt es sich um eine einzige Datenbank, in der die Informationen über die fünf beteiligten Werkstoffdatenbanken zusammengefasst worden sind. Über einen programmierten Import-Filter ist es möglich, geänderte Daten und neue Datenbanken, automatisiert zu aktualisieren und zu integrieren. Die Datenbanken für das *Starkit*-System sind momentan Demo-Versionen der zwei Werkstoffdatenbanken WIAM und WST-1. Die Werkstoffdatenbank WIAM (Werkstoffinformation und -auswahl Metalle) ist eine Datenbank mit allgemeinen Informationen zu Werkstoffen, die Datenbank WST-1 beinhaltet schwerpunktmäßig Informationen zur Dauerfestigkeit von Werkstoffen. Die Meta-Datenbank umfasst die genauen Dateien und Spalten der Datenbanktabellen für die einzelnen Werkstoffeigenschaften. Dadurch können auch hier die Daten einfach aktualisiert und neue Werk-

stoffdatenbanken aufgenommen werden, indem die Datensätze für die neue Datenbank in der Meta-Datenbank entsprechend geändert bzw. ergänzt werden. Durch Einführung des Importfilters bei *Stahlikon* und der Meta-Datenbank bei *Starkit* ergibt sich ein deutlich reduzierter System-Administrationsaufwand.

4 *Stahlikon* - Das Stahl-Informationssystem

Stahlikon, das **Stahl-Informationssystem** für Konstrukteure, gibt Auskunft darüber, in welcher Werkstoffdatenbank welche Informationen bzw. Werkstoffeigenschaften - auch in Abhängigkeit vom Werkstoff - vorhanden sind. Abgefragt werden kann über fünf verschiedene Werkstoffdatenbanken, die ihre Datenbankinhalte für *Stahlikon* zur Verfügung gestellt haben. Dabei handelt es sich um folgende Datenbanken:

- Alloys Data Bank, EC JRC Petten
- BFI Verschleiss Datenbank, BFI VDEh
- INSITU PE/ME, INSITU
- Stahlwissen, Dr. Sommer Werkstofftechnik
- WIAM, IMA Dresden

Der Inhalt der *Stahlikon*-Datenbank umfasst nur die enthaltenen Werkstoffe und die zugehörigen Werkstoffeigenschaften, die Kennwerte selbst sind mittels *Stahlikon* nicht zu erfragen. Das System gibt aber einen Ansprechpartner an, der die gewünschten quantitativen Werte der Eigenschaften bereitstellen kann.

Zum Leistungsumfang von *Stahlikon* gehören der Datenbanküberblick, die Suche nach Werkstoffinformationen sowie die Werkstoffumschlüsselung. Diese Funktionen sollen im Folgenden näher erläutert werden.

4.1 Datenbanküberblick

Unter diesem Menüpunkt kann ein Überblick über die integrierten Werkstoffdatenbanken gegeben werden. Über ein Pull-down-Menü wird die gewünschte Datenbank ausgewählt, durch Anklicken des Buttons *Anzeigen* wird die Abfrage gestartet. Auf der rechten Seite erscheinen allgemeine Informationen, wie z.B. Anbieter, Ansprechpartner und Web Seiten, auf der linken Seite werden die Eigenschaften und Werkstoffe aufgelistet. Die Ergebnisanzeige des Datenbanküberblicks ist in **Bild 2** am Beispiel der BFI Verschleissdatenbank dargestellt.

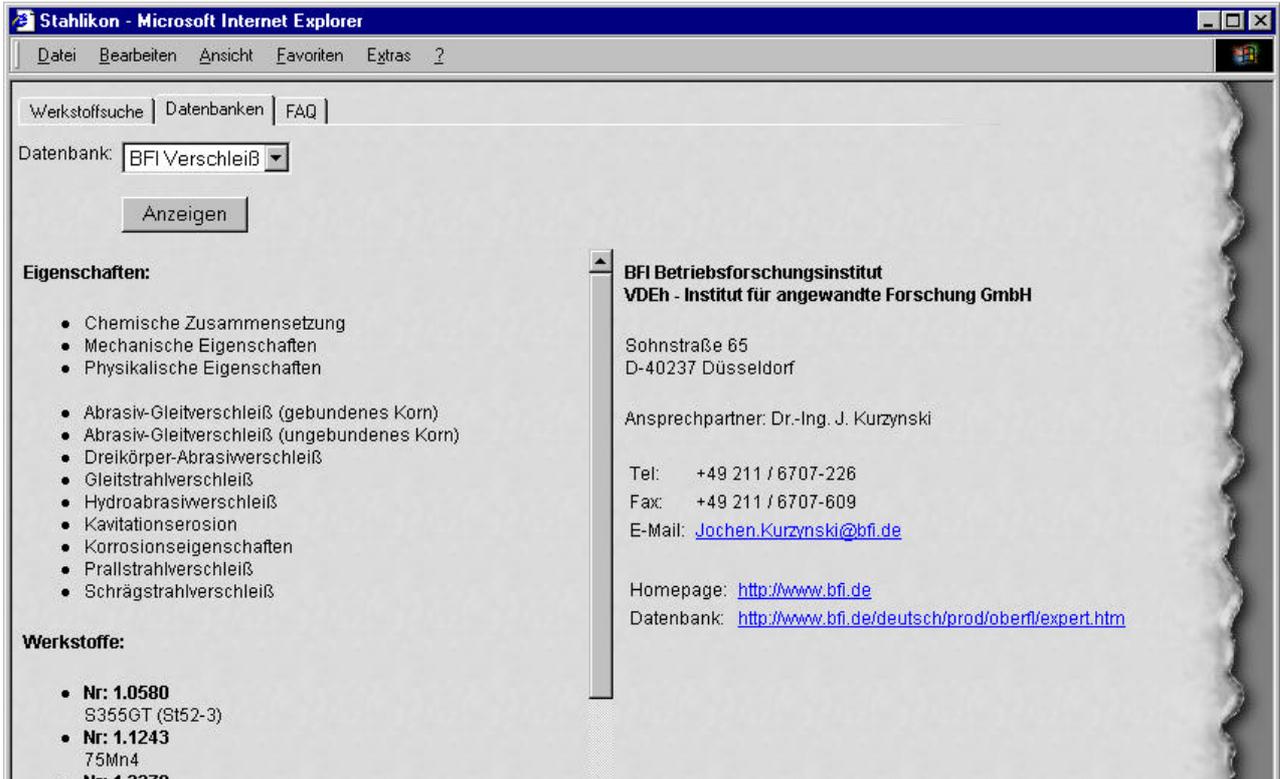


Bild 2: Datenbanküberblick mit Stahlikon (am Beispiel der BFI Verschleiss Datenbank)

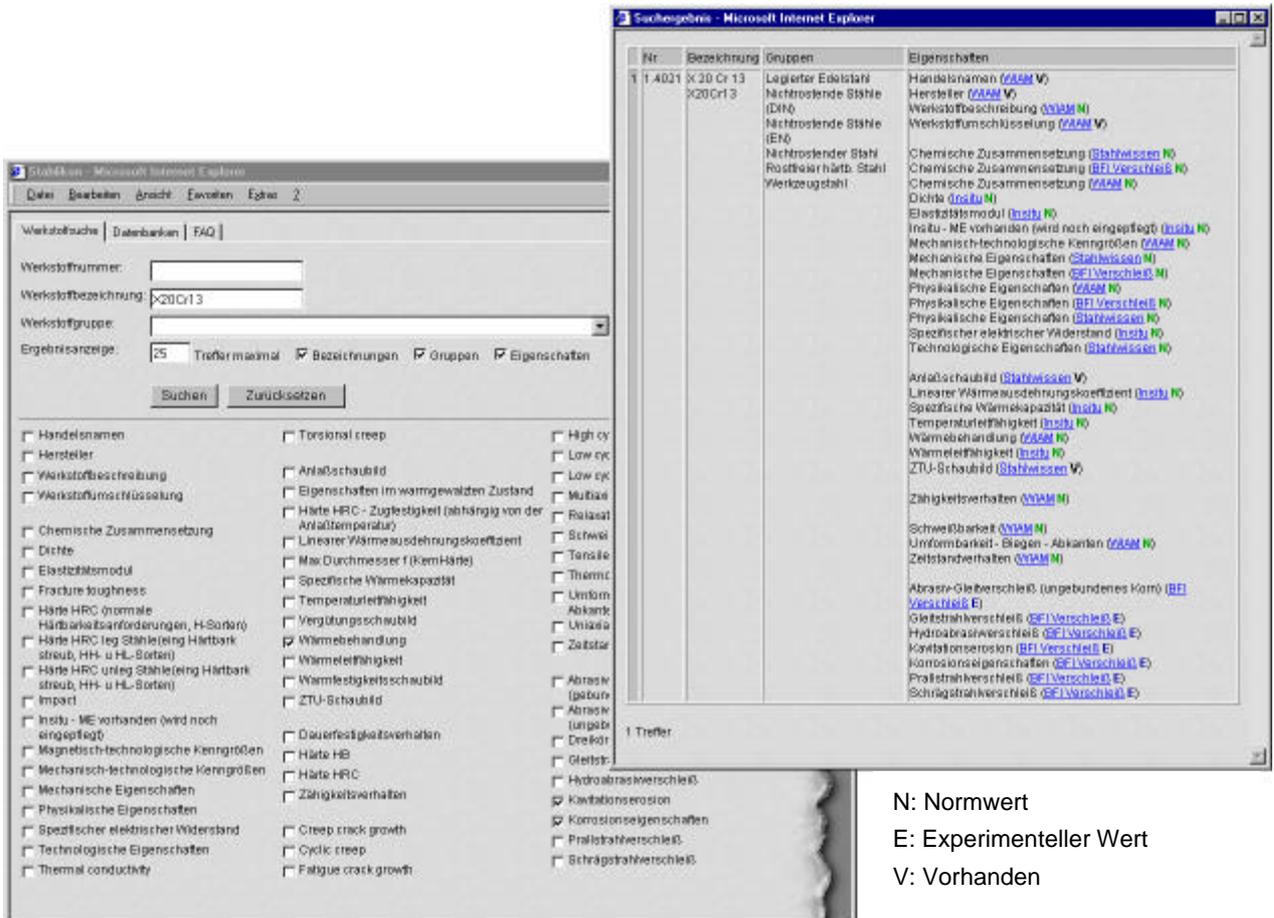


Bild 3: Werkstoffsuche mit Stahlikon (Welche Datenbank gibt Auskunft über Kavitationserosion, Korrosionseigenschaften und Wärmebehandlung für den Werkstoff X20Cr13?)

Nr	Bezeichnung
1	1.0312 DC05 St 15

1 Treffer

Bild 4: Ergebnis einer Werkstoffumschlüsselung
Werkstoffnummer <-> Werkstoffbezeichnung

4.2 Werkstoffsuche

Die Hauptfunktion von *Stahlikon* ist die Werkstoffsuche. Hier kann gezielt nach Informationen über Stähle recherchiert werden. Sie suchen beispielsweise zu einem bestimmten Werkstoff Informationen über Kavitationserosion, Korrosionseigenschaften und Wärmebehandlung? Geben Sie dazu den Werkstoff in Form der Werkstoffbezeichnung oder -nummer ein und markieren Sie im unteren Bereich der Eingabemaske die entsprechenden Werkstoffeigenschaften, **Bild 3**. Sie bekommen nun die Information, in welcher Datenbank Sie zu dem Werkstoff die geforderten Eigenschaften erhalten. Ergeben sich nach einer Abfrage 0 Treffer, so gibt es die gewünschte Information in keiner der fünf beteiligten Werkstoffdatenbanken. Auf diese Weise können die verschiedensten Abfragekombinationen definiert und durchgeführt werden.

4.3 Werkstoffumschlüsselung

Ein weiterer Menüpunkt, der eigentlich schon durch die Werkstoffsuche abgedeckt wird, ist die Werkstoffumschlüsselung. Durch gezieltes Einstellen der Ergebnisanzeigeoptionen werden aber nur die für die Werkstoffumschlüsselung relevanten Informationen angezeigt. Sie kennen die Werkstoffbezeichnung (DIN oder EN) und wollen die zugehörige Werkstoffnummer haben (oder umgekehrt)? Sie wollen die Werkstoffe, die zu einer Werkstoffgruppe gehören, aufgelistet haben? Geben Sie im ersten Fall die Werkstoffbezeichnung bzw. -nummer ein und deaktivieren Sie in der Zeile *Ergebnisanzeige* die Punkte *Gruppen* und *Eigenschaften* und starten die Umschlüsselung durch Drücken des Buttons *Suchen*. Für die Darstellung der Werkstoffe einer Werkstoffgruppe wählen Sie im Pull-Down-Menü

die entsprechende Gruppe aus und starten wieder die Abfrage durch Drücken des Buttons *Suchen*. In **Bild 4** ist das Abfrageergebnis einer Werkstoffumschlüsselung dargestellt.

5 Starkit - Das Stahlauswahlsystem

Starkit, **Stahlauswahl für Konstrukteure im Internet**, ist ein System, das den Konstrukteur bei der Suche nach einem Werkstoff für seine Aufgabe unterstützt. Ausgehend von der Eingabe der Anforderungen an den Werkstoff, wie beispielsweise zur statischen Festigkeit oder zu verwendeten Fertigungsverfahren, werden von *Starkit* die geeigneten Werkstoffe ermittelt.

Das Auswahlsystem *Starkit* wird zum jetzigen Zeitpunkt am Institut für Maschinenwesen getestet und erweitert. Es ist noch nicht im Internet verfügbar, wird aber in Kürze unter www.stahlauswahl.de integriert sein.

6 Zusammenfassung

Der Artikel hat auf die Informationslücken beim Werkstoffauswahlvorgang hingewiesen und die Systeme *Stahlikon* und *Starkit* vorgestellt, die Informationen über Stähle bereitstellen und einen Auswahlprozess in Abhängigkeit der vorhandenen Werkstoffanforderungen durchführen. Beide Systeme, die unter www.stahlauswahl.de zu finden sind, leisten damit einen Beitrag um diese Informationslücken zu schließen.

Baureihenentwicklung von Drehmomentaufnehmern

Birkholz, H.; Garzke, M.

Bei der Durchführung von statischen und dynamischen Festigkeitsuntersuchungen ist es oft notwendig, Kräfte und Drehmomente zu Meßzwecken in elektrische Größen zu wandeln. Eine Möglichkeit besteht darin, die Verformung eines Meßkörpers mittels Dehnungsmeßstreifen zu bestimmen. Die Widerstandsänderung der Dehnungsmeßstreifen führt zur Verstimmung einer Wheatstoneschen Brückenschaltung und damit zu einem elektrischen Signal. Es wurden Baureihen für Drehmoment- und Kraftaufnehmer entwickelt, die folgende Darstellung beschränkt sich auf die Ermittlung von Drehmomenten.

For measuring purposes during static and dynamic testing of components it is often necessary to transform forces and torques into electrical signals. The deformation of a specimen can be obtained using strain gauges. The change in the resistance of the strain gauges causes a detuning of the Wheatstone-bridge circuit and hence an electrical signal. The following article describes the development of a line of products used to measure torques.

1 Einleitung

Das Institut für Maschinenwesen verfügt zur experimentellen Untersuchung von Bauteilen und Welle-Nabe-Verbindungen verschiedene Prüfstände /1,2/. Da die Belastungen und die Größe der zu untersuchenden Prüflinge stark variieren, sind konstruktive Veränderungen bezüglich der Lasteinleitung und Prüflingaufnahme die Regel. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit des Einsatzes verschiedener Aufnehmer, die der jeweiligen Prüfaufgabe angepaßt sind. Ausgehend von konstruktionsmethodischen Überlegungen ist das geeignete Konzept für einen Drehmomentaufnehmer herausgearbeitet worden /3/.

2 Der Drehmomentaufnehmer

Zunächst ist es notwendig, die an den Drehmomentaufnehmer gestellten Anforderungen in einer Anforderungsliste (Tabelle 2.1) zusammenzustellen. Dabei werden diese in Festforderungen und Wünsche unterteilt. Entsprechend dieser Unterteilung werden sie bei den möglichen Realisierungsvarianten berücksichtigt.

IMW	Anforderungsliste Drehmomentaufnehmer		Stat. I	Stat. II
Änderung	F/W	Anforderung	Verantwortlichkeit	
	F	minimales Drehmoment $T_{min} = 10 \text{ Nm}$		
	F	maximales Drehmoment $T_{max} = 20000 \text{ Nm}$		
	F	geringe Masse, geringes Massenträgheitsmoment		
	F	hohe Torsionssteifigkeit		
	F	spielfreie Verbindungselemente		
	F	Empfindlichkeit des Meßgliedes 1,2...1,8 mV/V		
	F	hohe Biegesteifigkeit an der Meßstelle		
	F	geringe Biegesteifigkeit in übrigen Bereichen		
	F	Temperaturunempfindlichkeit		
	F	Unempfindlichkeit gegen Axialkräften		
	F	Unempfindlichkeit gegen Biegeeinflüsse		
	F	elektrisches Meßsignal		
	F	einfache Montage und Demontage		
	F	geringe Baugröße		
	F	oszillierende Rotation mit Ausschlägen $\leq \pm 30^\circ$		
	F	flexible Verbindungselemente für verschiedene Prüfstände		
	F	keine vorstehenden Verbindungselemente		
	F	hohe Standzeit (dauerfest, $\epsilon \leq 1000 \mu\text{m/m}$)		
	F	Ausführung als Baureihe		
	F	Fertigstellung 31.12.1998		
	W	einfache Herstellung		
Ausgabe vom 13.10.1998			Faulwasser	

Tabelle 2.1: Anforderungsliste /3/

Unabhängig von der späteren konstruktiven Umsetzung kann man für jede Aufgabenstellung eine Funktionsanalyse durchführen, um die meist komplexe Aufgabe in eine Reihe kleiner Funktionen zu unterteilen, für die dann mittels Ordnungsschemata eine Vielzahl von Detaillösungen erarbeitet werden kann. Die Aufgabe, ein Drehmoment als elektrischen Signal zu erfassen, läßt sich nach Bild 2.1 in die 5 Grundfunktionen Erzeugung eines drehmomentabhängigen elektrischen Signals, Verstärkung des Signals, A/D-Wandlung des Signals, Meßwertausgabe und Speicherung der aufteilen. Im Rahmen dieser Betrachtung soll die erste Grundfunktion konstruktiv erfüllt werden. Diese läßt sich nach Bild 2.1 in die Teilfunktionen

- Drehmoment mechanisch aufnehmen,
- Drehmoment zur Meßstelle mechanisch weiterleiten,
- Drehmoment messen,
- Drehmoment weiterleiten und
- Drehmoment mechanisch abgeben unterteilen.

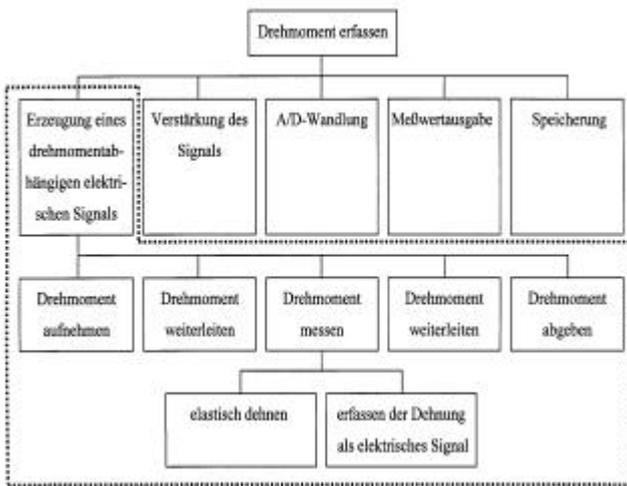


Bild 2.2: Funktionsanalyse /3/

2.1 Varianten

Aufbauend auf dieser Funktionsanalyse wurden verschiedene Lösungsvorschläge erarbeitet. Grundsätzlich sollte eine DMS-Vollbrücke Verwendung finden. Als Geometrie vorschläge wurden Meßaufnehmer mit Zugblechen (1), torsionsbeanspruchte Hohlwelle (2), torsionsbeanspruchte Vollwelle, torsionsbeanspruchter Käfigstab, biegebeanspruchter Käfigstab (3) und biegebeanspruchtes Speichenrad (4) näher betrachtet (**Bild 2.3**).

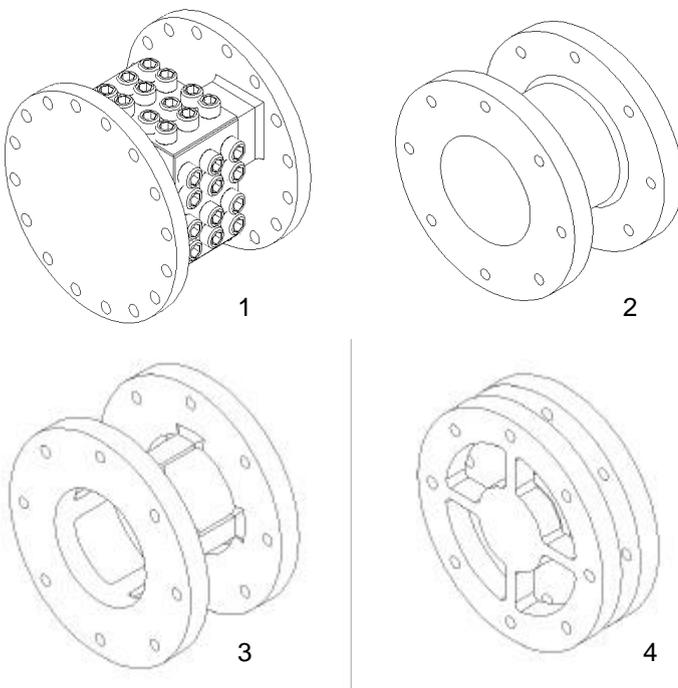


Bild 2.3: Lösungsvorschläge für Aufnehmer /3/

2.1.1 Technische Bewertung

Um die beste der Varianten zu finden, ist es erforderlich, einen Bewertungskatalog zu erstellen. Dieser ergibt sich aus der Anforderungsliste und aus zusätzlichen allgemeinen Kriterien. Die zur Bewertung herangezogenen Kriterien sind:

- geringes Trägheitsmoment,
- hohe Torsionssteifigkeit,
- hohe Biegesteifigkeit an der Meßstelle,
- geringe Baugröße,
- keine vorstehenden Verbindungselemente,
- geringe Teilezahl,
- großer Meßbereich,
- hohe Empfindlichkeit,
- Applikation der DMS (Genauigkeit) und
- Applikation der DMS (Zugänglichkeit).

Jedes dieser Kriterien wurde mit einer Note zwischen 0 und 4 bewertet, wobei 0 „durchgefallen“ und 4 „sehr gut“ entspricht. Bezogen auf die maximale Punktzahl ergibt sich nach Gleichung 2.1.1 /4/ für jede Variante die technische Wertigkeit. Die Ergebnisse der technischen Bewertung sind in der **Tabelle 2.2** dargestellt.

$$W_{t,i} = \frac{\sum_{m=1}^n w_{i,m}}{w_{\max} * n} \quad 2.1.1$$

$W_{t,i}$ - technische Wertigkeit der Variante i
 $w_{i,m}$ - Teilwert der Variante i nach dem Kriterium m

n - Gesamtzahl der Kriterien

Auf ähnliche Art und Weise wurde eine wirtschaftliche Betrachtung, die Herstellung der Aufnehmer betreffend, angestellt. Auf eine Darstellung der Tabelle wird an dieser Stelle verzichtet. Das Gesamtergebnis der technischen und wirtschaftlichen Betrachtung ist in **Bild 2.4** aufgetragen.

Kriterium	Variante					
	Zugbleche	Hohlwelle	Vollwelle	Käfig Torsion	Käfig Biegung	Speichenrad
geringe Masse	1	3	1	3	3	3
Torsionssteifigkeit	3	3	3	3	3	2
Biegesteifigkeit	3	4	1	3	3	3
geringe Baugröße	1	4	4	4	2	4
keine vorstehenden Verbindungselemente	1	3	3	2	2	3
geringe Teilezahl	1	4	4	4	4	4
hohe Empfindlichkeit	3	4	1	4	4	4
großer Meßbereich	4	1	1	1	4	3
Applikation der DMS (Genauigkeit)	4	3	3	3	3	3
Applikation der DMS (Zugänglichkeit)	4	3	3	4	4	1
Summe	25	32	24	31	32	30
Wertigkeit	0,625	0,8	0,6	0,775	0,8	0,75

Tab. 2.2: Technische Bewertung der Lösungsvorschläge /3/

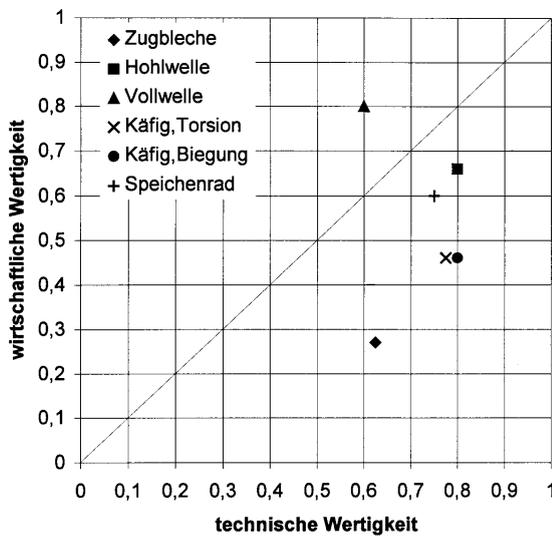


Bild 2.4: Darstellung der technischen und wirtschaftlichen Wertigkeit der Varianten /3/

3 Baureihenentwicklung

3.1 Ermittlung der Ähnlichkeitskennzahlen

Ziel der Baureihenentwicklung sind Drehmomentmeßwellen, die sich trotz unterschiedlicher Momentenniveaus in gleichem Maße dehnen, das heißt, $\varphi_e = \varphi_{e1} = \varphi_{e2} = 1$. Da die Wellen alle aus demselben Werkstoff hergestellt werden sollen, sind der E-Modul E und die Querkontraktionszahl ν konstant ($\varphi_E = 1$ und $\varphi_\nu = 1$). Unter der Annahme reiner Torsion gelten folgende Gleichungen:

$$s_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} (e_1 + \nu e_2), \tag{3.1.1}$$

$$j_{s_1} = j_{e_1} = 1, \tag{3.1.2}$$

$$t = s_1 = -s_2, \tag{3.1.3}$$

$$j_t = j_{s_1} = 1, \tag{3.1.4}$$

$$t = \frac{T}{W_t}, \tag{3.1.5}$$

$$j_t = \frac{j_T}{j_{W_t}}, \tag{3.1.6}$$

$$W_t = \frac{P^*(d_a^4 - d_i^4)}{16*d_a} = P^* \left(\frac{d_a^4}{16*d_a} - \frac{d_i^4}{16*d_a} \right), \tag{3.1.7}$$

$$j_{W_t} = j_L^3 \tag{3.1.8}$$

und

$$j_t = \frac{j_T}{j_L^3} \tag{3.1.9}$$

Setzt man die Gleichung 3.1.4 in die Gleichung 3.1.9 ein, so erhält man das gesuchte Ähnlichkeitsgesetz der Baureihe

$$j_T = j_L^3. \tag{3.1.10}$$

3.2 Abstufung der Baureihe

Der große Meßbereich und die geforderte hohe Empfindlichkeit sind zwei Eigenschaften, die sich gegenseitig beeinflussen. Um beide Anforderungen gleichzeitig zu erfüllen, muß die Baureihe gut abgestuft sein. Dabei ist zu beachten, daß eine feine Stufung viele Baugrößen zur Folge hat, eine grobe Abstufung die Meßgenauigkeit negativ beeinflusst. Darüber hinaus sollten die benachbarten Baugrößen eine ausreichende Überlappung der Meßbereiche aufweisen, damit man auch in diesen Bereichen brauchbare Meßergebnisse erzielen kann.

Bei einer geforderten Empfindlichkeit von 1,2...1,8 mV/V und einer Überlappung von 0,1 mV/V ergibt sich ein Verhältnis

$$\frac{U_{A,max}}{U_{A,min}} = \frac{1,7mV}{1,2mV} = 1,416 \tag{3.1.11}$$

Dieser Wert entspricht in etwa dem Genauwert (1,4125) der Normzahl 1,4. Dieser wird in den weiteren Überlegungen berücksichtigt, um die Baureihe in Normzahlen abzustufen. Dies hat den weiteren Vorteil, daß auch die Abmessungen der Meßstelle in Normzahlen abgestuft sind. Dieses Vorgehen hat zur Folge, daß die Stufe i bei minimalem Nennmoment die Empfindlichkeit 1,2mV/V hat und die Stufe $i-1$ bei gleichem Moment die Empfindlich-

keit 1,695 mV/V hat. Damit sind die Vorgaben der Anforderungsliste hinreichend erfüllt.

Für den Gesamtmeßbereich lautet das Verhältnis

$$\frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \frac{20000Nm}{10Nm} = 2000 \quad (3.1.12).$$

Daraus folgt, das zur Abdeckung des Gesamtmeßbereiches n Stufen erforderlich sind. Dies läßt sich auch durch die Gleichung

$$1,4125^n = 2000 \quad (3.1.13).$$

darstellen. Durch logarithmieren dieser Gleichung erhält man den Zusammenhang

$$n \cdot \log 1,4125 = \log 2000 \quad (3.1.14),$$

so daß sich die Stufenzahl n wie nachfolgend berechnet

$$n = \frac{\log 2000}{\log 1,4125} = 22,009 \quad (3.1.15)$$

Da n nur eine natürliche Zahl darstellen kann, wird in diesem Fall auf 22 Stufen gerundet. Zur Abstimmung der Empfindlichkeit bei der Anwendung von Normzahlen als Abmessung der Meßstelle wurde die untere Grenze des Gesamtmeßbereiches verschoben, so daß für alle Baugrößen die Anforderungsliste erfüllt ist. Dadurch erhöht sich zwar die

Momentstufe i	minimales Nennmoment $T_{i,\min}$ [Nm]	maximales Nennmoment $T_{i,\max}$ [Nm]
1	7,5	11,2
2	10,6	16,0
3	15,0	22,4
4	21,2	31,5
5	30,0	45,0
6	42,5	63,0
7	60,0	90,0
8	85,0	125
9	118	180
10	170	250
11	236	355
12	335	500
13	475	710
14	670	1000
15	950	1400
16	1320	2000
17	1900	2800
18	2650	4000
19	3750	5600
20	5300	8000
21	7500	11200
22	10600	16000
23	15000	22400

Tabelle 3.1: Nennmomente der Aufnehmer /3/

Zahl der Baugrößen um 1, aber der Gesamtmeßbereich wird etwas nach unten und oben erweitert. In **Tabelle 3.1** sind die Momentabstufungen aufgelistet.

Die Tabelle enthält die minimalen und maximalen Nennmomente der verschiedenen Baugrößen. Sie charakterisieren die Belastungen, bei denen der Aufnehmer eine Empfindlichkeit von ca. 1,2 mV/V bzw. 1,8 mV/V hat. Wird das maximale Nennmoment im Versuch überschritten, so kann der Dehnungsmeßstreifen beschädigt werden. Eine Unterschreitung des minimalen Nennmomentes hat lediglich Einfluß auf die Qualität des Meßsignals. Die Auswahl des richtigen Aufnehmers erfolgt nach dem maximalen Nennmoment.

3.3 Auslegung der Meßstelle

Um eine Baureihe zu entwickeln ist es notwendig, ein Musterbauteil für ein vorgegebenes Drehmoment zu berechnen. Aus der Anforderungsliste ergibt sich eine maximale Empfindlichkeit von $U_M/U_B = 1,8$ mV/V. Um Einflüsse durch Biegemomente, Zug- bzw. Druckkräfte und Temperaturschwankungen zu unterdrücken, werden die Dehnungsmeßstreifen als Vollbrücke geschaltet. Für die nachfolgende Auslegung wurden die Standardwerte der Materialkonstanten und des Dehnungsmeßstreifens zu Grunde gelegt. Diese sind in der nachfolgenden **Tabelle 3.2** aufgelistet. Eine Veränderung dieser Werte beeinflußt nicht nur die Empfindlichkeit des Aufnehmers, sondern auch die Dehnung an der Meßstelle. Deshalb ist es notwendig, diese Auslegung mit den Werkstoffdaten des verwendeten Stahls zu überprüfen, um zu gewährleisten, das die Dehnung den Grenzwert von 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ nicht übersteigt. Für die Verwendung anderer Materialien ist diese Auslegung nicht geeignet.

Kennwert	Größe
E-Modul [N/mm ²]	210000
Querkontraktionszahl [-]	0,3
k-Faktor des DMS [-]	2,1

Tabelle 3.2: Konstanten der Meßstellenauslegung

Formt man die Gleichung

$$\frac{U_M}{U_B} = e \cdot k \quad (3.1.16)$$

nach

$$e = \frac{U_M}{U_B} * \frac{1}{k} \tag{3.1.17}$$

um, so kann man damit die notwendige Dehnung berechnen. Durch Umstellen der Formel

$$e = \frac{s_1}{E} * (1 + \nu) \tag{3.1.18}$$

nach

$$s_1 = \frac{e_1}{(1 + \nu)} * E \tag{3.1.19}$$

läßt sich die erforderliche Hauptspannung σ_1 ermitteln.

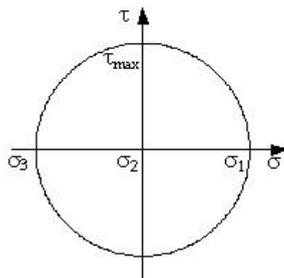


Bild 3.1: Mohr'scher Spannungskreis für den Belastungsfall reine Torsion

Aus der Darstellung des Mohr'schen Spannungskreises für reine Torsion (**Bild 3.1**) ergibt sich

$$t_t = s_1 = -s_3 \tag{3.1.20}$$

Da für die Torsionsschubspannung τ_t

$$t = \frac{T}{W_t} \tag{3.1.21}$$

gilt, kann man durch Umstellen das notwendige Torsionswiderstandsmoment W_t bestimmen. Gibt man eine Normzahl als Außendurchmesser d_a vor, so läßt sich nach Umformen der Gleichung

$$W_t = \frac{p * (d_a^4 - d_i^4)}{16 * d_a} \tag{3.1.22}$$

in die Form

$$d_i = \sqrt[4]{d_a^4 - \frac{16 * W_t * d_a}{p}} \tag{3.1.23}$$

der entsprechende Innendurchmesser berechnen. Der Innendurchmesser d_i wird zweckmäßigerweise auf eine Normzahl gerundet und die Geometrie mit den Gleichungen 3.1.22, 3.1.21, 3.1.20, 3.1.18 und 3.1.16 überprüft. Dabei ist es vorteilhaft, wenn die Rundung nur gering ist. Im vorliegenden Fall besteht die Baureihe aus 23 Stufen. Deshalb wird zur Auslegung die 12. Stufe gewählt, das heißt $T_{12,max}=500$ Nm. Von den verschiedenen Außendurchmesser-Innendurchmesserkombinationen erfüllt die Variante $d_b=37,5$ mm und $d=33,5$ mm die Anforderungen am besten. Die Gleichungen 3.1.22, 3.1.21, 3.1.20, 3.1.18, und 3.1.16 haben folgende Ergebnisse:

$$W_t=3759,9 \text{ mm}^3,$$

$$\tau_t=\sigma_1=132,98 \text{ N/mm}^2,$$

$$\varepsilon_1=823,2 \text{ } \mu\text{m/m},$$

$$U_M/U_B=1,729 \text{ mV/V}.$$

Bei Belastung mit der nächst kleineren Momentenstufe $T_{11,max}=355$ Nm ergibt sich eine Empfindlichkeit

$$U_M/U_B=1,227 \text{ mV/V}.$$

3.4 Überprüfung der anderen Baugrößen

Da die Normzahlen nicht ganz ihrem Genauwert entsprechen, schwanken die Dehnungen und Empfindlichkeiten der einzelnen Baugrößen. Um sicherzustellen, daß die Anforderungsliste trotzdem erfüllt ist, wurden für alle Baugrößen die Dehnung und Empfindlichkeiten berechnet (**Tabelle 3.3**). Es zeigt sich, daß bei keiner Baugröße die kritische Dehnung überschritten wird, das heißt, das gefundene Ähnlichkeitsgesetz kann Anwendung finden.

/4/ Dietz, P.: Manuskript der Vorlesungen „Konstruktionslehre I-III“. Institut für Maschinenwesen TU Clausthal 1996

Momentstufe i	maximales Nennmoment $T_{i,max}$ [Nm]	Innendurch- messer d_i [mm]	Außen- durchmesser d_a [mm]	Empfindlich- keit bei mi- nimalem Nennmoment $T_{i,min}$ [mV/V]	Empfindlich- keit bei ma- ximalem Nennmoment $T_{i,max}$ [mV/V]
1	11,2	9,5	10,6	1,176	1,756
2	16,0	10,6	11,8	1,225	1,849
3	22,4	11,8	13,2	1,195	1,785
4	31,5	13,2	15	1,039	1,569
5	45,0	15	17	1,027	1,540
6	63,0	17	19	1,143	1,694
7	90,0	19	21,2	1,176	1,763
8	125	21,2	23,6	1,228	1,806
9	180	23,6	26,5	1,132	1,727
10	250	26,5	30	1,066	1,568
11	335	30	33,5	1,165	1,753
12	500	33,5	37,5	1,159	1,730
13	710	37,5	42,5	1,041	1,556
14	1000	42,5	47,5	1,153	1,721
15	1400	47,5	53	1,191	1,756
16	2000	53	60	1,035	1,568
17	2800	60	67	1,173	1,728
18	4000	67	75	1,146	1,730
19	5600	75	85	1,027	1,534
20	8000	85	95	1,140	1,721
21	11200	95	106	1,176	1,756
22	16000	106	118	1,225	1,849
23	22400	118	132	1,195	1,785

Tab. 3.3: Auflistung der Baugrößen mit Geometrie, maximaler Dehnung, Empfindlichkeit und Drehmoment

4 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/ Birkholz, H.; Heider, G.: Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 2). Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1998
- /3/ Faulwasser, M.: Entwicklung von Drehmoment- und Kraftaufnehmern nach dem Bauweisenprinzip. Unveröffentlichte konstruktive Studienarbeit am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1999

Künstliche Neuronale Netze - Methode und Anwendung

Tawil, M.

Künstliche Neuronale Netze (KNN) sind Modelle, mit denen man versucht, einige Funktionen des menschlichen Gehirns nachzuempfinden. Diese Modelle bestehen, ähnlich dem Gehirn, aus einer Vielzahl gleichartiger Elemente (Neuronen), die parallel arbeitend Informationen verarbeiten. Eine der wichtigsten Eigenschaften von KNN ist ihre Fähigkeit gelernte Beispiele zu verallgemeinern und basierend darauf neue Sachverhalte zu prognostizieren.

Artificial neural nets (ANN) are models for imitating some of the functions of the human brain. These models consist of a large number of identical elements (neurons), which process information simultaneously. One of the most important qualities of ANN is their ability to generalise from learned examples and then to forecast new circumstances.

1 Das Biologische Vorbild

Das biologische Neuronale Netz besteht aus einem sich im Gehirn von Menschen und Tieren befindlichen Bündel von Nervenzellen (**Bild 1**), sog. Neuronen. Ein Neuron besteht aus dem Zellkörper (Soma), einem oder mehreren Eingängen (Dendriten) und einem Ausgang (Axon), der auch verzweigt sein kann.

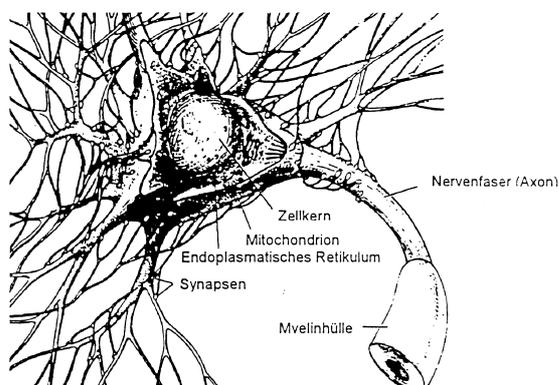


Bild 1: Biologische Nervenzelle

An der Stelle, wo ein Axon auf die Zelloberfläche eines Neurons oder auf eine seiner Dendriten trifft, befinden sich die Synapsen. In den Synapsen findet eine Gewichtung der Eingangssignale statt, d.h. die Signale werden entweder geschwächt oder ver-

stärkt. Anschließend werden über das Axon eintreffende Signale chemisch bzw. elektrisch an das Neuron übertragen. Übersteigt die Summe der Eingangssignale einen bestimmten Schwellenwert, so wird ein Aktionspotential ausgelöst, d.h. das Neuron „feuert“.

Obwohl alle Neuronen ein gemeinsames Grundverhalten aufweisen, kann man verschiedene Neuronentypen definieren, die sich in Größe, Verzweigungsfaktor des Dendritenbaumes, Länge des Axons, Leitungsgeschwindigkeit usw. unterscheiden /1/. Die Komplexität der Funktion des Nervensystems resultiert somit allein aus der großen Zahl parallel arbeitender Neuronen (~10 Milliarden) und deren Verknüpfung untereinander und nicht aus aufwendigen algorithmischen Verfahren. Jede dieser biologischen Einheiten kann vereinfacht also als analog arbeitender Summenverstärker mit Schwellenschaltung beschrieben werden. Hierbei findet die Informationsverarbeitung lokal statt. Es existiert keine globale Überwachungseinheit. Diese Arbeitsweise erlaubt es auch, das Absterben von Neuronen zu verkraften, ohne daß die bestehenden Informationen im Sinne der Redundanz mehrfach abgelegt sein müßten. Vielmehr wird das dort vorhandene „Wissen“ verteilt im System gespeichert, so daß jedes Neuron einen Teil zur Information beiträgt, aber doch nicht die gesamte Information besitzt. Das „Wissen“ liegt in Form von Beispielen vor. Aktuell vorliegende Probleme werden mit entsprechenden, in der Vergangenheit erfolgreich gelösten Problemen assoziiert. Die Assoziationsfähigkeit eines Menschen ermöglicht ihm angemessen auf seine Umwelt zu reagieren und Situationen zu meistern, in denen er sich nie zuvor befunden hat.

Um einige Eigenschaften des biologischen Nervensystems wie die simultane Informationsverarbeitung, Assoziativität, Fehlertoleranz, Adaptionsfähigkeit, Lernfähigkeit u.a. für technische Systeme nutzen zu können, entstanden seit Anfang der achtziger Jahre eine ganze Reihe Künstlicher Neuronaler Netzwerke. Allerdings erreichen diese Modelle nicht einmal ansatzweise die Komplexität ihrer biologischen Vorbilder und stellen daher nur ein recht primitives Abbild dieser dar.

2 Das mathematische Modell

Künstliche Neuronale Netze (KNN) orientieren sich in ihrem Aufbau und ihrer Funktionsweise am biologischen Vorbild. Sie stellen ein sehr Abstraktes Modell des tierischen bzw. menschlichen Nervensystems dar. Dementsprechend bestehen KNN aus mehreren, miteinander verknüpften Informationsverarbeitungseinheiten, den Neuronen.

Das künstliche Neuron (**Bild 2**) kann als eine Schaltung aufgefaßt werden. Diese Schaltung erzeugt, analog zum biologischen Vorbild, erst eine Ausgabe, wenn die Summe der Eingangssignale des Neurons einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Dabei können die Eingabe- sowie Ausgabesignale der Neuronen binär (0, 1) reell (+, -), oder bipolar (-1, +1) sein.

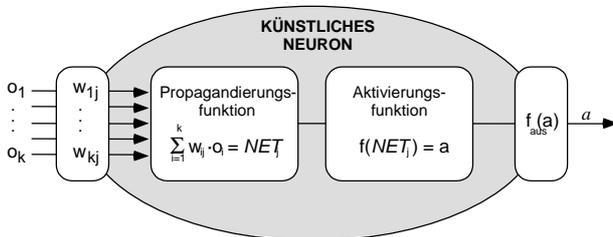


Bild 2: Innerer Aufbau eines Neurons /2/

Analog zum biologischen Neuron werden auch hier die Eingangssignale gewichtet. Diese Gewichtung stellt eine Art Filter dar. Sie kann die Signale verstärken oder abschwächen. Die Gewichtung $w = 0$ bedeutet „keine Verbindung“.

Das Neuron enthält verschiedene mathematische Funktionen zur Informationsverarbeitung. Mit der Propagandierungsfunktion kann die Summe, der Maximal- oder Minimalwert der gewichteten Eingaben gebildet werden. Die Aktivierungsfunktion eines Neurons ist seine statische Kennlinie und beschreibt den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgängen. Sie kann linear, sprunghaft (Schwellwertfunktion) oder stetig (sigmoide Funktion) sein (**Bild 3**). Somit legt die Aktivierungsfunktion fest, wie sich aus einem Aktivierungszustand zum Zeitpunkt t ein Aktivierungszustand $t+1$ berechnen läßt. Die Ausgabefunktion bildet den aktuellen Zustand des Neurons auf einen gewünschten Wertebereich ab. Die Schnelligkeit der Informationsverarbeitung innerhalb des Neuronalen Netzes liegt darin begründet, daß jedes Neuron nur eine sehr einfache Rechenoperation (Verarbeitungsfunktion) durchzuführen hat /3/. Durch die Verknüpfung der Neuronen lassen sich KNN realisieren. Dabei werden die Neuronen in verschiedenen Schichten zusammengefaßt. In der Eingabeschicht werden die

von außen kommenden Eingangssignale verarbeitet und an die Neuronen der versteckten Schicht weitergeleitet. Diese Neuronen werden netzintern verwaltet und unterliegen voll dem Informationsfluß, der gemäß dem gewählten Netzmodell definiert ist /4/. Die Ausgabeschicht stellt das Ergebnis der vom Netz durchgeführten Informationsverarbeitung zur Verfügung. Hier können also die Endwerte der Berechnung abgegriffen werden.

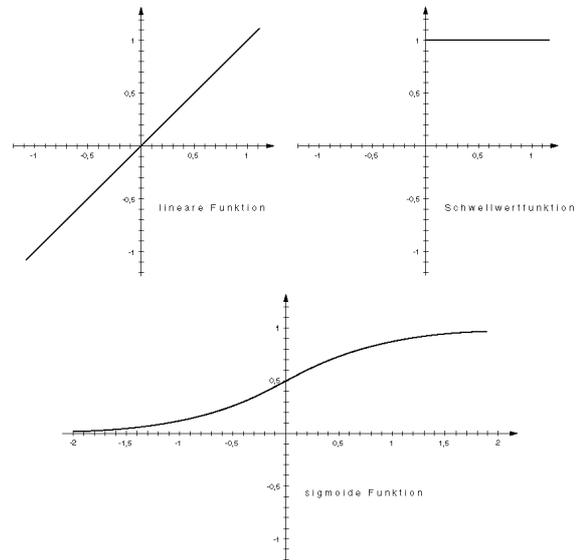


Bild 3: Aktivierungsfunktionen von Neuronen

2.1 Lernalgorithmen von KNN

Ein wichtiges Unterscheidungskriterium der KNN ist ihr Lernalgorithmus. Der Lernprozeß eines Neuronalen Netzes wird über die Verstellung der Gewichte von den Eingangswerten nach einer bestimmten Lernregel gesteuert. Je nach Verwendungszweck gibt es für jedes KNN eine Lernregel. Die meisten heute verwendeten Lernregeln basieren auf der Hebb'schen Regel. Dabei gibt es zwei Arten des Lernens. Dies sind das überwachte und das unüberwachte Lernen. Im letzteren Fall wird das Netz während des Lernprozesses nicht von außen gesteuert sondern teilt selbst die Eingabedaten in verschiedene Klassen ein. Beim überwachten Lernen werden dem KNN zusätzlich die vorsortierten Eingabewerte (Muster), die zu einer bestimmten Klasse gehören, gegeben. Das Netz wird in diesem Fall von außen trainiert. Durch einen Soll-Ist-Vergleich wird ein Fehler berechnet. Dieser Fehler wird vom Netz dazu benutzt, die Zuordnung der Eingabewerte zu einer bestimmten Klasse zu erlernen. Das Lernen durch Fehlerkorrektur ist der am meisten angewandte Lernmechanismus. Hier werden die Gewichte solange geändert bis der Fehler zwischen dem Ist- und dem Soll-Wert minimal wird /5/.

3 Grundtypen von KNN

3.1 Allgemeines

Es gibt heute eine Vielzahl unterschiedlicher künstlicher neuronaler Netztypen, die nach dem gleichen, oben erläuterten, mathematischen Modell arbeiten. Welcher Typ bei welchem Anwendungsfall Verwendung findet, ist stets von der vorliegenden Problemstellung abhängig. Ein KNN muß immer auf die vorliegende Problematik angepaßt werden. Diese Anpassung wird durch die Wahl der Netzarchitektur, der Neuronenzahl, der Eingangs- und Aktivierungsfunktion gewährleistet. So hängt die Wahl der Netzarchitektur und die Festlegung der Neuronenzahl vom Komplexitätsgrad der Aufgabenstellung ab. Dies sind jedoch keine allgemeingültigen Aussagen über Eignung bzw. Nichteignung eines Netzes zur Lösung einer entsprechenden Problemstellung. Aus diesem Grund müssen zur Abbildung bestimmter Sachverhalte die optimalen Netzattribute mittels umfangreicher problemspezifischer Versuche ermittelt werden /3/.

Zur detaillierten Beschreibung der verschiedenen Netzwerkmodelle sei an dieser Stelle auf die im Text zitierte Literatur /1, 4, 5/ verwiesen. Im folgenden wird das unter den neuronalen Systemen am meisten verwendete Modell der Backpropagation kurz erläutert.

3.2 Backpropagation-Netz

In **Bild 4** ist die Struktur eines Backpropagation-Netzes, das nach dem Prinzip der Fehlerrückführung arbeitet, abgebildet. Das Netz besteht aus einer Eingabe- sowie einer Ausgabeschicht und einer oder mehrerer verdeckten Schichten. Die Signalübertragung erfolgt in Vorwärtsrichtung. Im folgenden soll die Funktionsweise des KNN nach der Backpropagation-Methode erläutert werden.

Die Eingabe-Neuronen antworten auf ein Eingabemuster mit Werten, die an die versteckten Neuronen gegeben werden. Deren Ausgänge wirken wiederum auf die Neuronen der Ausgabeschicht. Das Netz erzeugt schließlich Ausgabemuster (Output). Der Output O wird mit den gewünschten Ziel-Ausgabemustern t (target) verglichen. Hieraus wird dann ein Fehler berechnet. Ausgehend von diesem Fehler werden die Gewichtungen der Neuronen in der Ausgabeschicht und der verdeckten Schicht verstellt. Anschließend werden dem Netz neue 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. Das Netz ist dann trainiert und steht zur Beurteilung ähnlicher Sachverhalte zur Verfügung. Das so trainierte Netz muß getestet werden. Dazu sind Testdaten vorzusehen, die sich von den Trainingsdaten unterscheiden müssen. Nur dadurch kann gewährleistet werden, daß das trainierte Netz in der Lage ist, basierend auf dem in den Neuronen gespeicherten Wissen, unbekannte Muster und Sachverhalte richtig einzuordnen.

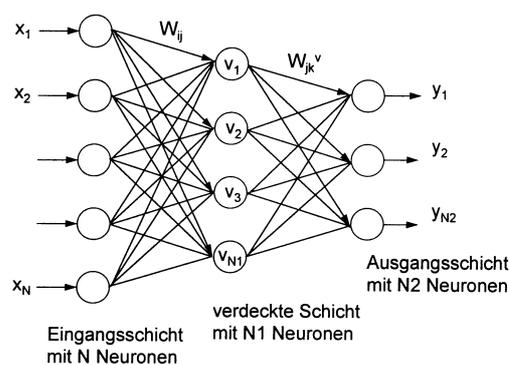


Bild 4: Backpropagation-Netz mit n Eingängen, m Ausgängen und einer verdeckten Schicht /5/

4 Anwendungsbereiche von KNN

Die Bandbreite der Anwendung Künstlicher Neuronaler Netze hat mit der rasanten Entwicklung der Hard- und Software von Rechnern zugenommen. Es existieren heute zahlreiche Netzmodelle für spezielle Anwendungen in der Qualitätssicherung, Bild-, Muster- und Spracherkennung sowie Automatisierungstechnik /5/. KNN werden schon in der Konstruktion und Entwicklung zur Bauteilauslegung und -optimierung erfolgreich eingesetzt /3, 6/. Ein weiteres Einsatzgebiet neuronaler Systeme ist die Fertigung. Dort werden sie zur Prozeßoptimierung durch Festlegung geeigneter Prozeßparameter heran gezogen /2, 7/.

Am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 362 "Fertigen in Feinblech" ein KNN entwickelt, mit dessen Hilfe das Rückfederungsverhalten tiefgezogener Blechteile vorhergesagt wird.

Zum Erzeugen des Trainingssets für das KNN wurden zahlreiche Versuche unter Variation der auf den Tiefziehvorgang wirkenden Parameter (5 Parameter) sowie deren Kombinationen durchgeführt. Nach den Versuchen wurden die gefertigten Werkstücke vermessen, um so die Rückfederungswerte zu ermitteln. Es entstand ein statistisch gesicherter

Trainingsset, mit dem ein ausgewähltes und an die vorliegende Problemstellung angepaßtes Netz beaufschlagt wurde.

Das hier verwendete KNN arbeitet nach der Backpropagation-Methode. Es wurde verschiedene Netzarchitekturen unter Variation der Neuronen- sowie Schichtenzahl und der Aktivierungsfunktionen getestet. Dabei arbeiteten die künstlichen neuronalen Netze zwischen 15 000 und 20 000 Iterationsschritte je durchgerechneter Startwertkombination ab. Es 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 können. Trainingsversuche mit einer höheren Anzahl von Neuronen oder anderen Aktivierungsfunktionen, wie z.B. die Schwellwertfunktion, lieferten eher schlechte Ergebnisse.

Nach dem trainieren des Netzes wurden Bestätigungsversuche durchgeführt um die Zuverlässigkeit des Netzes bei der Rückfederungsvorhersage zu überprüfen. Die erzielte durchschnittliche Abweichung zwischen den durch das Künstliche Neuronale Netz errechneten und den experimentell ermittelten Rückfederungswerten liegt bei 0,02 mm. **Bild 5** stellt diese Differenz graphisch dar. Die im vorliegenden Fall trainierten Netze können also Rückfederungen mit einer Sicherheit von bis zu 98% vorhersagen.

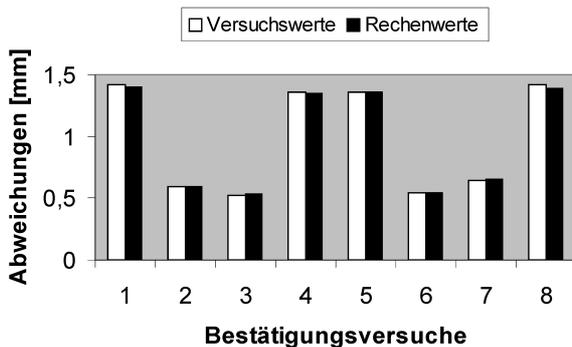


Bild 5: Verifizierung der Aussage eines trainierten Künstlichen Neuronales Netzes

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 Fälle zu schließen und hier Vorhersagen zu treffen.

5 Zusammenfassung

Bestimmte Sachverhalte und Zusammenhänge können nur dann korrekt abgebildet werden, wenn diese in einem vorher erzeugten und statistisch geprüften Datensatz, mit dem das KNN trainiert wird, wiederzufinden sind. Den Vorteilen von KNN wie Lern-, Generalisierungs- und Adaptionfähigkeit sowie Fehlertoleranz stehen die Nachteile fehlende Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse, lange Lernzeiten bei komplexen Netzanwendungen und die große Vielfalt von Netztypen gegenüber. Aufgrund der unterschiedlichen Netztypen, Lernalgorithmen sowie Aktivierungsfunktionen ist die Wahl eines optimalen KNN für eine bestimmte Aufgabenstellung ein iterativer Prozeß und daher mit großem Zeitaufwand verbunden. Die o.g. Nachteile sind sicher ein Grund dafür, daß das Anwendungspotential KNN in verschiedenen Ingenieurdisziplinen nur begrenzt ausgeschöpft wird. Ziel zukünftiger Forschungsarbeiten sollte daher sein, eine Vergleichsanalyse unterschiedlicher Netztypen durchzuführen und sich bei der Entwicklung von KNN mehr an ihren biologischen Vorbildern zu orientieren.

6 Literatur

- /1/ Berns, K.; Kolb, T.: Neuronale Netze für technische Anwendungen, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1994
- /2/ Heinen, F.: Entwicklung einer Methodik zur Rückfederungsvorhersage an Tiefziehteilen. Dissertation, TU Clausthal. Clausthal-Zellerfeld, 1998
- /3/ Krause, F.-L.; Carl, C.: Neuronale Netze in der Produktentwicklung. Konstruktion 49, H. 10 (1997): S. 19-23
- /4/ Kratzer, K. P.: Neuronale Netze - Grundlagen und Anwendungen. Carl Hanser Verlag, München; Wien, 1999
- /5/ Zakharian, S.; Ladewig-Riebler, P.; Thoer, S.: Neuronale Netze für Ingenieure. Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 1998
- /6/ Artymiak, P.; Bukowski, L.; Feliks, J.; Narberhaus, S.; Zenner, H.: Determination of S-N curves with the application of artificial neural networks. Blackwell Science Ltd. Fatigue Fract Engng Mater Struct 22, S. 723-728, 1999
- /7/ Schulz, H.; Kalhöfer, E.: Zerspanungsparameter mit neuronalen Netzen bestimmen. wt Werkstattstechnik 88 (1998) H. 3: S. 125-128

Produktanforderungen systematisch finden

Gummersbach, F.; Heimannsfeld, K.

Eine Vielzahl nationaler und europäischer Forschungsvorhaben am IMW haben sich mit Fragen des Anforderungswesen beschäftigt. Dabei entstanden komplexe Anforderungsmodelle und Methodiken. Ein entscheidender Punkt wurde jedoch bisher immer nur am Rande behandelt. Wie kann man systematisch, ausgehend von einem Entwicklungsauftrag, die relevanten Anforderungen auffinden oder bestimmen? Im folgenden wollen wir einen zielgerichteten Ansatz zum systematischen Auffinden von Anforderungen anhand eines Beispiels vorstellen.

At the IMW quite a number of National and European research projects deal with requirements engineering. Results from these projects are complex requirements models and methodologies. However one major issue was always only treated indirectly. How does an engineer elicitates, starting from the customer requirements of need specification, the relevant requirements? In the following we will introduce and describe a systematic approach to requirements elicitation. We will apply this approach to a simple example.

1 Einleitung

Die Frage wie man aus einem vom Kunden geäußerten Produktwunsch zu einer qualitativ hochwertigen Anforderungsliste kommt ist schwierig, Typischerweise treten in den Kundenanforderungen eine Reihe von Problemen auf. Zweideutigkeiten, unverträgliche Anforderungen, fehlende Anforderungen oder überspezifizierte Anforderungen sind typische Vertreter der Anforderungsproblematik. Im folgenden Artikel wollen wir die Frage, wie man fehlende Anforderungen systematisch herleitet, näher untersuchen. Dazu soll uns als Beispiel die Konstruktionsaufgabe mit Anforderungsliste aus der diesjährigen Konstruktionselemente-Klausur dienen.

1.1 Die Konstruktionsaufgabe

Die Aufgabe war folgendermaßen definiert:

*Durch nicht vorhandene Landliegeplätze muß der abgebildete (siehe **Bild 1**) Strandkatamaran (kein Schwert bzw. Kiel) an einem Wasserliegeplatz liegen. Hierdurch bildet sich an den Rümpfen Bewuchs, der zu hohen*



Bild 1: Katamaran „Hobie 16“ am Wasserliegeplatz

Strömungswiderständen führt. Im vorliegenden Fall kann dieser Bewuchs nicht durch das Aufbringen einer bewuchsvermindernden Farbe vermieden werden.

Zur Vermeidung des Bewuchses sollen die Rümpfe des Strandkatamarans (Gesamtgewicht ca. 145 kg) durch eine Hebevorrichtung dauerhaft aus dem Wasser angehoben werden. Diese Hebevorrichtung muß durch eine Person von Hand innerhalb von 3 min zu bedienen sein. Die Vorrichtung darf das An- und Ablegen nicht behindern.

Erarbeiten sie eine Anforderungsliste und fertigen Sie auf der nachfolgenden DIN A3 Seite eine Handskizze der Hebevorrichtung an !

1.2 Offensichtliche Anforderungen

Aus dem Aufgabentext kann man relativ einfach die offensichtlichen Anforderungen extrahieren:

Die Hebevorrichtung muß:

- min. 145kg heben.
- von einer Person manuell durchzuführen sein.
- innerhalb von 3 min die Rümpfe aus dem Wasser heben.
- dauerhaft aus dem Wasser heben.
- das An- und Ablegen nicht behindern.

Diese ersten kleine Anforderungsliste entspricht der gängigen Praxis eines Entwicklungsauftrags. Selbstverständliche Anforderungen sind oftmals nicht explizit erwähnt. Andere Anforderungen sind oft nicht eindeutig formuliert (Was bedeutet von Hand zu bedienen? Mit Hilfsantrieb oder ohne?). Anforderungen, die sich nicht direkt aus dem Kundenwunsch, aber aus den beteiligten Objekten (z.B. Katamaran oder Bootssteg) ergeben werden nicht berücksichtigt. Wie kann der Konstrukteur nun diese indirekten Anforderungen systematisch auffinden und spezifizieren. Zuerst schauen wir uns die Vorgehensweise der traditionellen Konstruktionsmethodik an.

2 Konstruktionsmethodik und Praxis

Das methodische Aufstellen einer Anforderungsliste nach Pahl und Beitz /1/ benutzt eine eindimensionale Leitlinie mit Hauptmerkmalen. Dabei geht der Konstrukteur die verschiedenen Hauptmerkmale des Produktes durch. Geometrie, Kinematik, Kräfte und Energie sind einige Beispiele dieser Hauptmerkmale. Franke /2/ und Roth /3/ verwenden

zweidimensionale Matrizen, die dann als Checklisten für die Erstellung von Anforderungslisten dienen. Tatsächlich zeigt die heutige industrielle Praxis, daß die Verwendung von Checklisten, die am weitest verbreitete systematische Unterstützung zur Anforderungserfassung ist. Oftmals werden auch Anforderungslisten ähnlicher Produkte als Grundlage für neue benutzt.

Pahl und Beitz /1/ warnen davor, daß Checklisten nur nutzen, wenn sie für länger Zeit aktuell und gleichzeitig überschaubar bleiben. Sie legen daher in /1/ Wert darauf, daß ihre Hauptmerkmale das komplexe Konstruktionsproblem in Teilbereiche zerlegen, die dem Konstrukteur die Problemlösung erleichtern sollen. Durch eine Überlappung der Hauptmerkmale soll gewährleistet werden, daß keine Anforderungen vergessen oder übersehen werden.

Alle diese Ansätze haben erkannt, daß es beim Konstruieren wichtig ist, das zukünftige Produkt unter verschiedenen Blickwinkel oder Sichten zu betrachten. Sichten oder engl. Viewpoints spielen auch in den Anforderungsmethodiken der Informatik oder des System Engineerings eine besondere Rolle.

Allerdings erfordern die doch recht abstrakt und generell gehaltenen Hauptmerkmale und die teilweise sehr umfangreichen Anforderungsmatrizen von Franke /2/ und Roth /3/ einen erheblichen Aufwand bei der Bearbeitung ohne den Blick des Konstrukteurs gezielt auf die eigentliche Aufgabenstellung zu lenken. Gleichzeitig birgt die Deduktionsrichtung von den abstrakten Hauptmerkmalen zu dem Produkt die Gefahr, daß Randbedingungen, die nur indirekt mit dem Produkt zusammenhängen, leicht übersehen werden können.

Deswegen wird im Systementwurf komplexer Systeme (Systems Engineering) oftmals ein anderer Weg gegangen. Dieser Weg wird im nächsten Kapitel vorgestellt und dann anhand der Konstruktionsaufgabe erläutert.

3 Auffinden von Anforderungen (Requirements Elicitation)

Das systematische Auffinden von Anforderungen wird insbesondere im Software Engineering detailliert erforscht. Die im folgenden vorgestellte Methode kann in verschiedenen Variationen in der Literatur gefunden werden. Kotonya und Sommerville /4/ sprechen von Sichten (viewpoints) orientierten Anforderungsmethoden. Gausemeier beschreitet

einen ähnlichen Weg mit seiner Szenarientechnik /5/.

Die sichtenorientierte Systematik zum Auffinden von Anforderungen gliedert sich in 4 Hauptschritte, die in **Bild 2** zu sehen sind:

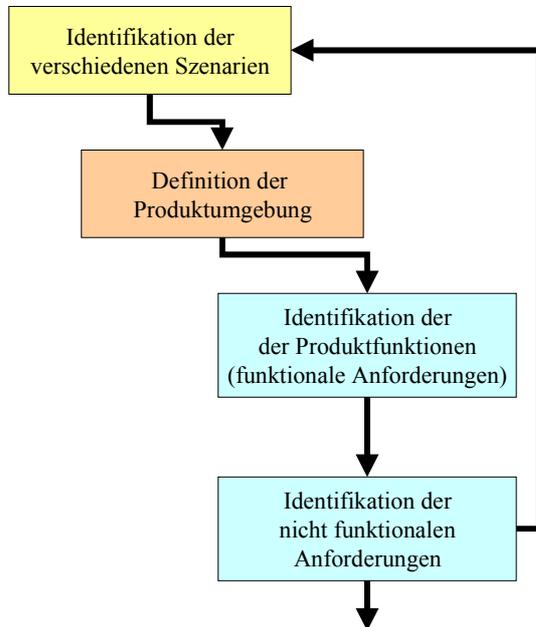


Bild 2: Schritte beim systematischen Ableiten von Anforderungen

1. Identifikation der verschiedenen Sichten, der zu den Sichten zugeordneten Rollen (stakeholders) und Betriebsszenarien.
2. Definition der Produktumgebung und der Schnittstellen zur Umgebung.
3. Definition der funktionalen Anforderungen (Hauptfunktionen, Nebenfunktionen) für jedes Szenario und unter spezieller Berücksichtigung der Schnittstellen.
4. Definition der nicht-funktionalen Anforderungen für jedes Szenario und unter spezieller Berücksichtigung der Schnittstellen.

In Schritt 1 werden die relevanten Sichten und Betriebsszenarien, sowie die Übergänge und ihre Übergangsbedingungen festgelegt. Die Betriebsszenarien für eine Papiertransporteinheit in einer Druckerei könnten also lauten: „*Papier beschleunigen*“, „*Papier mit konstanter Geschwindigkeit transportieren*“, „*Papier bremsen*“ und „*Papierrolle wechseln*“. Neben diesen eigentlichen Betriebsszenarien sollte man natürlich auch alle anderen Anforderungen aus anderen Produktsichten oder

Hauptmerkmalen (beispielsweise Wartung, Fertigung, Recycling und Sicherheit) berücksichtigen. Diese sollte aber immer zielgerichtet in Bezug auf den jeweils relevanten Abschnitt des Betriebszyklus eines Produktes erfolgen.

Da wir heute kaum noch Produkte komplett selber entwickeln, definieren die Schnittstellen innerhalb und außerhalb der zugekauften Komponente des Produktes einen Großteil der Entwurfseinschränkungen und wir müssen bewußt mit diesen Informationen umgehen. In Schritt 2 werden die Grenzen zwischen dem Produkt und der Umgebung, sowie die Interaktionen (Funktionen) zwischen Produkt und Umgebung für jedes Betriebsszenario festgelegt.

Ausgehend von den identifizierten Betriebsszenarien und der Produktumgebung werden in Schritte 3 zunächst die jeweiligen funktionalen Anforderungen festgelegt. Unter funktionalen Anforderungen werden die Anforderungen bezeichnet, die definieren „was“ gefordert ist. In der Konstruktionslehre nach Pahl und Beitz /1/ entsprechen funktionale Anforderungen den Haupt- und Nebenfunktionen in der Funktionsstruktur.

Alle nicht funktionalen Anforderungen werden in Schritte 4 anhand der einzelnen Betriebsszenarien und anhand der externen Einschränkungen ermittelt.

4 Beispiel Hebevorrichtung

Im folgenden werden wir die in Kapitel 3 vorgestellte Methodik auf das Klausurbeispiel aus (Kapitel 1) anwenden.

4.1 Identifikation der Betriebsszenarien

Zuerst versuchen wir die wichtigen Betriebsmodi zu definieren. Aus der Aufgabendefinition können wir leicht zwei Modi definieren:

- Zustand abgesenkt zum Anlegen und Ablegen des Katamarans
- Katamaran dauerhaft angehoben

Der Übergang zwischen beiden Szenarien ist logischerweise der Hebe- und Absenkvorgang die separat untersucht werden müssen.

Darüber hinaus muß die Vorrichtung montiert und gewartet werden. Betriebsbedingungen wie Recycling, Fertigung und andere Aspekte vernachlässigen wir um das Beispiel einfach zu halten.

4.2 Definition der Produktumgebung

Die Definition der Umgebung gestaltet sich auch relativ einfach. Wir haben als Elemente der Umgebung den Bootssteg, das Gewässer, den Katamaran und nicht zu vergessen die Luft bzw. das Wetter im allgemeinen. Unter Umständen muß man natürlich auch den See- oder Meeresgrund als Element betrachten.

Allerdings sollte man vermeiden den Bootssteg oder den Seegrund in Hinsicht auf die Befestigung der Vorrichtung zu untersuchen, da hiermit bereits eine Vorfixierung der Lösung erfolgen würde und der Blick auf die „optimale Lösung“ verbaut würde.

Wie man sich vorstellen kann werden sich insbesondere durch das Gewässer Anforderungen hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit und der Umweltverträglichkeit ergeben, während die Berücksichtigung des Wetters hauptsächlich Anforderungen im Bereich der Stabilität und damit der Sicherheit der Konstruktion liefern wird.

4.3 Ermittlung der Anforderungen

Zur Ermittlung der Anforderungen (hier nur die funktional bedingten) betrachten wir jedes Betriebsszenario einzeln.

1. Hebevorrichtung abgesenkt

Die Hebevorrichtung darf nicht beim Anlegen und Ablegen behindern.

Die Hebevorrichtung muß mit dem verfügbaren Platz des Wasserliegeplatzes auskommen.

Die Hebevorrichtung könnte den Anlegevorgang (Einparken und Bremsen) mit entsprechenden Führungen unterstützen.

2. Katamaran heben

Die Hebevorrichtung soll das Heben des Katamaran innerhalb von 3 min ermöglichen.

Die Hebevorrichtung soll von einer Person bedienbar (d.h. insbesondere bequem und nicht im Wasser stehend oder schwimmend !) sein

Es soll reine Muskelkraft zum Heben verwendet werden (dies ist die Klarstellung der Anforderung Handbedienung). Hilfsantriebe sind unzulässig.

Die Hebevorrichtung muß einen Katamaran von ca. 145 kg sicher heben. *Im Rahmen der Kostenbeschränkung sollte man natürlich be-*

rücksichtigen, daß u.U. auch zusätzliche auf dem Katamaran liegende Gegenstände mit angehoben werden.

Die Hebevorrichtung soll den Katamaran dauerhaft aus dem Wasser heben.

Beim Heben soll die Vorrichtung gegen unbeabsichtigtes Absenken gesichert sein (plötzliches Loslassen o.ä.)

3. Katamaran senken

(Zusätzlich zu den unter Katamaran heben aufgeführten Anforderungen)

Die Hebevorrichtung sollte das kontrollierte Ablassen (kontrollierte Geschwindigkeit) des Katamarans in das Wasser ermöglichen.

Die Hebevorrichtung sollte die einfache Ausrichtung beim Ablassen des Katamaran unterstützen. Der Katamaran sollte gegen ungewolltes Drehen und Schwenken (z.B. wegen Seitenwind) gesichert sein.

4. Katamaran dauerhaft angehoben

Katamaran darf keinen Kontakt mehr zum Wasser haben.

Katamaran muß sicher gelagert sein.

Haben wir jetzt alle Anforderungen erfaßt? Der erfahrende Praktiker wird gleich bemerken, daß eine ganze Reihe von Anforderungen noch fehlen. So fehlt die Betrachtung der verschiedenen Lebensphasen eines Produktes angefangen bei dem Entwurf, der Konstruktion, der Fertigung und Montage bis hin zur Entsorgung und dem Recycling, die wir aber aus Platzgründen unter den Tisch fallen lassen.

Untersuchen wir die 4 Szenarien (zwei eigentliche Szenarien + Übergänge) noch mal in Zusammenhang auf die Produktumgebung:

Gewässer:

In Bezug auf die Hebevorrichtung werden wir mehrere Phänomene eines Gewässers berücksichtigen müssen. Als erstes wird Wasser und Luft immer zu einer Korrosion führen. Je nach Gewässertyp (Salzwasser oder Süßwasser) wird man die Konstruktion auf jeden Fall unter dem Gesichtspunkt der Korrosion planen müssen.

Zweitens können Wellenbildung am Wasserliegeplatz die Hebevorrichtung beeinträchtigen und unter Umständen beschädigen. Bei Tidengewässer ist natürlich der Tidenhub und die daraus resultierende Wasserbewegung und Wassertiefe von Interesse.

Als letztes spielt die Rolle der Wassertiefe unter dem Wasserliegeplatz eine Rolle. Zu einem um die maximale Eintauchtiefe der Hebevorrichtung zu berücksichtigen und andererseits abschätzen zu können ob man eine Hebevorrichtung am Grund verankern kann.

Die resultierenden Anforderungen sind

Die Hebevorrichtung muß korrosionsgerecht konstruiert werden. (Wir halten diese Aussage bewußt allgemein um dieses Beispiel nicht zu komplex werden zu lassen.)

Die Konstruktion muß die Stabilität der Konstruktion in Bezug auf möglichen Wellengang am Wasserliegeplatz berücksichtigen (insbesondere im abgesenkten Zustand)

Wetter:

Das Wetter spielt für die sichere Lagerung eine wichtige Rolle. Wellenschlag haben wir ja bereits unter dem Punkt *Gewässer* untersucht. Wichtigster Faktor des Wetters wird sicherlich Wind sein, da der Mast, die Stagen und die Wanten (vordere, seitliche und hintere Abspannung des Mastes) einen erheblichen Windwiderstand verursachen können. Weitere Faktoren wie Gewichtszuwachs durch Regen oder Eis vernachlässigen wir um das Beispiel einfach zu halten.

Die resultierende (globale) Anforderung ist:

Die Hebevorrichtung muß eine sichere Lagerung auch unter Sturmbedingungen gewährleisten.

Katamaran:

Die geometrischen Abmasse des Katamaran beschränken die technische Lösung der Hebevorrichtung. Die sich daraus ergebenden Anforderungen wollen wir hier nicht detailliert wiedergeben sondern nur generalisiert:

Die Hebevorrichtung muß den geometrischen Einschränkungen des Katamarans angepaßt sein.

Die Hebevorrichtung soll die Rümpfe des Katamarans möglichst wenig und beanspruchungsgerecht belasten. (d.h. keine zusätzli-

chen Bohrungen für Halterungen am Katamaran)

Bootssteg und Seegrund

Wie bereits erwähnt beschränken der Bootssteg und die Wassertiefe unter dem Katamaran die geometrischen Abmaße der Hebevorrichtung. Erwartungsgemäß in Hinsicht auf bestehende Vorrichtungen kann man hier auch weitere Anforderungen in Abhängigkeit von der Stabilität und Tragfähigkeit des Bootssteiges und des Seegrundes erwarten. Da dies aber bereits eine Lösungsabhängigkeit (Hebevorrichtung am Bootsteg oder Seegrund verankern) impliziert, betrachten wir diese Anforderungen noch nicht.

Zusätzliche Anforderungen

Aus der Überlegung heraus, daß der Bootseigner seinen Katamaran oder das Segelboot innerhalb der Lebensdauer der Hebevorrichtung wechselt, macht es natürlich Sinn sich Gedanken zu machen, ob und wie man die Hebevorrichtung an andere Rumpf- und Bootsformen adaptierbar machen kann. Desweiteren wird sich bei einem Bootswechsel auch das Bootsgewicht verändern. Wenn es der definierte Kostenrahmen zuläßt, so sollte man also diese zwei Anforderungen berücksichtigen:

Die Hebevorrichtung sollte auch an andere Rumpf und Bootsformen adaptierbar sein.

Die Hebevorrichtung sollte im definierten Kostenrahmen auch höhere Bootsgewichte handhaben können.

5 Wünsche

Die traditionelle Anforderungsliste unterscheidet nach Festforderungen und Wünschen. Wünsche haben oftmals den Charakter eines Optimierungszieles. Aus dem angeführten Beispiel könnte man die (bewußt generell gehaltene) Anforderung nach einer korrosionsgerechten Konstruktion erwähnen. Was heißt korrosionsgerecht in Bezug auf die Lebensdauer des Produktes? Andere typische Wünsche sind möglichst kostengünstige, möglichst leichte oder möglichst leistungsfähige Konstruktionen.

Wir schließen uns aber der gängigen industriellen Meinung an, daß jede Anforderung begründet und vor allem meßbar und testbar sein muß. Wünsche sollten also explizit zu Anforderungen getrennt und

unterschiedlich behandelt werden. Dem Kunden und dem Konstrukteur sollte bei der Formulierung eines Wunsches klar sein, daß dieser am Ende der Konstruktion nicht verifiziert wird. Soll ein Wunsch am Ende verifiziert werden, so müssen klare qualitative Maße vereinbart werden.

In gewisser Hinsicht sind Wünsche für den Konstrukteur optimal, da er sie in jedem Fall erfüllt. Bleibt nur zu hoffen, daß der Kunde dieselbe Definition eines Wunsches hat.

6 Zusammenfassung

Betrachtet man sich die Ergebnisse, der in der Klausur erarbeiteten Anforderungslisten, so kann man mehrere Erkenntnisse ableiten:

- Die, im Aufgabentext, genannten Anforderungen wurden von der Mehrzahl der Klausurteilnehmer erkannt.
- Standardanforderungen gemäß Korrosion, Wartung, Sicherheit oder Ergonomie werden häufig erkannt.
- Spezifische Anforderungen, die aus dem Umfeld abgeleitet werden müssen (Sturm, Wellenschlag etc.) wurden nur von wenigen Studenten erkannt.

Ein Faktor, daß in der Klausur nur relativ wenige Studenten externe Faktoren berücksichtigt haben liegt sicherlich unter dem Zeitdruck der Klausur. Es sollte jedoch im Laufe dieses Artikels verständlich geworden sein, daß Produkte heute nicht mehr isoliert betrachtet werden können, sondern immer im Zusammenhang mit ihrer Umgebung behandelt werden müssen.

Die Untersuchung sollte wenn möglich, nicht nur aus den verschiedenen Hauptmerkmalen heraus, sondern von den verschiedenen Sichten auf ein Produkt erfolgen.

Zu Schluß bleiben noch zwei Fragen. Haben die Autoren wirklich alle wesentlichen Anforderungen erfaßt? Hoffentlich ja, aber je mehr Sichten auch von den verschiedenen Experten der jeweiligen Domäne berücksichtigt werden, desto eher wird die Anforderungsliste vollständig sein.

Wie löst man jetzt das Konstruktionsproblem in unserem Beispiel optimal? Wir verraten es nicht, aber wie die Ergebnisse der Klausur gezeigt haben ist die Vorfizierung erheblich. Lediglich ein Student kam auf die Idee, das Wasser auch einen Auftrieb besitzt.

Viel Spass beim Rätseln. Eine einfache, preiswerte und effektive Lösung kann an vielen Bootsstegen und am Bootshaus der TU Clausthal in Augenschein genommen werden.

7 Literatur

- /1/ Pahl, G.; Beitz W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin 1993
- /2/ Franke, H.-J.: Methodische Schritte beim Klären konstruktiver Aufgabenstellungen, Konstruktion 27 (1975) 395-402
- /3/ Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band I, Springer Verlag, Berlin, 1994
- /4/ Sommerville, I.; Kotonya G.: Requirements Engineering – Processes and Techniques, Wiley, 1997
- /5/ Gausemeier J.; Fink A.; Schlake, O.: Szenario-Management – Planen und Führen mit Szenarien, Carl Hanser, 1996

Von der Idee zum greifbaren Bauteil in einigen Stunden – Zusammenspiel zeitgemäßer Konstruktions- und Fertigungstechniken

Käferstein, B.; Klemp, E.

Die Entwicklungszeit ist einer der entscheidenden Faktoren, der die Leistungsfähigkeit eines Industrieunternehmens charakterisiert. Je kleiner die Zeit zwischen Produktidee und Prototyp ist, desto höher ist die Konkurrenzfähigkeit. Die integrierte Produktentwicklung aus CAD, FEM, Rapid-Prototyping und Rapid Tooling ist das geeignete Werkzeug, um den Bezug von der Gedankenebene auf die Rechner Ebene und danach direkt zur physischen Welt zu schaffen. Anhand eines Schlüsselanhängers werden exemplarisch die im Institut für Maschinenwesen eingesetzten Techniken und vorgehenden Mittel dargestellt.

Time-To-Market is the most important keyword which characterises the main important potential of a company. The goal to be achieved must be to keep the time between idea and the first prototype as short as possible. The process of "Integrated product development and manufacturing" which includes CAD, FEA as well as Rapid prototyping and Rapid Tooling is the right tool to increase the companies market position. The use will allow to achieve a direct connection between the logical and the physical world within a short period of time. As an example to show the impact of these techniques and the capabilities of the tools being installed in IMW, a test part (key pendant) has been designed and been processed through this proceeding.

1 Einleitung

Der Wettbewerb zwingt die Unternehmen neben der Verkürzung ihrer Entwicklungszyklen auch dazu, bereits sehr früh mit technisch ausgereiften Produkten auf dem Markt präsent zu sein. Zur Verkürzung der Zeit von der Idee bis zur Markteinführung werden in der industriellen Anwendung Simulations- und Prototypenverfahren eingesetzt, um den hohen Erwartungen gerecht zu werden.

Am Beispiel eines Schlüsselanhängers soll exemplarisch eine am IMW im Vorbereitung stehende Prozedurkette (von der Idee zum Produkt) gezeigt werden, die von der Konstruktion über die Simulation bis hin zur Herstellung von Prototypenwerkzeu-

gen für den Spritzgußprozeß, einschließlich der Simulation des Spritzgußvorgangs alle Schritte enthält, die notwendig sind.

2 Die Verfahrenskette in der Praxis

Grundlegender Gedanke dieser Untersuchung war es, einen Schlüsselanhänger im IMW mittels Spritzgußverfahren herzustellen. Dadurch sollte die o. g. Verfahrenskette auf Praxistauglichkeit an einem Beispiel getestet werden. Bis auf den eigentlichen Abformprozeß und eine Rapid-Prototyping-Maschine verfügt das IMW über die entsprechenden Programme und Einrichtungen im CIM-Labor.

2.1 Der Gedanke und das Zielobjekt

Der Schlüsselanhänger hat dabei wesentliche Vorteile: Er ist klein, relativ einfach und zu Testzwecken muß nicht allzuviel Material eingesetzt werden. Desweiteren ist die Form recht einfach und überschaubar, so daß nur eine recht geringe Bauteilkomplexität vorliegt. Der Schlüsselanhänger als solches kann einerseits als anschauliches Muster der Prozedurkette verwendet werden, andererseits kann er als Geschenk für Institutsangehörige und Ehemalige des Institut als ein Erinnerungsstück dienen. Als Design wurde eine einfache Form gewählt, die im CAD-System ohne Freiformflächen erstellt werden kann und dem Motto „schlicht und funktionell“ folgt, **Bild 1**. Auf der einen Seite soll der Schriftzug des Instituts hervorstehen, auf der Rück-



Bild 1: Entwurf zum Schlüsselanhänger

seite zwei kämmende Zahnräder. Daß sich leider das Logo der TU Clausthal für die Rückseite nicht realisieren ließ, zeigt daß auch hier wieder einmal das Design an die Grenzen des technisch machbaren stößt. Die Schlüssel selbst werden durch eine Kugelkette gehalten, die durch zwei Bohrungen in das Innere geführt und festgeklemmt werden. Nach dem Erstellen der Skizze wurde der zweischalige Anhänger im 3D-CAD-System SolidWorks modelliert.

2.2 Wo der Maschinenbau einsetzt

Da das Design konstruktiv umgesetzt werden muß, treten gleich am Anfang zwei Probleme für den „normalen“ Maschinenbauer ohne Spritzgußhintergrundwissen auf:

- Wie setze ich das Design in spritzgußgerechte geometrische Körper um?
- Wie verbinde ich die Körper untereinander?
- Was hatte es seinerzeit mit der Gußkonstruktion allgemein auf sich?

Der erste Punkt läßt sich relativ leicht intuitiv durch Zerlegen der Geometrie in eine minimale Anzahl primitiver Geometrieelemente lösen und ist für einen erfahrenen CAD-Modellierer kein Problem. Der zweite Punkt bedarf des Literaturstudiums (Konstruktionskataloge), offener Augen (z.B. Fernbedienungen, Taschenrechner etc.) oder eines morphologischen Kastens. Es kommen dann Verbindungen wie Kleben, Schrauben, Einpressen und die diversen „Snap-Ins“ zustande, von denen eine ausgewählt wurde, **Bild 2**.

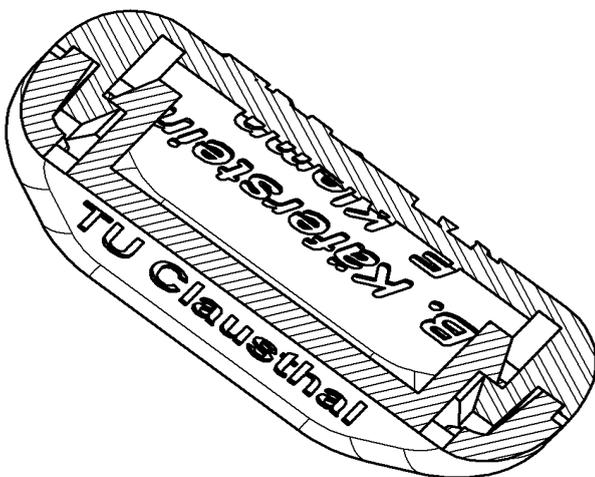


Bild 2: Querschnitt durch Anhänger mit Snap-In

Etwas komplizierter war das Umsetzen in eine Gußform, da hier ohne Hinterschneidungen gear-

beitet werden sollte, um Schieber zu vermeiden. Die „Teilungsebene“ ist nicht eben, sondern eine komplizierte Fläche und die Gußform ist zweiteilig. Dabei tauchen erhebliche Schwierigkeiten auf, deren Lösung erst ersichtlich ist, wenn man die Bauteile durch Subtraktion aus dem Formblock im CAD-System generiert. Der Ausspruch: „Hoppla- da war doch vorhin noch ein Absatz“ oder ähnliche sind dabei keine Seltenheit.

Insgesamt führt dies zu einem iterativen Prozeß, der – so beweist es die Praxis– nicht immer dem Optimum entgegenstrebt. Man richtet dabei aber keinen allzu großen Schaden an, da das CAD-System einen großen „Rückgängig“-Button hat, der glücklicherweise nicht ausleiern kann. **Bild 2** zeigt einen Schnitt durch die zweischalige Konstruktion mit der Snap-in Einhakverbindung, die durch Zusammendrücken der beiden Hälften einrastet. Getrennt werden die Teile durch einen Schraubenzieher, der die Haken aushebelt. Die Zentrierung erfolgt durch einen umlaufenden Bund.

2.3 Erstellung des Schlüsselanhängers im CAD-System

Zuerst werden die beiden Hälften modelliert und danach im CAD-System zu fertigen Anhänger zusammengesetzt, **Bild 3**. Dadurch wird sichergestellt, daß die Teile zusammenpassen und keine Überschneidungen oder Maßabweichungen auftreten. Außerdem hat man die Möglichkeit durch Materialzuweisung und Rendern einen ersten fotorealistischen Eindruck des Anhängers zu erhalten.

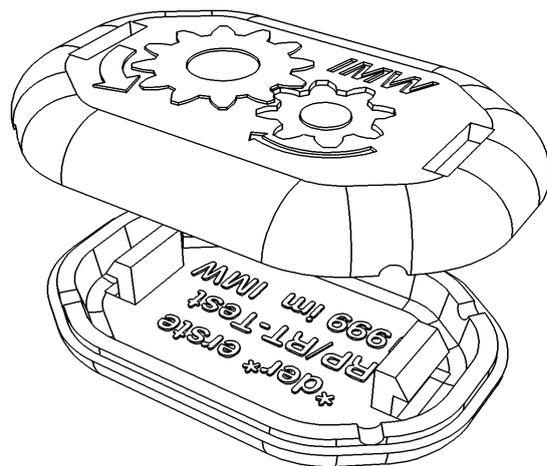


Bild 3: Schlüsselanhänger in Explosionsdarstellung

2.4 Erstellen der Negativformen

Das Erstellen der Negativformen für beide Schalen wurde ebenfalls im CAD-System vorgenommen.

Theoretisch könnte dazu ein globaler Skalierungsfaktor zur Kompensation des Schrumpfens eingestellt werden, was hier aber außer Acht gelassen wurde. Die Erstellung erfolgt durch boolesche Operationen zwischen Unterform, Oberform und den beiden Hälften der Konstruktion. Auf das Angußsystem wurde verzichtet, da es erst später durch die technologischen Fertigungsparameter festgelegt werden soll. Da Ober- und Unterkasten getrennt werden müssen und sich nicht gegenseitig oder mit dem Teil verhaken dürfen, muß auf Hinterschneidungen extrem sorgfältig geprüft werden. Das σ -folgt bei SolidWorks rein manuell, während z.B. ProEngineer das automatisch durchführt. Es ist zweckmäßig, erst nach der Subtraktion die Formschrägen einzubauen, da sonst unbeabsichtigte Stufen auftreten können.

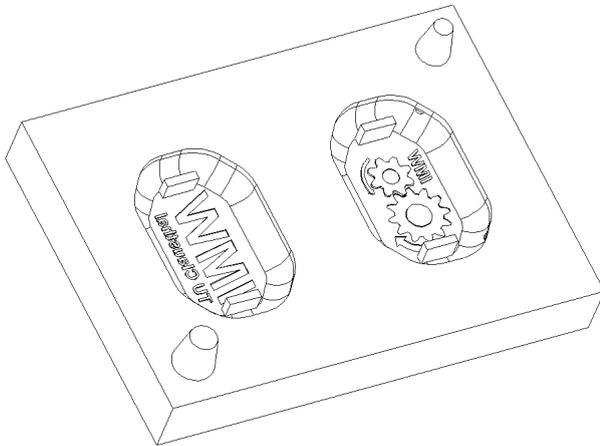


Bild 4: Negativform (Unterkasten)

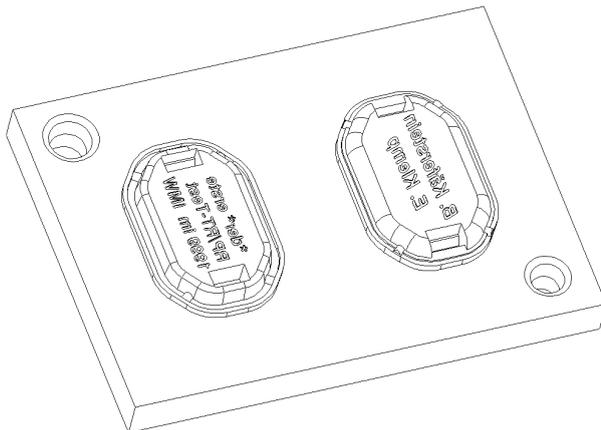


Bild 5: Negativform (Oberkasten)

Eine Generierung mit einer einzigen Subtraktion aus einem festen Block und anschließender Trennung in Ober- und Unterform ist aufgrund der komplexen Teilungsebene schwierig. Daher wurde eine schrittweisen „Herauserodierung“ bevorzugt, die aber einen deutlich höheren Rechen- und Zeitauf-

wand (Modellgröße im Speicher ca. 260 MB, Regenerierungszeit 25 min auf PII 400 MHz mit 256 MB Speicher) nach sich zieht. Aus Vereinfachungsgründen wurden die beiden Hälften aus einem einzigen Formblock herausgearbeitet und können werden dann auch in einem Arbeitsgang abgeformt.

2.5 Simulation für den Spritzgußprozeß

Durch Simulation sollen u.a. folgende Punkte geklärt werden:

- Kann das Bauteil in der vorhandenen Gestalt hergestellt werden?
- Füllt sich die Form komplett mit Kunststoff oder bleiben leere Bereiche übrig. Was muß verändert werden, um die Form vollständig zu füllen?
- Wo sind die Anstiche zu plazieren?
- Wie ist der Einfluß von Dicke, Druck, Temperatur und Kunststoff?
- Wie groß muß die Maschine sein?

Es wurde eine Testversion des einfach zu bedienenden Programms C-Mold 3D „QuickFill“ verwendet, das hervorragend mit Solidworks zusammenarbeitet. Es bietet die Möglichkeit STL-Dateien (Stereolithographie) von SolidWorks einzulesen. Nachdem die Werkstoffkennwerte (hier ABS), und die Maschinenkennwerte (Druck, Temperatur, Formtemperatur) eingegeben wurden, können die Angußpunkte gesetzt werden. Danach wird das Modell automatisch mit Tetraederelementen vernetzt und die Simulation gestartet. Es werden folgende Kenngrößen berechnet:

- Ausbreitung und Zusammentreffen der Schmelze, **Bild 6, Bild 10**
- Druckverteilung, **Bild 7**
- Temperaturverteilung, **Bild 8**
- Abkühlzeit
- Richtung der Fasern und Moleküle, **Bild 9**
- Anordnung der Belüftung, **Bild 11**
- Kurzbericht über Technologieparameter

2.6 Datenaufbereitung

Nachdem die Konstruktionsdaten als Datei vorliegen, müssen sie für die Verwendung in einer Rapid Prototyping oder Rapid Tooling Maschine vorbereitet werden. Dazu wird die 3D-CAD Datei im Stereolithographie-Format (*.STL) gespeichert und an den Rechner der Rapid Prototyping Maschine übertragen. Bei der Konvertierung in das STL-

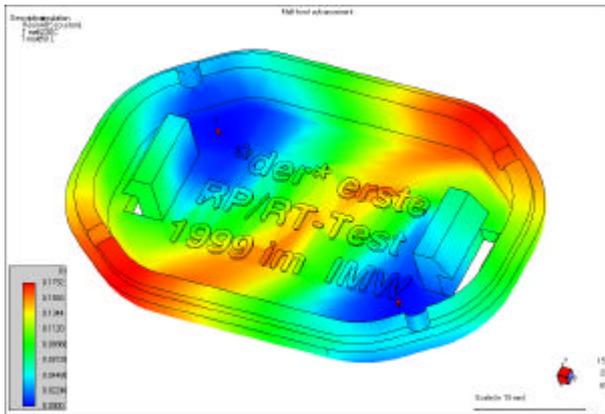


Bild 6: Ausbreitung der Schmelze

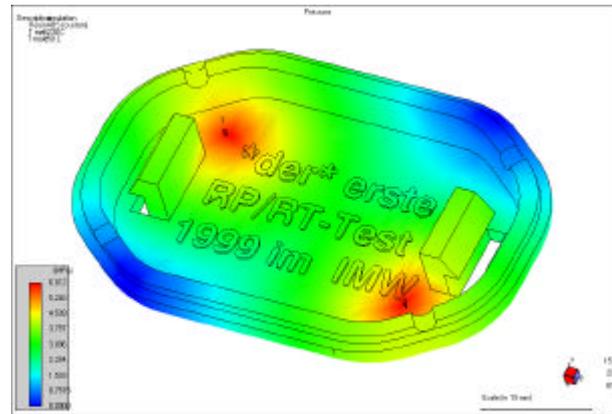


Bild 7: Druckverteilung

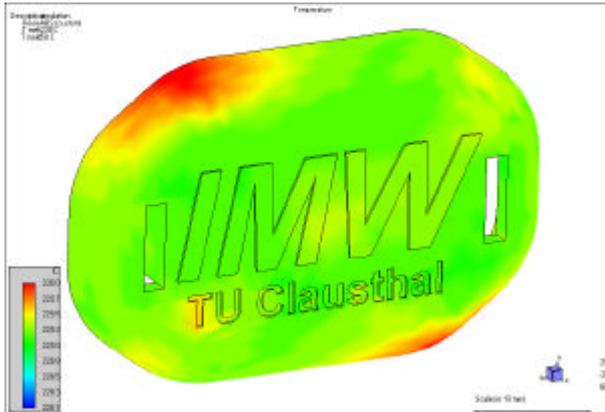


Bild 8: Temperaturverteilung Rückseite

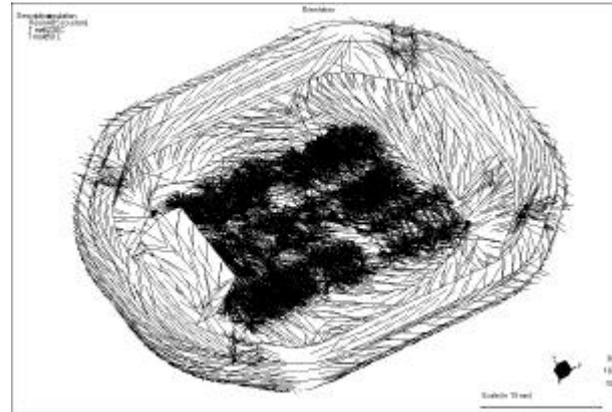


Bild 9: Faserrichtung und Kettenmolekülrichtung



Bild 10: Verschmelzungslinien



Bild 11: Potentielle Luftblasen (Belüftungsorte)

Format führt das CAD Programm eine Triangulierung durch, das bedeutet, das Bauteil wird in kleine Dreiecke zerlegt. Für die Übertragung der Daten steht im IMW das hausinterne Netzwerk mittels FTP-Protokoll zur Verfügung.

2.6.1 Vorbereitung der Daten

Die Datenaufbereitung hat das Ziel, die herzustellenden Bauteile für die Plazierung im Bauraum der Rapid Prototyping Maschine vorzubereiten. Dies geschieht in mehreren Stufen: Zunächst wird das Bauteil so gedreht, daß ein Plazieren auf der Bauplattform der Rapid Prototyping Maschine möglich ist. Das bedeutet, daß die plane Fläche nach unten zeigt. Durch Drehen des Bauteils in der Bauebene

(X-Y) kann der Einfluß von Biegespannungen auf das Bauteil, hervorgerufen durch den Materialauftrag auf die Bauplattform (sogenannte Wischerbewegung) verringert werden.

In einem nächsten Schritt wird eine Bauteilunterstützung (sog. Support) angebracht. Der Support ist bei unterhöhlten Flächen notwendig, denn beim generativen Verfahren können keine Bauteile im „freien Raum“ gebaut werden. Das bedeutet, daß ein Support an den Stellen angebracht werden muß, die einen Winkel größer als 30° oder einen Überhang von mehr als 3 mm zur vorhergehenden Bauteilschicht haben und somit Überhänge bilden. Bei der verwendeten Maschine vom Typ EOS M250 ist der Support auch notwendig, um das

Bauteil von der Bauplattform abzutrennen. **Bild 12** zeigt den Support an der Unterseite des Schlüsselanhängers.

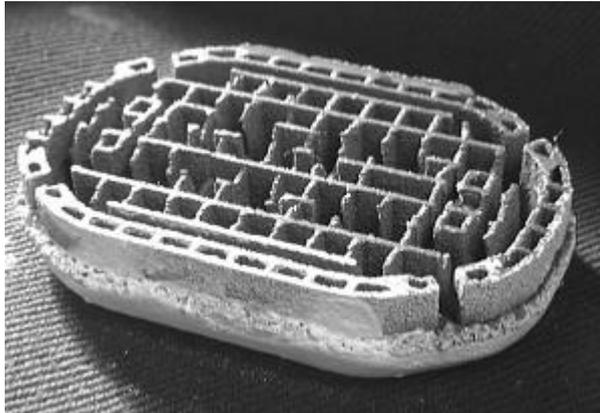


Bild 12: Support

Bei dieser Datenaufbereitung besteht die Möglichkeit, fehlerhafte Dateien zu reparieren, so daß die Rapid Prototyping Maschine unterbrechungsfrei durcharbeiten kann.

Nachdem die Datei soweit vorbereitet ist, müssen die Bauteildaten zur weiteren Verwendung an der Maschine in Schichten geschnitten werden (sogenanntes „Slicen“). Bei diesem Prozeß werden für die Bauteilhülle, den Kern und den Support eigene Arbeits- Dateien erzeugt. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, daß verschiedenen Strukturen (der Support muß sich nach dem Bau entfernen lassen und darf daher nicht so fest gebaut sein wie die Bauteilhülle) bestimmte Maschinenparameter zuordnen kann.

Nach Abschluß dieser vorbereitenden Arbeiten kann das endgültige Plazieren der Teile im Bauraum der Rapid Prototyping Maschine vorgenommen werden.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß bei der Vorbereitung der Daten auch eine Skalierung und das Erzeugen von Negativformen aus Positivmodellen (vergleichbar mit dem Vorgehen in Solid-Works), also der Erzeugung eines Formbauteils oder Spritzgußformeinsatzes möglich ist.

2.6.2 Prozeß des Rapid Prototyping und Rapid Tooling

Bei der Herstellung von Prototypenmodellen unterscheidet man das Rapid Prototyping vom Rapid Tooling. Beim Prototyping werden aus verschiedenen Materialien (Polyamid, Metall, Sand, Papier, Stärkemehl u.v.a.) Positivmodelle erstellt. Sie dienen der Anschauung, zum Abformen, zum Testen

des Einbaus etc. In Ergänzung hierzu steht das Rapid Tooling, das sogenannte Bauen von Werkzeugen. Bei diesem Verfahren werden nicht die Positive gebaut, sondern Prototypen in Form von Negativformen oder als Formeinsätze. Diese können in der Regel direkt in die Normalie einer Spritzgußmaschine eingesetzt werden. Standardmäßig sind dies ein oder zwei (Ober und Unterteil) Formbauteile (Formhälften), die direkt zum Abgießen verwendet werden können. Schließt man die beiden Formbauhälften, so entsteht ein Hohlraum in deren Mitte, in den das flüssige Spritzgußmaterial eingebracht wird und das Bauteil nach der Aushärtung vorliegt.



Bild 13: Schlüsselanhänger Oberseite unbehandelt

Gemeinsam ist beiden Verfahren, egal ob RP oder RT, daß aufbauend (generativ) ein Bauteil entsteht. Durch das lokale Belichten von losem, ungebundenem Material auf der Bauplattform entsteht Schicht für Schicht das Bauteil, das vorher als Modell im Rechner „gesliced“ wurde. Durch Absenken der Bauplattform um eine Schichtdicke von ca. 0,05 mm nach der Belichtung und erneutes Beschichten „wächst“ das Bauteil- von unbelichtetem Pulver umschlossen- nach unten in den Bauraum. **Bild 13** zeigt das aus Metallpulver hergestellte Positivmodell des Oberteils des Schlüsselanhängers.

2.6.3 Vorbereitung des Bauteil für den Spritzprozeß / Nachbearbeitung

Um die Rapid Tooling Bauteile im industriellen Herstellungsprozeß einzusetzen, ist eine gewisse Nacharbeit unumgänglich. So zeigt zum Beispiel Bild 13 deutliche Rauigkeiten auf der Oberseite und auf dem Support auf der Unterseite. Der Arbeitsaufwand ist abhängig vom gewählten Bauprozeß und dem Geschick des Einrichters, denn eine

gute Plazierung im Bauroum kann viel Nacharbeit verursachen oder vermeiden.

Nach der Entnahme der Stahl bzw. Metallwerkzeuge aus der RP Maschine muß zunächst das lose (nicht gesinterte) Pulver entfernt werden.

Da je nach verwendetem Pulver die Dichte zwischen nur ca. 70% der theoretisch erreichbaren Dichte beträgt, müssen Hohlräume aufgefüllt werden. Dies geschieht durch Infiltration mit einem Expydharz. Das Harz wird dabei vorsichtig auf das Bauteil aufgetragen

und dringt in die Oberfläche ein. Im anschließenden Ofenprozeß bei ca. 200°C härtet das Harz aus und sorgt somit für eine Verbesserung der Bauteil- und Materialeigenschaften. Eine zusätzlich aufgetragene Epoxydharzschicht dient zum Glätten der Oberfläche.

Eine weitere Möglichkeit der Oberflächenverbesserung bildet das Strahlen. Hierbei wird vorsichtig mit Strahlgut (meist kleine Metallkugeln oder Natursubstraten wie zum Beispiel Wallnußschalen) die Oberfläche verdichtet und geglättet. Damit die Maßhaltigkeit gewährleistet bleibt, ist darauf zu achten, daß kein Materialabtrag stattfindet.

Ein weiterer Schritt, der vor dem Einsetzen in die Normalie zu erledigen ist, ist das Entfernen des Supports und das Polieren der Oberflächen. Hier kann vorsichtig mit mechanischen Feilen und Schmirgelleinen gearbeitet werden, um eine exzellente Oberfläche zu erreichen.

Desweiteren werden in diesem Arbeitsgang die Schiebervorrichtungen, die bei Hinterschneidungen erforderlich sind, und der Anguß angebracht.

2.6.4 Verwendung und mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften eines so hergestellten Bauteils sind in erster Linie von der Wahl des eingesetzten Pulvers und von der Nachbehandlung durch Infiltration und mechanischem Strahlen abhängig. Es sind Bronze und Stahlpulver

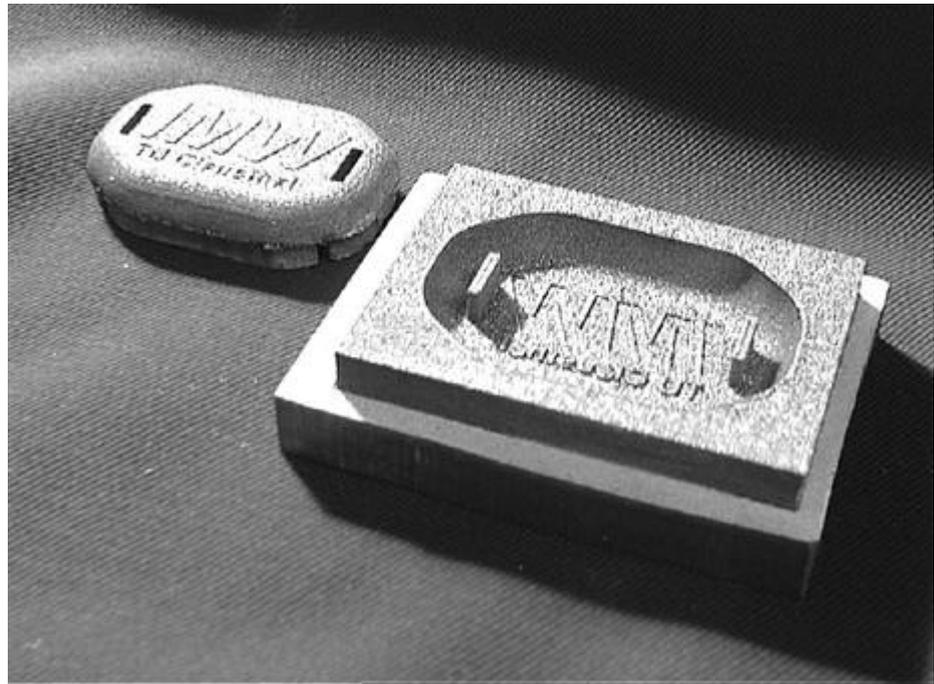


Bild 14 Positiv und Negativ des oberen Schlüsselanhängerteils

auf dem Markt erhältlich und es können je nach Art Biegebruchfestigkeiten von bis zu 900 N/mm² und eine Zugfestigkeit von bis zu 500 N/mm² erreicht werden. In den meisten Fällen genügen diese Werte durchaus, natürlich in Abhängigkeit von der Geometrie und den Belastungen, um mit diesen Bauteilen im Spritzgußverfahren Kleinserien bis über 10.000 Stück herzustellen, oder Prototypen zu testen. Die erreichbaren Werkstoffkennwerte sind in erster Linie abhängig vom Grad der Verdichtung durch mechanisches Strahlen und somit von der Dichte an der Oberfläche. Die Wärmeleitfähigkeit liegt zwischen 14 und 26 W/mK.

Bild 14 zeigt einen metallischen Prototypen der bei der Firma EOS im Werkstoff „Direct Metal 50-V2“ hergestellt wurde und das zugehörige obere Formbauteil.

3 Zusammenfassung

Es wurde anhand eines Schlüsselanhängers die CIM-Verfahrenskette von der CAD-Konstruktion bis zur Herstellung einer Spritzgußform mit dem Rapid Tooling Verfahren gezeigt. Dadurch kann für Spritzgußteile die Entwicklungszeit entscheidend verkürzt werden.

4 Literatur

- /1/ Solid-Works-Handbuch
- /2/ Weilhammer, Josef: Workshop C: EOS M250. EOS Usermeeting, Planegg 1999

SEDRES-2 – Systems Engineering Data Representation and Exchange Standardisation – 2

Düsing, C.; Goltz, M.; Heimannsfeld, K.

Anfang 2000 startet im Rahmen des EU IST (Information Societies Technology) Programms das Projekt SEDRES-2. Damit werden die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich Systementwicklung, Produktdefinition und Anforderungsmodellierung auf europäischer und internationaler Ebene fortgeführt. Der folgende Artikel gibt eine kurze Einführung in die Thematik und Ziele des SEDRES-2 Projektes.

The European IST (Information Societies Technology) project SEDRES-2 will start in the beginning of the Year 2000. This continues the IMW's research and development activities in system and requirements engineering on European and international level. The following article gives a short introduction and defines the goals of the SEDRES-2 project.

1 Organisation of SEDRES-2

After completing the contract preparation phase in October 1999 the kick-off for the SEDRES-2 project is planned in January 2000. SEDRES-2 is an 18 months project with a consortium mainly consisting of the major European enterprises of Aerospace and Defence industry:

Project co-ordinator:

- DaimlerChrysler Aerospace - DASA, Military Aircraft, Munich, Germany.

Industrial partners:

- AEROSPATIALE MATRA Lanceurs – AML, France
- Finmeccanica Alenia Aerospace-Aeronautics Division – ALENIA, Italy
- British Aerospace MA&A – Bae, United Kingdom
- SAAB Military Aircraft – SAAB, Sweden
- Società Italiana Avionica – SIA, Italy

STEP consultancy company:

- EUROSTEP Ltd – EUROSTEP, United Kingdom

Academic partners:

- University of Linköping – LIU, Sweden
- Loughborough University – LUTCHI, United Kingdom
- Technical University of Clausthal – TUC, Germany.

2 Project objectives

The SEDRES-2 mission statement is:

To extend, validate and standardise the Systems Engineering (SE) data model and nurture its practical implementation and multi-sector exploitation as a key enabler for the competitiveness of European industry.

The top-level objectives of the project are:

1. To drive the on-going AP-233 activity in the areas of data modelling, test material, document preparation, to ensure that European interests are represented in the emerging systems engineering data exchange standard;
2. To validate the standard by performing practical case study definition, prototyping, use and evaluation of the emerging standard within real SE activities;
3. To achieve the adoption ("take-up") of AP-233 by all stakeholders, by maximising the two-way dialogue between the first two tracks of work, and between SEDRES-2 and such stakeholders, and to ensure that the vision of generic systems engineering is appropriately supported by the emerging standard.

2.1 Driving the on-going AP-233 activity

The first objective is largely dictated by the nominal time frame of the AP-233 development, and the need for different types of, and levels of quality of ISO STEP products to become available against that timeframe. Products will include:

- Refined process (AAM) and data (ARM, AIM) models;

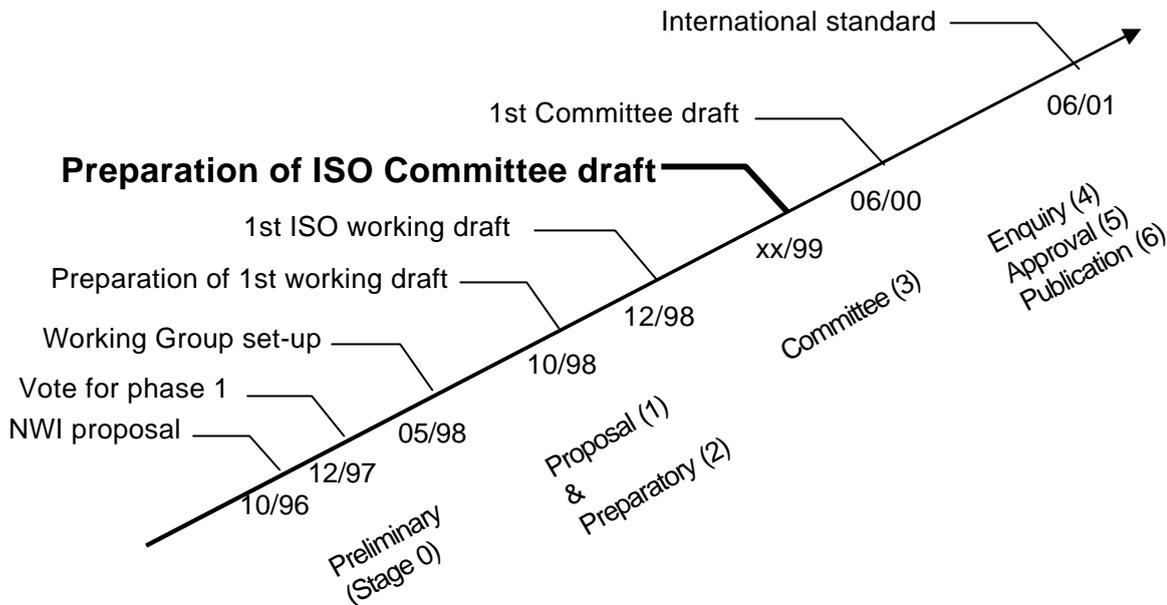


Figure 1: AP233 ISO development schedule

- Identification of, and subsequently rationalisation with, other STEP components, such as other AP's, Integrated Resources, and Modules (such as the PDM Schema);
- Abstract test suite material;
- Technical working documents addressing issues that arise, which would contribute to the Annexes required to support the AP-233 document set.

The AP-233-related documents have to be produced to fit the AP-233 development time scale, which includes development of 1st Committee Draft (CD) by June 2000; production of International Standard (IS) by June 2001. It is possible, due to the breadth of systems engineering data that a second version of AP-233 will subsequently need to be produced. Also note that the SEDRES-2 partners are not in control of the AP233 time frame; it is possible that the time frame will slip as indicated above. For these reasons, concluding work in a Stage 2 of SEDRES-2 is a potential future extension to SEDRES-2 outside of the current project contract.

2.2 Validation of the standard within real SE activities

The second objective is very much industry driven, and is to achieve a validation of the use and benefits of AP-233-based data sharing in an international, tool-heterogeneous, systems engineering environment. Two practical systems engineering case studies and associated contexts will be de-

veloped to focus the refinement of this objective down to further sub-objectives. The project will produce:

- Refined definitions of Validation Scenarios (VS's), case study material, implied requirements on the standard, representative SE roles played by partners, use of SE tools and subsets of the SE process to be exercised. The first validation scenario VS1 is based on real aircraft design material. Validation scenario VS2 deals with simplified data of the automated transfer vehicle (ATV) for the international space station ISS.
- definitions of the extended data domain to be covered (see figure 2);
- identification of the available technology that can be used to create SE tools interfaces, data repositories and sharing mechanisms;
- tool interfaces, and evaluation utilities forming a validation environment, and test results (the specific design tools currently planned to be used are listed in figure 2);
- evaluation objectives and approach, including effectiveness measures;
- results of exercising the Validation Scenarios and of the evaluation of the resulting SE environment, including projected cost savings and effectiveness metrics.

The technical areas for innovative prototyping & extension of the data model over the current generation SEDRES (1)/AP-233 data model include:

- extended requirements type handling, going beyond simple textual fragments to the rich

	Validation Scenario #1	Validation Scenario #2
Application Context	Aircraft	Space Vehicle
Phases of the system engineering process taken into account	Detailed design	Preliminary design
Technical data (domain) handled	- Detailed functionality - Properties - Behaviour - Configuration Management data	- System and Component Requirement - Physical - Preliminary design data - Traceability
System engineering environment	Statemate, MatrixX, Teamwork, Exchanges by STEP flat file	Labsys, StP, Teamwork, DOORS, Demanda, Exchanges by STEP flat file

Figure 2: Validation Scenario Context definition

- forms now found in customer requirements documents;
- property analysis, extending the data model to support analysis for certain non-functional system properties, including availability and safety properties.
- support for topological architectures;
- support for the object-oriented modelling paradigm;
- support for validation and verification activities;
- support for design traceability;
- development and validation of a trade studies framework;
- support for Product Data Management across systems engineering data, converged with PDM Schema work already happening internationally.

2.3 The SEDRES.network

The third objective reflects the aims of the SEDRES.network and dissemination activities as key elements in the adoption and takes up of the SEDRES-2 proposal. The following paragraphs explain the vision of the SEDRES.network concept, once this is fully realised as a focal point for a Systems Engineering cluster within a group of EC part-funded projects. Within the current SEDRES-2 project, there are activities planned and resourced to:

- create the initial support infrastructure for the SEDRES.network concept (in the form of a suitable web page);

- create initial operations of SEDRES.network, in so far as resources allow;
- create a Business Case for the full SEDRES.network realisation; this business case is likely to form a major part of a proposal for additional funding, based on the need for coordination of a group of EC projects around a systems engineering focus, and which would be a practical realisation of a project thematic cluster, with well-defined business objectives.

SEDRES.network has the objective to manage the evolution of the AP-233 standard across various stakeholders: users in aerospace and other sectors, ISO/STEP community, design tool vendors, the Com-mission, INCOSE. It will ensure the cross-sector cohesion of the emerging AP-233 data exchange standard, such that the standard fully supports the generic nature of systems engineering as practised across industry sectors, while managing the inevitable diversity that different sectors require, into an extensible architecture for the standard.

The SEDRES.network element of SEDRES-2 will interact with a number of distinct groups in the following ways. It will interact with the group of validation projects expected from each of a number of different industry sectors, to achieve a commitment to make use of emerging AP-233 interfaces for data exchange and a commitment to act as an SE environment validation project for SEDRES-2/AP-233. It will also ensure awareness and consistency of SEDRES/AP-233 and the availability of an interface development 'package', so reducing risk to such projects and SE tool vendors. Validation projects are planned or are expected to arise from: SEDRES-2 itself, with the prototyping and evaluation

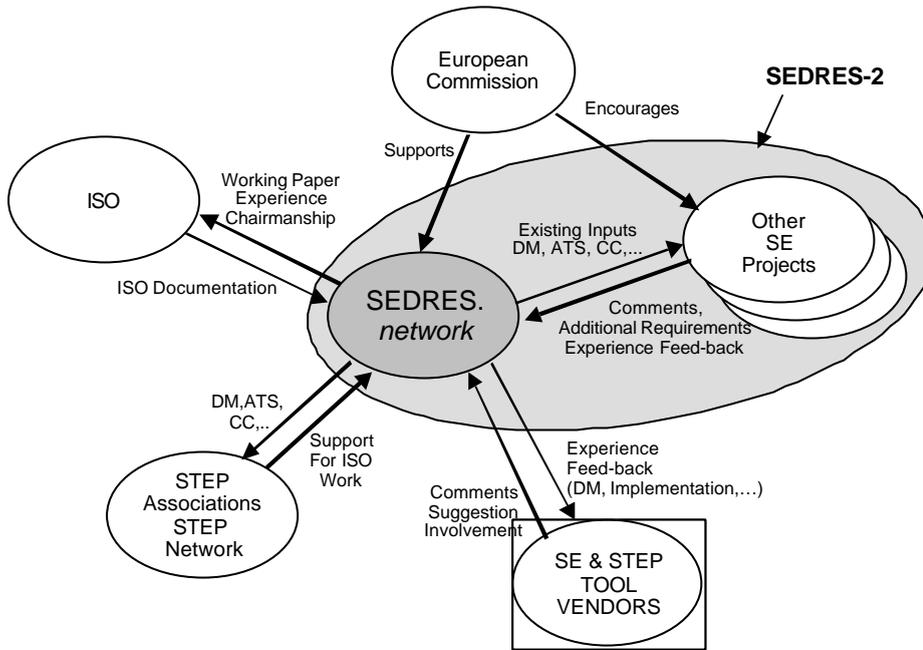


Figure 3: The SEDRES-2. network

activity using aircraft and ATV case studies; the WOODS project in the automotive industry, with a project led by Peugeot.

SEDRES.network has the objective to ensure that the AP-233 work group is informed about the ongoing technical developments and work status within SEDRES-2, so AP-233 will gain industrial and technical feedback from prototyping and evaluation experiences, and guidance on the core-standard versus industry-sector extensions.

SEDRES.network will interact with STEP Associations to obtain the current philosophy on STEP style and architecture, and achieve for them an awareness of SEDRES/AP-233 and of SEDRES-2 experiences. STEP Associations will make it easier for AP-233 to achieve appropriate quality, consistency and integration with existing STEP resources.

SEDRES.network will interact with SE & STEP Tool Vendors to obtain co-operation in the development of AP-233 interfaces, and identify trends on SE tool support for Product Data Management (PDM). Similarly, it will ensure that there is awareness within this group of SEDRES/AP-233 status and of SEDRES-2 experiences.

Finally, a web site will be developed as part of the SEDRES.network including the introduction of active working space.

In summary, in the current contract for SEDRES-2, there are minimum activities to support the definition of the SEDRES.network concept and its initial realisation, with the expectation that the business

case for a cluster focus would be targeted at a subsequent EC research call.

3 Overview of the work-package structure

The SEDRES-2 project is organised into seven work-packages (WP).

WP 1 defines the scope of the extensions to the existing SEDRES/AP233 data model. Furthermore, WP1 specifies the scope, the methodology and the evaluation objectives applied for the validation scenarios.

The focus of work-package 2 is the development of the data exchange standard, which will rely on internal experience and will take into account the external view captured through the SEDRES.network from the standard, application and technology axes.

The validation scenarios and the necessary software components and interfaces are developed and tested within work-package 3.

Work-package 4 deals with the evaluation of the standard by performing the validation scenarios.

The SEDRES.network as described before is established in work-package 5. The initial operation will be the development of a website.

Further exploitation and dissemination of the SEDRES-2 results will be done in work-package 6. Work-package 7 is dedicated to project management.

The participation of the Institut für Maschinenwesen is based on the knowledge gained within the EU projects KARE (Knowledge Acquisition and sharing for Requirements engineering) and SIMNET (Workflow Management for Simultaneous engineering networks).

The work will focus on the data modelling of the extensions to AP233 (WP2), development of the industrial validation scenario 2 (WP3) and its evaluation (WP4). The web support of the initial SEDRES.network for exploitation and dissemination will be part of the responsibilities in WP5 and WP6.

ProManual – Einsatz von Multimedia in der Produktdokumentation

Judith, M.

Im Rahmen des INCO-COP Projekts ProManual wird eine Methodik entwickelt, um einerseits die Benutzung von Produkten durch den Endanwender zu erleichtern und andererseits den Herstellern von Produkten die häufig recht umfangreiche Arbeit der Beschreibung der Produkte sowie die Erstellung von Produktdokumentationen zu erleichtern. Um die Funktionalität der neu entwickelten Methodik unter Beweis zu stellen, werden drei "intelligente" Produkthandbücher, d.h. elektronische Handbücher mit multimedialen Techniken, in Zusammenarbeit zwischen Universitäten und Industrieunternehmen prototypisch realisiert.

ProManual is an EC sponsored INCO-COP project. Subject is the development of a methodology to create intelligent product manuals which are in electronic form and based on multimedia. On the one hand the end-user can profit from it because he gets better access to the information and on the other hand the producer of certain products can benefit because he gets an easier and more flexible way to create product manuals.

1 Hintergrund 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.

Dabei soll das Informationsangebot, das mit "intelligenten" Produkthandbüchern (engl. Intelligent Product Manuals, IPM) durch den Einsatz von neuen Medien weit über das von konventionellen Produktdokumentationen in Papierform hinausgehen. Dies kommt im wesentlichen den Endanwendern des so beschriebenen Produkts zu Gute, die gezielter auf benötigte Informationen zugreifen und diese in einer geeigneten Form anzeigen lassen können.

Der Hersteller von Produkten profitiert aber auch direkt von der Einführung von "intelligenten" Produkthandbüchern. So wird ihm die Möglichkeit gegeben, die Daten, die im Laufe des Produktentstehungsprozesses entstehen und in elektronischen Systeme

men (z.B. CAD oder PDM Systeme) vorhanden sind, direkt in die Produktdokumentation zu übernehmen und in einer Wissensbasis zu speichern.

Beim Aufbau der Methodik zur Erstellung wird insbesondere darauf geachtet, daß sie einerseits den Möglichkeiten kleiner und mittelständischer Unternehmen, speziell solcher aus Mittel- und Osteuropa, angepaßt ist andererseits aber auch den aktuellen Stand der Technik berücksichtigt.

2 Das Projektkonsortium

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 Rousse (Bulgarien), die für die prototypische Implementierung der elektronischen Produkthandbücher für zwei Beispielprodukte verantwortlich sind. Sie arbeiten eng mit der dort ansässigen Industrie, die die benötigten technischen Daten und Informationen bereitstellt, zusammen.

Aus den Ländern der EU sind zwei Partner, die Cardiff School of Engineering (University of Wales) und das Institut für Maschinenwesen (IMW) der Technischen Universität Clausthal, beteiligt, die in erster Linie bei der Erstellung der Methodik sowie der Evaluierung der Prototypen mitarbeiten.

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

3 Die Projektfortschritte

Zu Anfang des Projekts wurde eine Problemstudie durchgeführt und anschließend eine Lösungsfindung ausgearbeitet. So wurden zunächst herkömmliche Produkthandbücher aus Papier sowie die einschlägigen gesetzlichen Vorschriften und Normen der relevanten Länder analysiert und daraus die Grundanforderungen an ein Produkthandbuch definiert. Daneben stand die Frage, wie ein "intelligentes" Produkthandbuch im Gegensatz zu einem herkömmlichen auszusehen habe. Die sich ergebenden Forderungen und Wünsche stehen in einem Spannungsfeld mit den Möglichkeiten, die

vorhandene Softwarewerkzeuge für eine Umsetzung bieten.

Nach dem Erstellen eines Rahmenkonzepts mit den Anforderungen und Wünschen sowie der Klärung der Möglichkeiten zu deren Realisierung durch vorhandene Programme stand anschließend das tatsächliche Erstellen eines intelligenten Produkthandbuchs mit realen Daten aus den beteiligten Unternehmen im Mittelpunkt. Als eine mögliche und durchaus sinnvolle Informationsquelle wurde der Produktlebenszyklus erkannt und analysiert. Während des gesamten Lebens eines Produktes, beginnend mit der Produktplanung über die Phasen Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Herstellung, Vertrieb, Betrieb bis zur Entsorgung oder einer Wiederverwertung werden Daten im Unternehmen erzeugt und in irgendeiner Form archiviert oder gespeichert.

Diese vorliegenden Daten wurden im zweiten Projektabschnitt auf die Relevanz für die Verwendung in einem Produkthandbuch untersucht und anschließend Methoden entwickelt, diese Daten von ihrem Ausgangszustand in andere Formen zu überführen, die in einem IPM verwendet werden können. Beispielfhaft zu nennen wären Zeichnungen und Stücklisten, die in CAD bzw. PDM Systemen vorhanden sind und die für Darstellungen in der Produktdokumentation genutzt werden können. Durch die IPM Methodik soll dabei eine Übernahme in einer möglichst automatisierten Art und Weise gewährleistet werden, so daß der Ersteller eines "intelligenten" Produkthandbuchs einen möglichst geringen Aufwand dabei hat. Eine Stückliste kann beispielsweise von den meisten CAD Systemen automatisch generiert werden und steht somit direkt zur Einbindung in ein "intelligentes" Produkthandbuch zur Verfügung.

Im dritten Arbeitspaket, das sich derzeit kurz vor dem Abschluß befindet, steht die Entwicklung und Implementierung von zwei Pilotanwendungen im Mittelpunkt. 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 hat und dieses erweitert. Für die bulgarische Firma SPARKY wird von der Universität Rousse ein Produkthandbuch für einen Gabelstapler entwickelt. Der enge Kontakt zwischen den Entwicklern der Produkthandbücher und den Firmen, die diese für ihre Produkte nutzen wollen, stellt sicher, daß praxisrele-

vante Anforderungen und Wünsche an die Produkthandbücher auch umgesetzt werden.

Im zurückliegenden Zeitraum war die Erweiterung und Verbesserung der prototypisch implementierten "intelligenten" Produkthandbücher vorrangig. Gleichzeitig wurden die zur Verfügung stehenden Softwarewerkzeuge und Methoden analysiert. Durch den Einsatz von Software, die relativ neu auf dem Markt erhältlich ist, wird nun sichergestellt, daß die Methodik zur Erstellung von IPM's den aktuellen Stand der Technik berücksichtigt, auch wenn es sich dann bei der späteren Anwendung der Methodik zur Erstellung kommerzieller Handbücher aus produkt- oder firmenspezifischen Gründen als sinnvoll erweisen kann, nur einfach anwendbare und schon länger etablierte Software zu verwenden.

Für die softwaremäßige Umsetzung und Implementierung eines "intelligenten" Produkthandbuchs bieten sich derzeit im wesentlichen drei verschiedene Dateiformate an:

- PDF
- SGML
- HTML

Die Verwendung des plattformunabhängigen Standards PDF ist dabei die einfachste und kostengünstigste Lösung, bei der die Dokumente aus MS-WORD heraus erzeugt und mit einem kostenlosen Viewer betrachtet werden können. Allerdings kann PDF nicht für online Datenübertragung über das Internet genutzt werden, was die Verwendung einschränkt. Dies ist jedoch bei SGML und HTML, die speziell für Internetanwendungen entwickelt wurden, möglich. HTML ist eine kostengünstige Möglichkeit, einfach aufgebaute elektronische Dokumente zu publizieren. Es hat sich bei der Verwendung von HTML aber teilweise das Problem ergeben, daß es durch Weiterentwicklungen zwischen älteren und neueren Versionen zu Problemen kommen kann, wenn ältere (Multimedia-) Dokumente mit neueren HTML Browsern gelesen werden sollen. Mit einem höheren Kostenrahmen hingegen ist es möglich, auf einen SGML basierten Lösungsansatz zurückzugreifen. SGML beinhaltet weitestgehend die HTML Funktionalität, besitzt aber weitere sinnvolle Möglichkeiten, die robust sind und flexibel erweitert werden können. Neben höheren Kosten muß bedacht werden, daß die Dokumentenerstellung in SGML je nach deren gewünschten Funktionalität teilweise aufwendiger als bei HTML ist und für neue Benutzer eine intensivere Einarbeitung erfordert. Vielversprechend auf dem Gebiet

der Internetsprachen scheint XML zu sein, das recht neu ist und wesentliche Vorteile von SGML übernimmt, aber von wesentlich geringer Komplexität ist.

Für die prototypisch implementierten "intelligenten" Produkthandbücher, die im Rahmen dieses Projekts entwickelt werden, werden je nach Anwendungsfall PDF, HTML sowie SGML verwendet.

Entscheidend für die Auswahl sind neben dem zu beschreibenden Produkt auch das Unternehmen sowie die gewünschte Ausführung als offline oder onlinefähiges Handbuch. Daneben wurden bereits Teile bzw. Module der bestehenden Prototypen in XML umgesetzt, um vergleichende Aussagen machen zu können.

4 Neue Module des letzten Zeitraums

In das IPM der Drehmaschine wurden neue Module zum Prototypen hinzugefügt. Zu Ausbildungszwecken wurde ein hypermediales CNC Tutorium (**Bild 1**) entwickelt, das mit Hilfe von Animationen sowie anderer multimedialer Methoden die Funktionsweise der speziellen Drehmaschine beschreibt.



Bild 1: Interaktives CNC Tutorium mit Steuerelementen (rechts unten)

Die Fehlerbaum-basierte Analyse wurde erweitert und auf weitere Anwendungsgebiete ausgedehnt. Es wurde ein System entwickelt, mit dem man durch den Einsatz von neuronalen Netzen Schwingungsuntersuchungen am Reitstock der Drehmaschine durchführen kann, sowie Vergleiche mit aufgezeichneten und archivierten Geräuschen angestellt werden können. Eine weitere Neuerung, die von den industriellen Projektpartnern ausdrücklich gewünscht wurde, ist die Möglichkeit, direkt aus dem "intelligenten" Produkthandbuch heraus Ersatzteile zu bestellen. Durch eine Auswahl im Manual werden die entsprechenden Teile vorgemerkt und die Bestellnummer automatisch in ein elektronisches Bestellformular übernommen. Anschließend kann die Bestellung per Email an die Firma geschickt werden.

Der IPM Prototyp des Gabelstaplers ist im Bereich Fehlerdiagnostik erheblich erweitert worden. **Bild 2** zeigt exemplarisch an einem einfachen Beispiel die interne Struktur eines Fehlerbaums, die von den Symptomen über mögliche Fehler zu möglichen Maßnahmen zur Behebung der Fehler führt. Neuerungen haben sich innerhalb

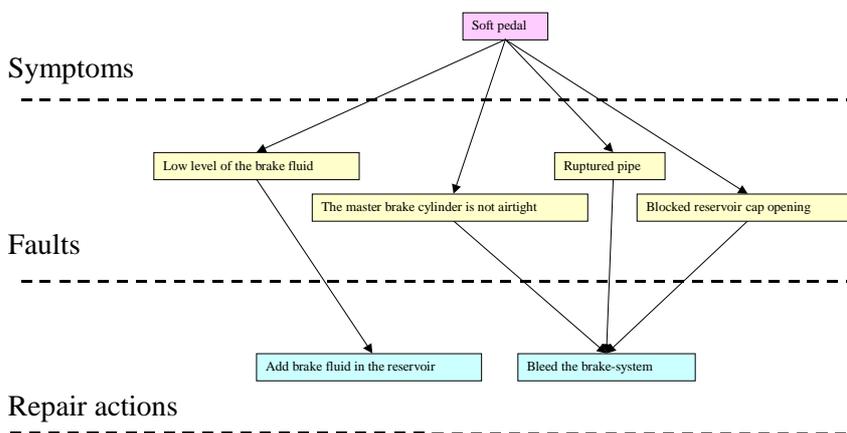


Bild 2: Fehlerbaum für ein defektes Bremspedal

des Fahrsimulator Moduls ergeben, das zur Ausbildung und zum Training neuer Fahrer Verwendung finden soll. Dieser ist um einige wesentliche interaktive Features erweitert worden, die dem Fahrer eine realitätsnahe Umgebung vermitteln.

5 Bewertung und Evaluierung der Prototypen

Im letzten Arbeitspaket des Projekts, das vor kurzer Zeit begann, geht es darum, die IPM Prototypen, die für die industriellen Partner erstellt wurden, zu bewerten und gegebenenfalls Verbesserungsvorschläge aufzuzeigen, die in den letzten Versionen der Prototypen noch Umsetzung finden sollen.

Die Bewertung der "intelligenten" Produkthandbücher soll sowohl intern im Konsortium, dabei hauptsächlich von den industriellen Partnern, als auch von externen Firmen oder Organisationen, die nicht direkt an den Entwicklungen der "intelligenten" Handbüchern beteiligt sind, durchgeführt werden.

Entsprechend den Personengruppen, die die Bewertung durchführen sollen (Ingenieure, Entwickler, Endanwender etc.), werden Fragebögen unterschiedlichen Umfangs und Inhalts erstellt. Im wesentlichen werden die folgenden Bereiche abgefragt:

- Inhalt des "intelligenten" Produkthandbuchs (einschließlich Vollständigkeit, Strukturierung, Verständlichkeit)
- Verwendung von IT Techniken und Features
- Präsentation und Aufbereitung der Daten
- Systemumgebung des IPM (Hard- und Softwarevoraussetzungen, IPM Distribution, Installationsprozeduren, Pflege des IPM)
- Softwareergonomie
- Anpassungsfähigkeit an den Benutzer, Erwartungskonformität

Durch den engen Kontakt nicht nur mit den im Konsortium vertretenen Industrieunternehmen sondern auch mit weiteren Firmen und Berücksichtigung deren Vorstellungen soll sichergestellt werden, daß die entwickelte Methodik auch außerhalb dieses Projekts Verbreitung findet.

6 Zusammenfassung

Nachdem in den ersten Phasen des Projekts ProManual die Anforderungen an ein elektronisches "intelligentes" Produkthandbuch definiert und Me-

thodiken zum Erstellen von "intelligenten" Handbüchern erarbeitet worden sind, konzentrierten sich die Arbeiten im letzten Zeitraum auf die Erstellung zweier prototypisch implementierter Handbücher, die mit weiterem Fortschritt des Projekts ergänzt und verbessert werden. Durch das Einbeziehen neuer Technologien aus dem Umfeld des Internets und der IT befinden sich die Methoden von ProManual auf dem aktuellen Stand der Technik. Sie bieten damit die Möglichkeit entsprechend den konkreten Anforderungen aus den Unternehmen schnell innovative Produkthandbücher zu erstellen.

7 Literatur

- /1/ Ort, A.: ProManual: Erstellung elektronisch verfügbarer Produkthandbücher, Institutsmitteilung Nr. 22, IMW Clausthal 1997
- /2/ Judith, M.: ProManual – Intelligente Produkthandbücher, Institutsmitteilung Nr. 23, IMW Clausthal 1998

Einsatz von neuronalen Netzen und Fuzzy-Technologie in der vorbeugenden Störfallsimulation

Beisheim, N.

Immer häufiger werden wissensbasierte Systeme bei der Entwicklung komplexer Maschinen und Anlagen eingesetzt. Durch das Erfassen, Aufbereiten und Bereitstellen von Erfahrungswissen von der Entwicklung bis zur Wartung bereits realisierter Konstruktionen entstehen Systeme zur Unterstützung des Konstrukteurs schon in den Planungsphasen eines neuen Produkts. Die zusätzliche Integration von Methoden Computational Intelligenz wie neuronale Netze und Fuzzy-Technologie in ein solches System ermöglicht auch eine präventive Störfall- und Fehleranalyse von komplexen Anlagen schon während deren Planung. In diesem Artikel werden allgemein Möglichkeiten und Einsatzfelder von neuronalen Netzen und Fuzzy Technologie in solchen Systemen dargestellt.

Knowledge based systems are often used in the engineering process of complex machines and systems. By evaluating, preparing and presenting empirical knowledge from the engineering process up to maintenance, systems are already created to support of the designer in the planning stages of a product. The additional integration of intelligence methods such as neural nets and Fuzzy technology into such a system positions large advantages in the case of preventive failure and hazard analysis in complex planning. The possibilities and the combination possibilities of neural nets and Fuzzy technology in such systems are represented in this paper.

1 Einleitung

Bei komplexen Systemen, wie sie im Maschinenbau und der Verfahrenstechnik immer häufiger zu entwickeln sind, kann durch wissensbasierte Systeme das Risiko von potentiellen Störfällen, Fehlbedienungen etc. schon in der Planungsphase gemindert werden. Die Voraussetzung dafür ist die Bereitstellung von Wissen der der Konstruktion nachgelagerten Bereiche Arbeitsvorbereitung, Fertigung, Wartung und Vertrieb schon in frühen Phasen der Entwicklung eines Produkts. Das Erfahrungswissen aller Bereiche, die an der Prozeßkette eines Produkts beteiligt sind, ist zu erfassen, aufzubereiten und in einer Weise zur Verfügung zu

stellen, daß der Konstrukteur damit in der Lage ist, die Auswirkungen seines Handelns in den anderen Bereichen zu erkennen. Dieser Informationsfluß ist in **Bild 1** dargestellt. Ein weiteres Aufgabenfeld ist das Verbinden des Erfahrungswissens der verschiedenen Fachbereiche, die bei der Entwicklung in interdisziplinär aufgebauten Konstruktionsteams mitwirken. Durch die Komplexität der Produkte ist die Zusammenarbeit von Experten der Fachbereiche im Team nötig, wodurch aber Kommunikationsprobleme im Bereich der technischen Verständigung auftreten. In diesem Umfeld können wissensbasierte Systeme, in denen dasselbe Wissen für den Zugriff durch verschiedene Anwender mit unterschiedlicher Sichtweise aufbereitet wird, große Vorteile bringen. Ein Ansatz dazu soll in dem Projekt A2 im SFB 180 für die Verknüpfung der Fachbereiche Verfahrenstechnik und Maschinenbau im Bereich der Störfall- und Fehleranalyse bei der Entwicklung verfahrenstechnischer Anlagen aufgezeigt werden. Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf der Entwicklung und prototypischen Umsetzung einer Methodik zur Erfassung, Analyse und Rückführung von Informationen über Fehler und Störfälle aus den der Konstruktion nachgelagerten Bereichen.

Bei der Bereitstellung der Informationen für den Konstrukteur werden unter anderem Methoden wie künstliche neuronale Netze (KNN) und Fuzzy Technologie eingesetzt. In diesen Methoden kann das Erfahrungswissen von bereits entwickelten Anlagen gespeichert und dann bei der Entwicklung von neuen Anlagen zur Verfügung gestellt werden. Diese Methoden werden allgemein sowohl bei der Regelung von Prozessen als auch zu deren Simulation eingesetzt.

Im Rahmen eines Projekts wird mit diesen Methoden in Verbindung mit Datenbank- und Internet-Technologie ein Konstruktions-Informationssystem entwickelt, das die maschinentechnische Konstruktion mit der verfahrenstechnischen Störfallanalyse verknüpft. Durch die so entstehenden Simulationsmodelle ist es bereits bei der Konstruktion neuer technischer Anlagen möglich, die Ursachen und Auswirkungen von Fehlern, Störungen etc. zu er-

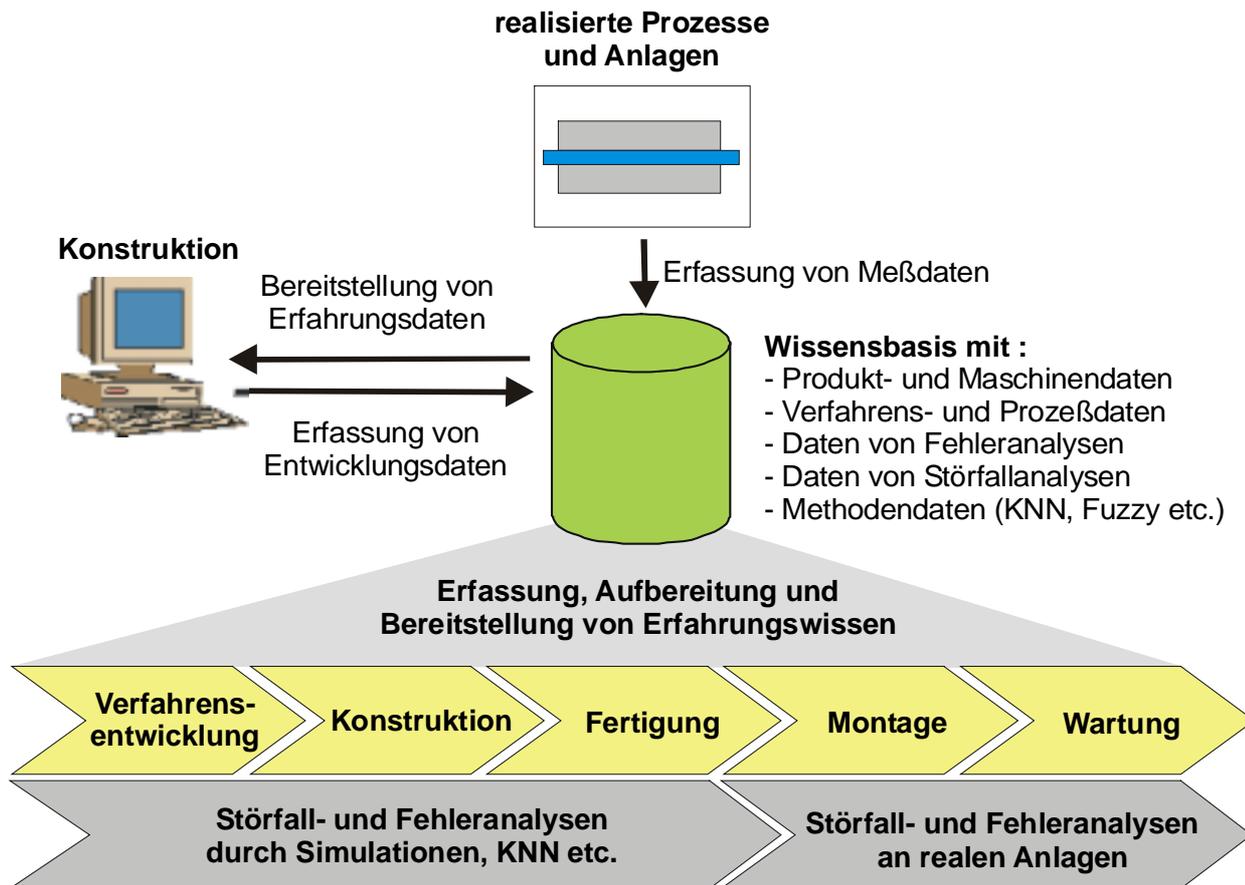


Bild 1: Aufbau eines wissensbasierten Systems mit Integration von Störfall- und Fehleranalysen

kennen und mögliche Fehlerquellen zu vermeiden. Das Informations-System ist somit ein konstruktionsunterstützendes System zur präventiven Störfall- und Fehlervermeidung. Der Kern der Arbeiten besteht in der Ausarbeitung der Methodik zur Erfassung, Aufbereitung und Bereitstellung des Erfahrungswissens von verfahrenstechnischen Anlagen.

Die Integration der Methoden KNN und Fuzzy in ein Konstruktions-Informationssystem erfordert eine durchgängige Strukturierung sämtlicher Daten. Erst durch die Zuordnung der Methodendaten zu den Daten des Prozesses und der Maschinen entsteht ein System, das den Konstrukteur als auch den Verfahrenstechniker optimal unterstützt.

In diesem Artikel werden die grundsätzlichen Möglichkeiten zum Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen und Fuzzy Technologie zur Simulation, Regelung und Optimierung technischer Prozesse erläutert.

2 Wissensbasierte Systeme

Wissensbasierte Systeme, in Sonderfällen auch als Expertensysteme bezeichnet, haben nach /5/ die Fähigkeit, komplexe schlecht strukturierbare Pro-

bleme lösen zu können. In ihnen sollen die Strukturen bzw. Informationen der Realität abgebildet werden. Dieses kann aber nur in einem genau definierten Spezialgebiet erfolgen, dabei können dann aber die Fähigkeiten eines menschlichen Experten mit dem System erreicht werden. Die Haupteinsatzgebiete für Expertensysteme sind :

- Komplexe Strukturen und Probleme
- Unbekannte Lösungsalgorithmen
- Zugriff auf Spezialwissen durch interdisziplinäre Teams
- Speicherung von Erfahrungswissen

Gerade die beiden letzten Punkte werden heute immer wichtiger. Die Komplexität vieler Anlagen, Maschinen und Systeme macht die Zusammenarbeit von interdisziplinär aufgebauten Teams erforderlich. Diese Zusammenarbeit kann aber durch inhaltliche Kommunikationsprobleme erschwert werden. Der Einsatz von wissensbasierten Systemen ist ein Ansatz zur Lösung solcher Probleme.

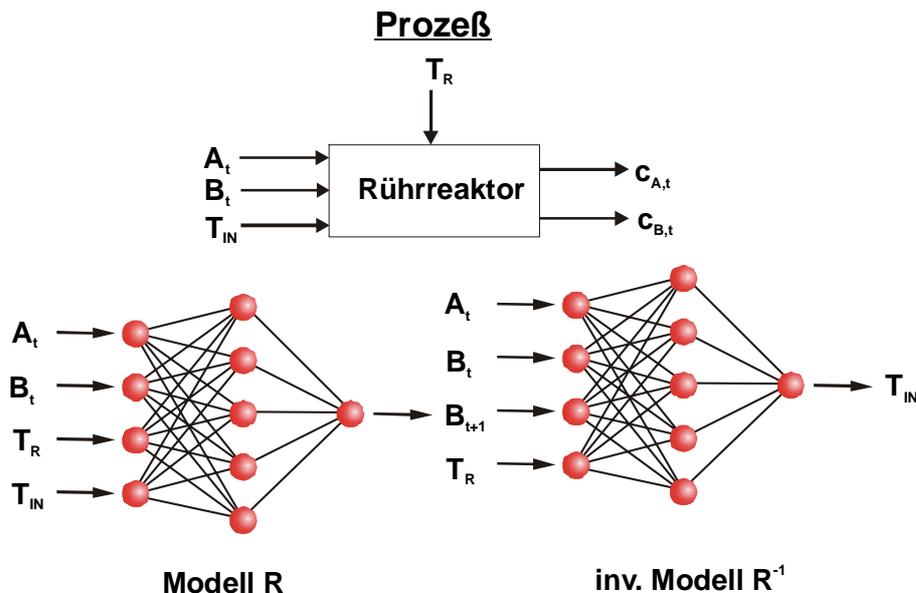


Bild 2: Einsatz inverser KNN zur Optimierung von Prozessparametern

3 Einsatz- und Kombinationsmöglichkeiten von KNN

Der Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen (KNN) bietet sich immer dann an, wenn zwar Datensätze über die Ein- und Ausgabegrößen eines Prozesses vorhanden sind, die den Prozeß kennzeichnen, eine Abbildung des Prozesses mit mathematischen oder physikalischen Modellen aber nicht möglich ist. Mit den Algorithmen der KNN ist dann eine gute Modellierung des Prozesses möglich. Eine praktische Anwendung von KNN ist in /2/ beschrieben. Sind neben den Eingangs- und Ausgangsgrößen auch die Sollwerte und die Stellgrößen bekannt, kann auch die Regelung des Prozesses von KNN übernommen werden.

Die KNN bestehen aus Algorithmen als lernende Polynome nichtlinearer Übertragungsfunktionen, die durch Approximationsverfahren lernen, Vektoren aufeinander abzubilden. Besteht im Prozeß eine Beziehung zwischen meßbaren und nicht-meßbaren Größen, so kann das KNN aus den Daten der meßbaren Größen diese nicht-meßbaren vorherbestimmen.

Auch die Optimierung einer Größe zur Regelung eines Prozesses kann vom KNN vorgenommen werden. Dazu muß eine Kombination von KNN erzeugt werden, bei der ein zweites Netz als inverses Netz zum ersten aufgebaut wird. **Bild 2** zeigt den schematischen Aufbau einer solchen Kombination zur Bestimmung eines optimalen Prozessparameters. Es handelt sich bei dem Prozeß um einen Rührreaktor, bei dem sich ein Stoff A im tempera-

turabhängigen Gleichgewicht mit einem Stoff B befindet. Bei einer bestimmten Eingangstemperatur T_{IN} zum Zeitpunkt t und einer Temperatur im Reaktor T_R stellen sich die Konzentrationen $c_{A,t}$ und $c_{B,t}$ ein /1/.

Das Ziel der Simulation ist die Bestimmung der Temperatur $T_{IN,t+1}$ zum Zeitpunkt $t+1$, mit dem eine bestimmte Konzentration $c_{B,t+1}$ des Stoffes B zum selben Zeitpunkt als Funktion $c_{B,t+1} = f([c_{A,t}, c_{B,t}, T_R, T_{IN}])$ erreicht wird.

Das erste KNN wird mit den Werten $c_{A,t}$, $c_{B,t}$, T_R , T_{IN} trainiert und gibt die Konzentration $c_{B,t+1}$ aus. Es verhält sich also nach dem Training wie ein Abbild des Reaktors und kann die Konzentration des Stoffes B vorherbestimmen.

Das zweite KNN muß nun mit dem Zusammenhang zwischen Zielkonzentration und der benötigten Eingangstemperatur T_{IN} trainiert werden. Dieses Netz berechnet dann die Temperatur für die gewünschte Zielkonzentration $c_{B,t+1}$ des Stoffes B. Dieser berechnete Temperaturwert kann dann an der Steuerung des Reaktors eingestellt werden.

4 Simulation und Regelung durch KNN

In zunehmendem Maße werden neuronale Netze für die Steuerung/Regelung und Simulation verfahrenstechnischer oder allgemein technischer Prozesse eingesetzt. Der Grund dafür sind unbekannte mathematische oder physikalische Modelle, nichtlineare Verfahren und unbekannte Wechselwirkungen der beteiligten Stoffe und physikalischen Größen. Ohne die KNN würde in der Praxis dadurch eine kontinuierliche bzw. manuelle Steuerung und Regelung erforderlich. Künstliche neuronale Netze (KNN) bieten hier großes wirtschaftliches und sicherheitsrelevantes Potential. Mit ihnen können intelligente Systeme zur Regelung, Simulation und Automation aufgebaut werden, die folgende Vorteile bieten :

- Reduzierung der Anfahrzeiten
- Optimierung des Stoff- und Energieumsatzes
- Beschleunigung des Einregelverhaltens

- Verringerung der Streubreite der Endprodukte
- Vermeidung von umweltgefährdenden Störfällen
- Trainingsmöglichkeit für Bedienpersonal

Aus diesen Vorteilen wird ersichtlich, daß die KNN für zwei Schwerpunkte der gesamten Prozesskette eingesetzt werden:

- als Modell des eigentlichen verfahrenstechnischen Prozesses
- zum Erlernen des Erfahrungswissens des Prozessbedieners

Das Training der KNN muß durch die Eingabe der Stellwerte und Verknüpfung mit den Werten und Größen der Endprodukte erfolgen. Die KNN sind dann in der Lage, das Verhalten des Prozesses und das des Bedieners zu simulieren. Die Genauigkeit der Netze ist dann mit weiteren Werten zu verifizieren.

Bild 3 zeigt das System zum Einsatz von KNN zum Antrainieren des Erfahrungswissens des Bedienpersonals in das Netz. Der Einsatz der Netze entlastet das Bedienpersonal bei der Regelung der Anlage von Routineaufgaben. Nur in Ausnahmefällen sind manuelle Eingriffe erforderlich. Das Training erfolgt in Parallelschaltung zum Bediener. Dessen Sollwerte zum Stellen des Prozesses werden im KNN registriert und mit den Stellwerten als Istwerte des Bedieners als Feedback verknüpft. Nach einer gewissen Trainingszeit kann das Netz den Bediener unterstützen.

Bild 4 zeigt schematisch den Einsatz von KNN zur Simulation des eigentlichen Prozesses. Das Modell kann dann verwendet werden, um die Antwort des Prozesses auf neue Stellwerte theoretisch zu testen. Das kann erforderlich sein, wenn es sich bei dem Prozeß um eine neue Kombination bereits

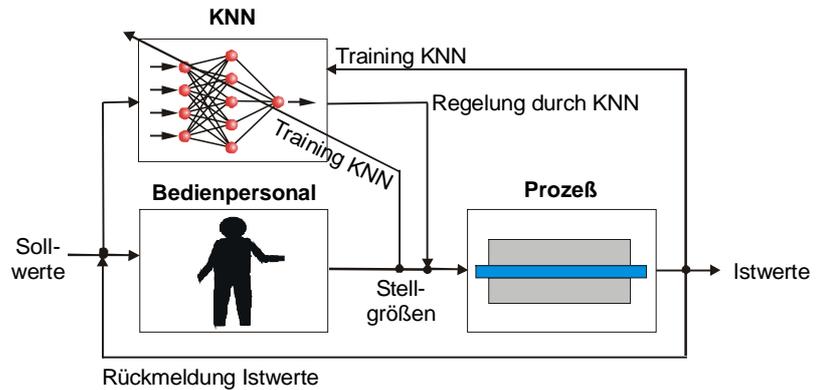


Bild 3: Einsatz KNN zur Regelung von Prozessen

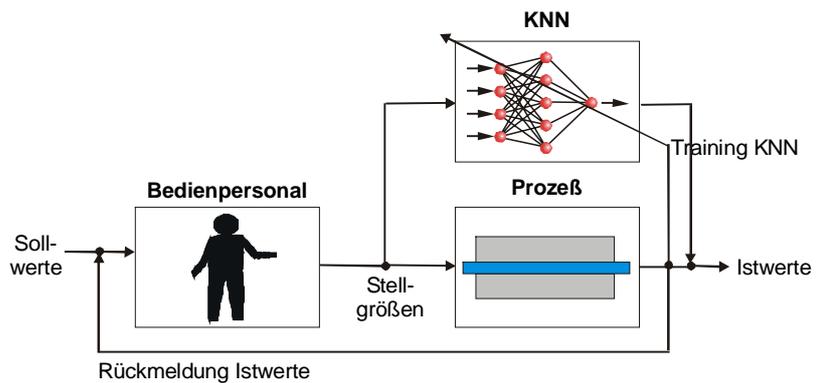


Bild 4: Einsatz KNN zur Simulation des Prozesses

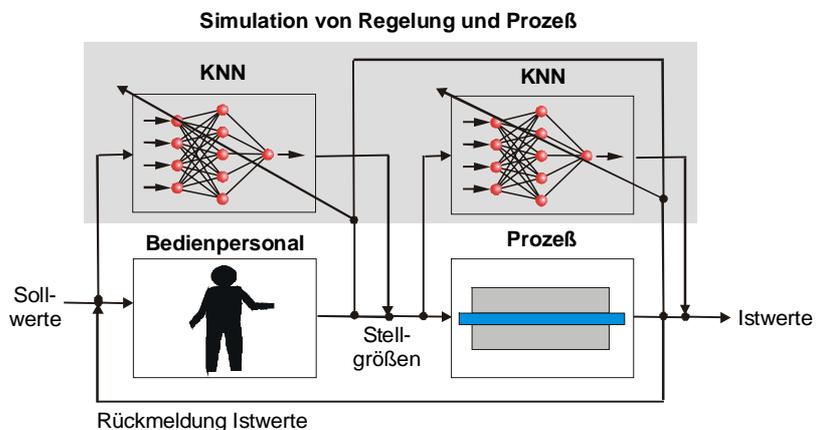


Bild 5: Einsatz KNN zur Regelung und Simulation von Prozessen

realisierter Einzelverfahren handelt. Der zweite Schwerpunkt für den Einsatz von KNN liegt vor, wenn gefährliche und umweltbelastende Stoffe am Prozeß beteiligt sind. In beiden Fällen werden die KNN im Training mit den Stellgrößen des Bedieners, den Prozeßreaktionen und den Mengen an Endprodukten angeleert.

Diese beiden Möglichkeiten zum Einsatz von KNN können miteinander in einem System kombiniert werden. Dabei werden sowohl die Regelung als auch der Prozeß von KNN simuliert. Dieses kann

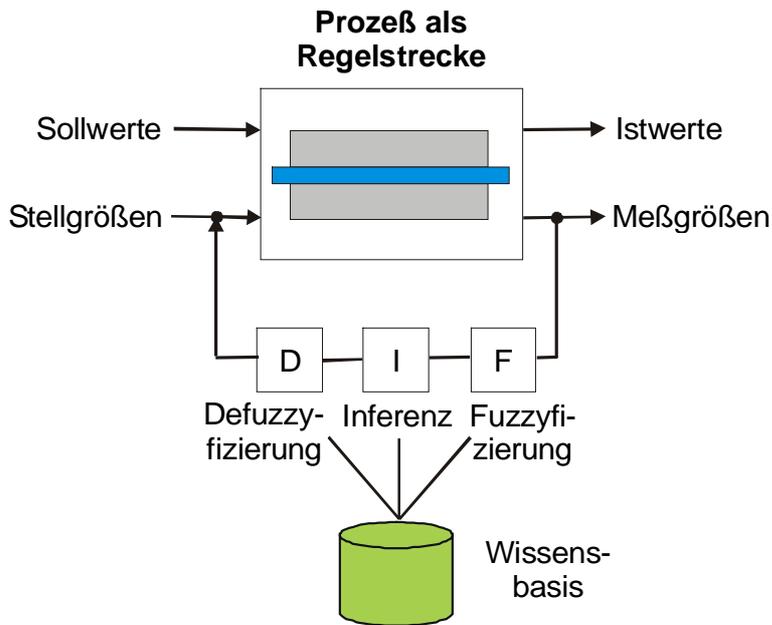


Bild 6: Verarbeitung reeller numerischer Werte in Fuzzy-Systemen

zur Vermeidung von Störungen und Gefahren bei sehr komplexen Prozessen erforderlich sein.

Bild 5 zeigt den Aufbau eines solchen Systems.

5 Fuzzy Technologie

Die Fuzzy Technologie wird gegenüber den numerischen Anwendungen der KNN dann eingesetzt, um eine Methode zur Abbildung "unscharfer" Wechselwirkungen zwischen Größen für den Computereinsatz zu haben. Diese Unschärfe ist z.B. linguistischer Art wie heiß/kalt oder klein/groß. Menschen sind in der Lage, die Bedeutung und den Kontext dieser Wörter im jeweiligen Zusammenhang zu erfassen. EDV und Computer aber nicht. Fuzzy Technologie wird hier eingesetzt, um in wissensbasierten Systemen das menschliche Wissen in das elektronische Datensystem abbilden zu können. Diese Systeme erfordern zur Integration von Fuzzy Logic dabei folgende Einzelschritte :

- Wissensakquisition
- Wissensübersetzung (Fuzzyfizierung)
- Wissensdokumentation
- Wissensverarbeitung (Inferenz)
- Wissensübersetzung (Defuzzifizierung oder linguistische Approximation)
- Wissensbereitstellung

Bild 6 zeigt den Aufbau eines solchen Systems.

Die Fuzzyfizierung als Wissensübersetzung ist nötig, um reelle Größen in linguistische Variablen um-

zuwandeln. Die Zuordnung einer Größe zu einem linguistischen Term ist abhängig von der Lage des numerischen Wertes auf der Achse dieser Größe. Die Defuzzifizierung ist der umgekehrte Vorgang, linguistische Terme in reelle Größen umzuwandeln. Die Inferenz als Wissensverarbeitung ist der Bereich des Systems, der für die Wissensverarbeitung der Regeln und Daten zuständig ist. Hier werden Schlußfolgerungen aus bestehenden Fakten und dem in der Basis vorhandenem Wissen gezogen. Die Regeln müssen dabei als linguistische Terme erhalten bleiben und nicht nur als

Symbole vorliegen. Der Output der Inferenz muß in die Sprache des Bedieners oder allgemein des Anwenders des Systems übersetzt werden.

Bei der Anwendung von Fuzzy Sets ist es erforderlich, die Einflußfaktoren auf den Prozeß unscharf zu beschreiben, zu verarbeiten, in der Wissensbasis abzubilden sowie in geeigneter und nutzbarer Form wieder zur Verfügung zu stellen. Diese Vorgehensweise soll an einem Beispiel **Bild 7** zur Regelung einer Heizung verdeutlicht werden.

Die Beziehung wird definiert mit : **"Wenn** Temperaturabweichung ist negativ **und** Änderung der Temperaturabweichung ist null **dann** Änderung der Heizleistung ist positiv."

Die "Unschärfe" besteht in diesem Beispiel in der Einteilung der Bereiche für alle Größen in die drei Terme „negativ“, „null“ und „positiv“.

Das Ergebnis für die gemessenen Größen „Temperaturabweichung“ ist -20 °C und „Änderung der Temperaturabweichung“ ist $+2\text{ °C/s}$. Die „Temperaturabweichung“ hat also den fuzzyfizierten Wert „negativ“, die „Änderung der Temperaturabweichung“ ist „null“ und somit ist die „Änderung der Heizleistung“ „positiv“.

Die Steigung der Linien bei der Trennung der Bereiche ist durch die Unsicherheit bei der Zugehörigkeit der Aussage begründet.

Der Output der Regelung kann wieder als linguistischer Ausdruck gewertet werden, er kann aber auch mittels Defuzzifizierung in eine reelle Zahl

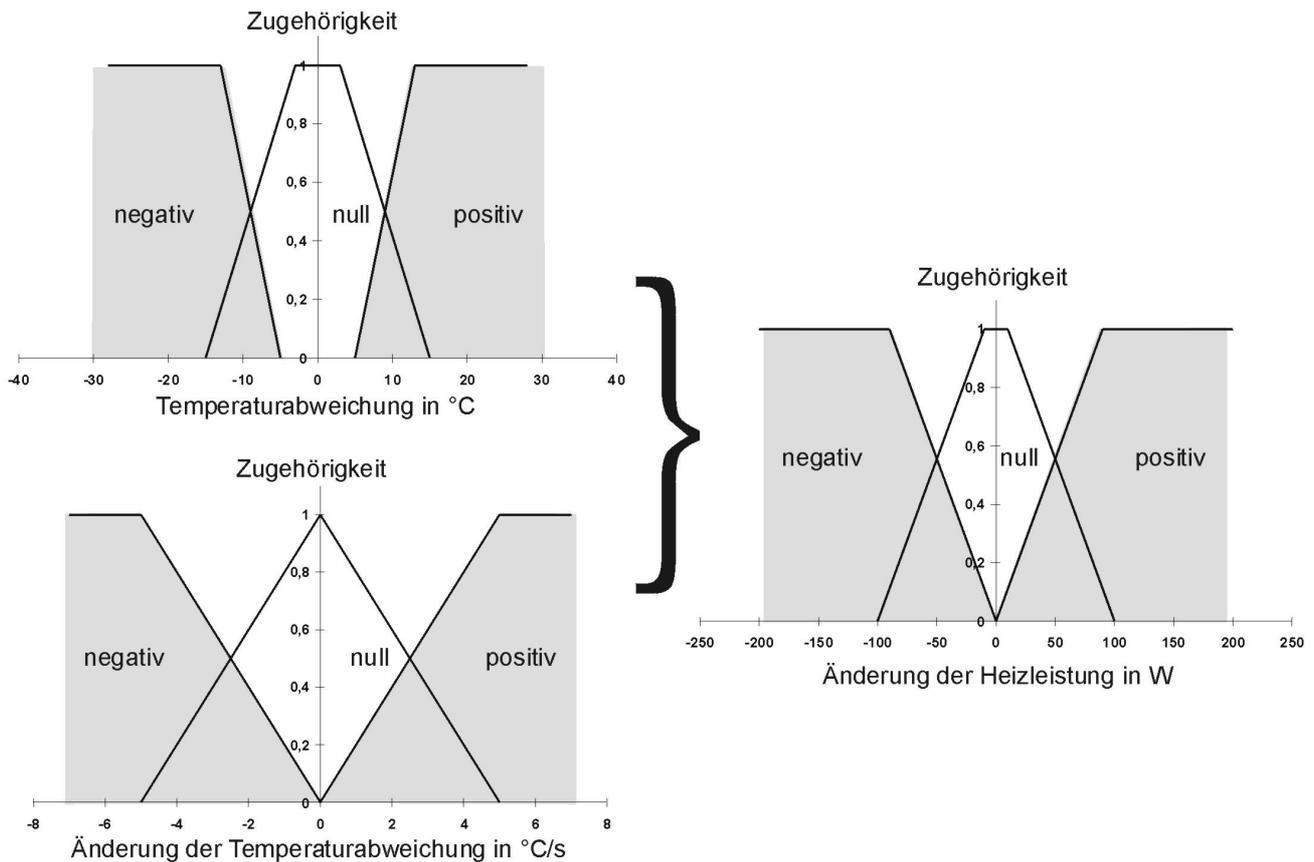


Bild 7: Fuzzy-Algorithmen zur Regelung einer Heizung /1/

und somit z.B. elektrische Spannung zur Weitergabe an die Heizung umgewandelt werden.

6 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurden die potentiellen Möglichkeiten der Methoden künstlicher neuronaler Netze und Fuzzy Technologie in einem wissensbasierten System zur Unterstützung des Konstrukteurs bei der Konstruktion von Anlagen und Maschinen dargestellt. Auch die präventive Störfall- und Fehleranalyse wird durch die Anwendung dieser Methoden schon früh in der Konstruktion ermöglicht. Allgemein wurden die Einsatzbereiche von KNN und Fuzzy Technologie im Umfeld komplexer Prozesse dargestellt. Die Netze können hierbei in vielen technischen Bereichen zur Optimierung von Prozeßparametern und der Simulation und Regelung von Prozessen eingesetzt werden. Die Auswahl der Methode orientiert sich an der Art der Daten, die von dem abzubildenden Prozeß vorliegen. Sind die Algorithmen oder Ein- und Ausgabegrößen bekannt, so können damit neuronale Netze antrainiert werden, die dann die Regelung übernehmen oder den eigentlichen Prozeß simulieren. Die Fuzzy Technologie dagegen eignet sich für die Abbildung

der menschlichen Sichtweise, die viele Größen in unscharfen Beziehungen ausdrückt. Diese beiden Methoden zusammen mit Datenbank- und Internet-Technik bilden ein umfangreiches und innovatives System. Die besonderen Vorteile durch den Einsatz von solchen Systemen sind durch eine Reduzierung der Entwicklungszeit, eine Qualitätserhöhung der Produkte und allgemeine Kosteneinsparungen bei komplexen Anlagen zu erwarten.

7 Literatur

- /1/ Zimmermann, H.-J.: Neuro + Fuzzy : Technologien – Anwendungen, VDI-Verlag (1995)
- /2/ Heinen, F.; Tawil, M.: Untersuchung der Rückfederung tiefgezogener Bleche, Institutsmitteilung Nr. 23 (1998)
- /3/ Scheer, A.-W.: Architektur integrierter Informationssysteme, Springer-Verlag (1992)
- /4/ Miles, J.; Moore, C.: Practical Knowledge-Based Systems in Conceptual Design, Springer-Verlag (1994)
- /5/ Kurbel, K.: Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen, Springer-Verlag (1989)

Umweltprüfungen an Komponenten mit Hilfe von Breitbandrauschen

Grünendick, T.; Käferstein, B.

Bauteilkomponenten können mit unterschiedlichen Signalen auf einem Shaker angeregt werden, um ihre mechanische Zuverlässigkeit zu untersuchen. Dabei kann ein Stoß (Shocken), eine harmonische Anregung (Sinus) oder ein stochastisches Signal (Breitbandrauschen) zum Einsatz kommen. Am IMW wurden Bauteile für ein KFZ-Frontend auf dem elektromagnetischen Schwingerreger getestet.

The reliability of components can be tested by applying different signals generated by a shaker. Impact (shock), harmonic excitation (sine wave) or noise signals (random vibration) are common waveforms. At the IMW automotive front end components were tested on an electromagnetic shaker with broad-band random vibration.

1 Einleitung

Die DIN EN 60068-2-64 „Umweltprüfung, Teil 2: Prüfverfahren“ /1/ beschäftigt sich im wesentlichen mit der mechanischen Zuverlässigkeit von elektronischen Bauteilen. Auf sie wird aber auch aus anderen Bereichen des Maschinen- und Gerätebaus referenziert, weil sie eine allgemeingültige Vorgehensweise für die Prüfung von Bauteilen mit einem Rauschsignal vorschlägt. Die Prüfung erfolgt auf Grundlage eines digital erzeugten und geregelten Rauschen. Die Prüfung ist im Gegensatz zu einer harmonischen Anregung des Objekts nicht mit deterministischen, sondern mit stochastischen Kennwerten zu beschreiben. Es werden daher Kennwerte wie „Leistungsdichtespektrum“ oder „Effektivbeschleunigung“ anstatt „Schwingamplitude“ oder „Prüffrequenz“ verwendet.

1.1 Theoretische Grundlagen

Die Anwendung von Breitbandrauschen beruht auf der Tatsache, daß über sehr lange Zeiten die Beanspruchung in KFZ, Flugzeugen etc. mit oft wechselnden Betriebsbedingungen im Mittel einem über dem Frequenzbereich charakteristischen Amplitudenspektrum entsprechen. Dieser wird aus Messungen ermittelt und grob genähert zusammengefaßt. Automobilhersteller haben z.B. unterschiedliche Schärfgrade je nach Einbauort, die dann als Gesamterhöhung des Beschleunigungsverlaufs be-

rücksichtigt werden. Es werden z. B. im Innenraum geringere Amplituden aufgebracht als am Fahrge- stell. Gelegentlich werden zusätzlich noch unterschiedliche Profilformen des Beschleunigungs- spektrums vorgegeben: am Motor mehr Leistung im hochfrequenten Bereich als am Fahrge- stell. In der DIN sind keine Profile vorgegeben, sondern es wird auf die Einzelbestimmungen der Werksnormen verwiesen. Durch entsprechende Amplitudenerhö- hung werden dann die realen Meßwerte verschärft, und damit die Prüfzeit entsprechend verkürzt. Das 15-jährige Leben eines KFZ-Bauteils wird damit auf wenige Stunden gerafft. Als weiterer Vorteil kann neben der betriebsbedingungs- nahen Anregungs- form noch die Ermittlung der dynamischen Eigen- schaften (Einzelresonanzen und deren Dämpfung) gesehen werden, um kritische Resonanzüberhö- hungen aufzudecken und ihnen entgegenzuwirken.

1.2 Wichtige Kenngrößen

Es sind folgende Kenngrößen für die Beanspru- chungshöhe entscheidend:

- **Spektrale Beschleunigungsdichte** bei einer Frequenz f : Effektivwert des Beschleunigungs- signals, das ein Schmalbandfilter mit der Mit- tenfrequenz f und der Breite Δf passiert hat, geteilt durch Δf . Das entspricht einer Effektiv- beschleunigung bei einer bestimmten Fre- quenzlinie und ist ein Maß für die zugeführte Energie.

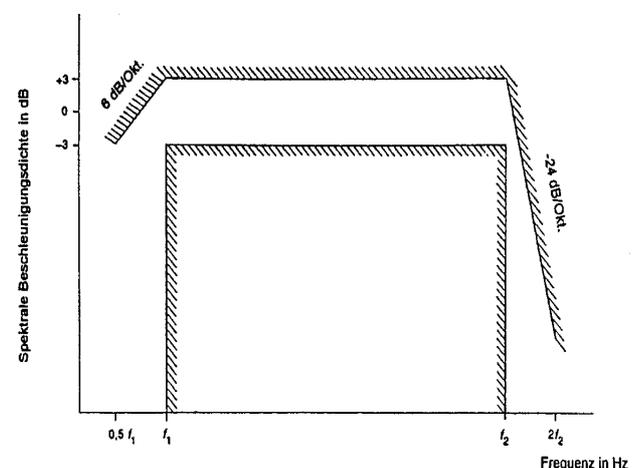


Bild 1: Bild des Spektrums /1/

- **Form des Beschleunigungsspektrums** als Angabe wie hoch die aufzubringende Beschleunigungsdichte über dem Frequenzbereich ist (bei deterministischen Signalen „Beschleunigungsamplitude“), **Bild 1**.
- Crest- Faktor: Quotient aus Spitzenwert zu Effektivwert, ein Maß für die Impulshaltigkeit, die zu einer unerwünschten Zusatzbeanspruchung führen kann.
- Spitzenwertbegrenzung: Begrenzung des Steuersignals (oft aus Sicherheitsgründen verwendet)
- **Wirksamer Frequenzbereich** ist die zu untersuchende Frequenzspanne und ist durch den Anstieg und den Abfall des Spektrums festgelegt. Das ist notwendig, da aus regelungstechnischen Gründen kein Sprung im Frequenzspektrum auftreten kann, sondern nur die Flanken und Übergänge steiler gemacht werden können.
- Bezugspunkt und Regelstrategie: auf den Bezugspunkt wird geregelt, er kann an beliebiger Stelle der Struktur positioniert sein. Soll auf mehrere Bezugspunkte geregelt werden (Mehrpunktregelung), so ist noch die Regelstrategie festzusetzen. Das Referenzsignal kann durch den Mittelwert, den Maximalwert oder den Minimalwert dieser Kanäle festgelegt werden.
- **Dauer der Beanspruchung**

Neben den o. g. Vorgaben gibt es noch eine Viel-

zahl weiterer, wie z.B. Belastungsrichtung, Überlagerung mit Temperatur oder chemischen Einflüssen, besondere Betriebszustände usw. Die oben fett gedruckten Kenngrößen geben den „Schärfegrad“ an, der i. A. in den Werksnormen festgelegt wird. Je größer die Beanspruchung im Betrieb, oder je höher das Risiko beim Ausfall einer Komponente ist, desto größer wird der Schärfegrad gewählt.

2 Versuch

2.1 Regelkreis

Da die Zufallssignale über die Zeit ihre Kennwerte (normalverteilt, vorgegebene Beschleunigungsdichte, etc.) nicht verändern dürfen (ergodischer Zufallsprozeß), muß der Shaker geregelt werden. Dazu werden die Signale an den Bezugspunkten gemessen und in den Regler zurückgeführt und einer FFT nach ihrer Digitalisierung unterzogen. Nach Auswertung der Amplituden und Phasen für eine vorgegebene Frequenzlinienanzahl berechnet der Regler die notwendige Stellgröße um die Führungsgröße (i. e. das vorgegebene Spektrum) zu erreichen. Das dazu notwendige Rauschsignal wird digital generiert und auf den Leistungsverstärker aufgegeben, der den Shaker antreibt, **Bild 2**.

2.2 Versuchsaufbau und Prüfobjekt

Zur Befestigung des Prüflings wurde eine Versuchsvorrichtung als Schweißkonstruktion angefertigt. Die Anbindung erfolgte an den drei Originalaufnahme Punkten des Objekts. Da die Form irregulär ist, wurden Ausfräsungen an der Aufnahme eingebracht, um einen Kontakt mit dem Objekt zu verhindern. An allen Schnittstellen wurden die zugehörigen Versorgungsleitungen angeschlossen und entsprechend den Einbaubedingungen abgefangen. Für die betriebsähnliche Zu- und Abfuhr der Betriebsstoffe wurde ein Flüssigkeitsumlauf realisiert. Die elektrischen Einrichtungen wurden einem zyklischen Prüfbetrieb (4 sec an, 26 sec aus) im geforderten Zeitraum (4 Stunden) unterzogen. Die Steuerung der Elektrik wurde mit einem programmierbaren digitalen Funktionsgenerator und Relaissteuerung realisiert. Es waren exakt

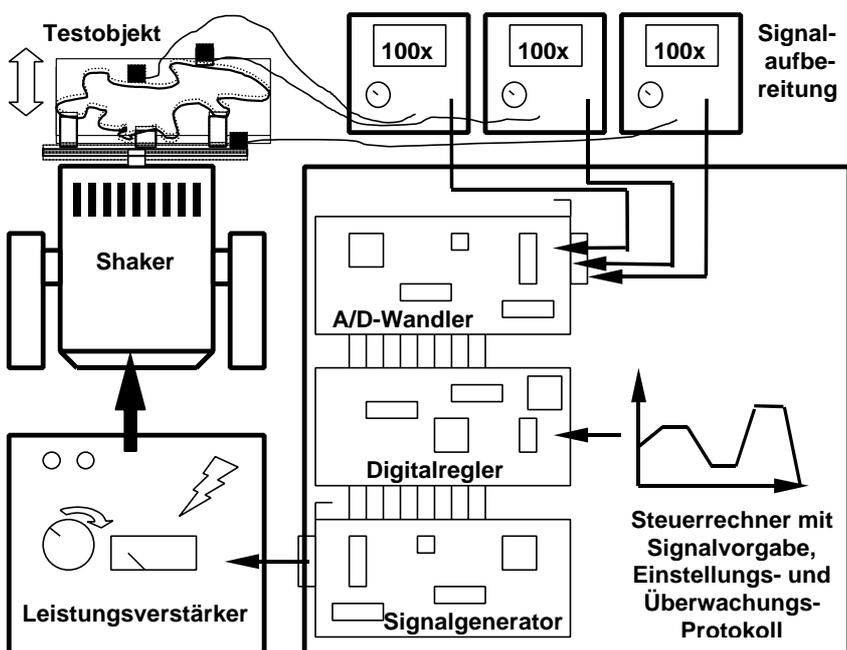


Bild 2: Testaufbau

13V Gleichspannung angeschlossen die durch ein stabilisiertes Netzgerät erzeugt wurden, den Aufbau der Versuchseinrichtung zeigt **Bild 3**. Die Schwingversuche wurden auf einem elektrodynamischen Schwingerreger vom Typ TiraVib 50001 (Hersteller TIRA Maschinenbau GmbH) durchgeführt. Als Steuergerät wurde ein Regler der Firma GenRad benutzt.

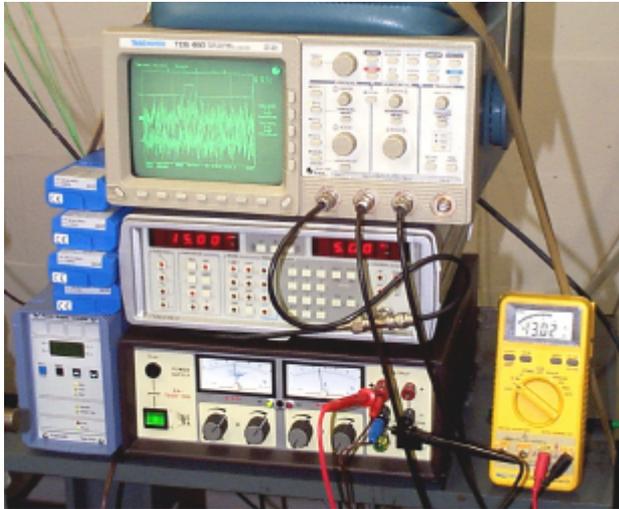


Bild 3: Meß-, Versorgungs- und Überwachungsgeräte

Die Beschleunigungsaufnehmer, die als Kontrollpunkte und Regelstelle die Schnittstelle zwischen Prüflingshalterung und Prüfling darstellen, wurden so dicht wie möglich an den Originalbefestigungsstellen angebracht. Als Regelstelle wurde für jede Prüfung jeweils ein Befestigungspunkt zwischen der Versuchsvorrichtung und dem Objekt gewählt, **Bild 4**. Die gemessenen Werte wurden an diesem Punkt unmittelbar mit der spektralen Beschleunigungsdichte verglichen und weiterverarbeitet.

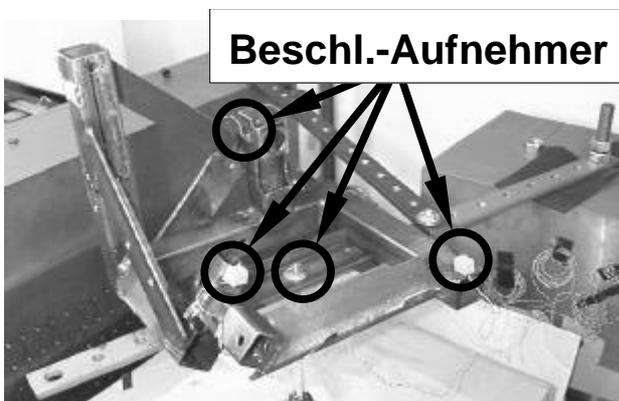


Bild 4: Aufspannvorrichtung, Shaker darunter abgedeckt wg. evtl auslaufender Flüssigkeiten

2.3 Versuchsablauf

Die Prüflinge wurden nacheinander entlang den drei Hauptebenen auf die Versuchseinrichtung gespannt und der Prüfprozedur nach Werksnorm unterzogen. Vor und nach der eigentlichen Beanspruchung des Prüflings mit Breitbandrauschen wurde eine Untersuchung des Schwingverhaltens mittels sinusförmiger Anregung (Sweep) durchgeführt. Diese Untersuchung ist vorgeschrieben, um die Resonanz mit der kleinsten modalen Dämpfung zu bestimmen, damit die Berechnung der vorzuzugenden Filterbandbreite erfolgen kann. Außerdem ist es wichtig, das Frequenzverhalten des Prüflings an mehreren Stellen zu ermitteln, um zu verhindern, daß eine Strukturresonanz nicht erfaßt wird, weil ein gewählter Meßpunkt im Schwingungsknoten liegt.

Anschließend wurde der Prüfling mit kleinem Pegel (-12 dB des vorgegebenen Testpegels) zur Angleichung der Beanspruchung rauschförmig angeregt. Dies erfolgt, um das Signal anzugleichen und eine vorläufige Analyse durchzuführen. Die Dauer für diese Voreinstellung wurde entsprechend der Norm nicht von der vorgegebenen Prüfdauer von 4 Stunden abgezogen.

Nach Werksnorm liegt der erforderliche Prüffrequenzbereich bei 10Hz bis 1000Hz. Die spektrale Beschleunigungsdichte und die Form des Beschleunigungsspektrums sind dort ebenfalls zu entnehmen, **Bild 5**. Die Prüfdauer beträgt für jede Hauptebene und jeden Prüfling 4 Stunden.

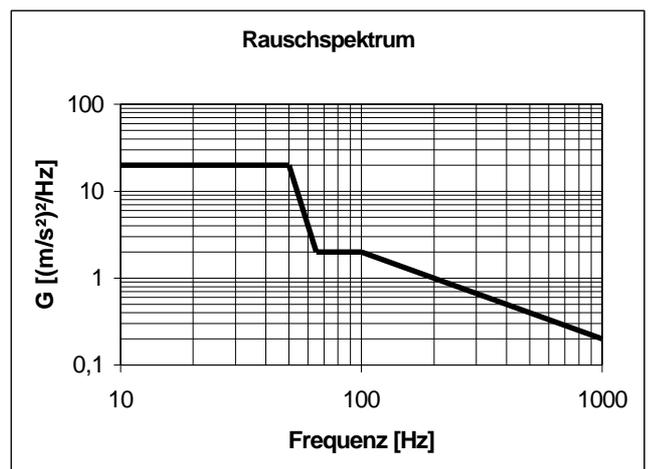


Bild 5: Spektrum laut Werksnorm Anwender /2/

Das gemessene Rauschsignal an einer Regelstelle wird unmittelbar mit den vorgegebenen Werten verglichen, der Regelalgorithmus berechnet die Korrektur und stimmt die Anregung auf die Vorgabe ab. Damit gelingt es die geforderte Regelgenauigkeit von $\pm 3\text{dB}$ einzuhalten. Bei 6 dB liegt der so-

nannte Abbruchbereich, ab dem der Regler nach einer vorgegebenen Zeit abschaltet, wenn es ihm nicht gelingt, innerhalb der Toleranzen zu bleiben. An drei weiteren Stellen wurden Kontrollpunkte befestigt, **Bild 4**, die jedoch nicht für die Gewinnung des Regelsignals dienen. An diesen Stellen konnte eine nicht zu vermeidende Querbelastrung des Prüflings festgestellt werden. Dies kann als Verschärfung der Prüfbedingung gewertet werden und ist auf die absolute Baugröße zurückzuführen. Da normalerweise mehrere elektronische Bauteile mit kleiner Abmessung gleichzeitig getestet werden, ist die Forderung der DIN nach homogener Beschleunigung leicht zu erfüllen. Bei großen Strukturen spielen jedoch die Eigenresonanzen außerhalb der Anregungsachse eine große Rolle, die unvermeidlich durch das Rauschsignal mit angeregt werden. Es ergibt sich deshalb meist eine zusätzliche Belastung, so daß man mit dem Test immer auf der sicheren Seite liegt.

Während der Schwinganregung wurden die elektronischen Bauteile einem zyklischen Prüfbetrieb unterzogen, um auch deren Betriebsverhalten realitätsnah abzubilden.

3 Ergebnisse

Die Prüfobjekte zeigten nach der jeweils vier Stunden dauernden rauschförmigen Schwinganregung leichte bis mittlere Schädigungen, die entscheidend von der getesteten Hauptebene abhängig waren. Als Schädigungen traten neben örtlichen abrasiven Verschleiß irreversible Veränderung der Werkstoffstruktur bis zur Anrißbildung auf.

Bei dem hier geprüften Testobjekten handelte es sich um Bauteile aus einem thermoplastischen Kunststoff, der durch Bildung von Mikrorissen und Verstreckungszonen, sog. Crazes, irreversibel geschädigt wurde, d. h., die Struktur auch nach der Entlastung geschädigt bleibt und nicht wieder ausgeht. Verursacht werden diese Schädigungen durch die lokale Überhöhung von Spannungen und Dehnungen, die das Herausreißen der Molekülstränge aus ihrer Verkettung bewirken und in Richtung der Dehnung verstrecken. Dies kann die Dichtigkeit vermindert oder die optischen Eigenschaften von transparenten Kunststoffen durch Trübung verändern.

Durch einfache konstruktive Maßnahmen, wie z.B. Verstärkung der Krafteinleitungsbereiche und Verbesserung des Kraftflusses durch Verwendung größerer Radien im Übergangsbereich, konnten die

aufgetretenen Schädigungen behoben werden. Dies hat eine entsprechende Nachprüfung bestätigt.

4 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, wie ein Schwingtest mit Breitbandrauschen vorgenommen wird, und welche Größen entscheidend bei der Festlegung der Testparameter sind. Als Testobjekt wurde ein KFZ-Bauteil im Frontend-Bereich während des Betriebs untersucht. Es lassen sich Prüflinge bis 25 kg statischer Masse auf dem Shaker des IMW testen, da er über einen pneumatischen Gewichtsausgleich verfügt. In der Praxis ist aber die erreichbare Beschleunigungsdichte der begrenzende Faktor, den es für jeden Einsatzfall individuell zu ermitteln gilt. Je größer dabei die Beschleunigungsdichte und je kleiner die zugehörige Frequenz ist, desto größer ist der Weg, der aufgebracht werden muß (quadratisch zu $1/f$).

5 Literatur

- /1/ DIN EN 60068-2-64: Umweltprüfung, Teil 2: Prüfverfahren. DIN, Berlin, 1995
- /2/ Werksnorm, NN.

Prüfstand zur Lebensdauerprüfung von Gelenkwellen

Birkholz, H.; Judith, M.; Tawil, M.

Die Gelenkwellen eines PKW sorgen für die Drehmomentübertragung mit Winkelversatz vom Getriebe an die Räder. Dabei entstehen Torsionsbeanspruchungen, die einen hohen Verschleiß in den Gelenken hervorrufen. Die Folge ist Leistungsverlust und schließlich Bauteilversagen. Am IMW ist ein Prüfstand aufgebaut, mit dem die Schädigung von Gelenken unter Betriebsbedingungen untersucht wird.

The joint shaft in a passenger vehicle transmits rotational moment with angular displacement from the transmission to the wheels. The resulting torsional loads cause a high degree of wear in the joints, which leads to loss in performance and component failure. At the Institute für Maschinwesen (IMW) a testing rig for investigating joint damage under operating conditions has been built.

1 Aufbau des Prüfstandes

Der Prüfstand (**Bild 1**) besteht hauptsächlich aus zwei Wellensträngen. Im vorderen Strang sind die Prüfgelenke (1) eingespannt. Hier können jeweils vier Gelenke gleichzeitig eingebaut und untersucht werden. Im hinteren Strang befindet sich ein hydraulischer Verspannmotor (2), dessen Aufgabe darin besteht, ein konstantes Torsionsmoment von 500 Nm zur Verfügung zu stellen. Zur Aufrechterhaltung des Torsionsmoments wird der Öldruck im Verspannmotor vom Hydraulikaggregat (3) nachgeregelt. Die beiden Stränge werden über zwei Getriebe (4) miteinander gekoppelt und bilden somit einen geschlossenen Torsionsverspannkreis. Das zum Ro-

tieren des gesamten Verspannkreises benötigte Antriebsmoment wird von einem E-Motor (5) über einen Riementrieb (6) zur Verfügung gestellt. Die Leistung des E-Motors beträgt 15 kW bei einer max. Drehzahl von 740 min^{-1} . Über einen Riementrieb wird eine Übersetzung realisiert, so daß die zu untersuchenden Gelenkwellen mit einer Drehzahl von etwa 300 min^{-1} rotieren. In der Mitte des vorderen Prüfstranges befindet sich das Mittellager (7), durch dessen Verschiebung der gewünschte Winkelversatz (Beugewinkel in der waagerechten Ebene) der Gelenkwellen eingestellt werden kann.

Die Überprüfung des Verschleißes in den Gelenken erfolgt indirekt über die berührungslose Messung der Gelenktemperatur während des Betriebes. Hierfür ist ein Infrarot-Sensor (8) auf einer linearen Verfahreinheit installiert. Die vom Sensor erfaßten Temperaturwerte werden mit einem Meßrechner gespeichert. Gesteuert wird der Prüfstand über eine SPS. Wird ein vorher festgelegter Temperaturwert über- bzw. unterschritten, so geht vom Rechner ein Signal an die SPS, die den Prüfstand abschaltet.

Die Umdrehungszahl, die der Parameter ist, der der

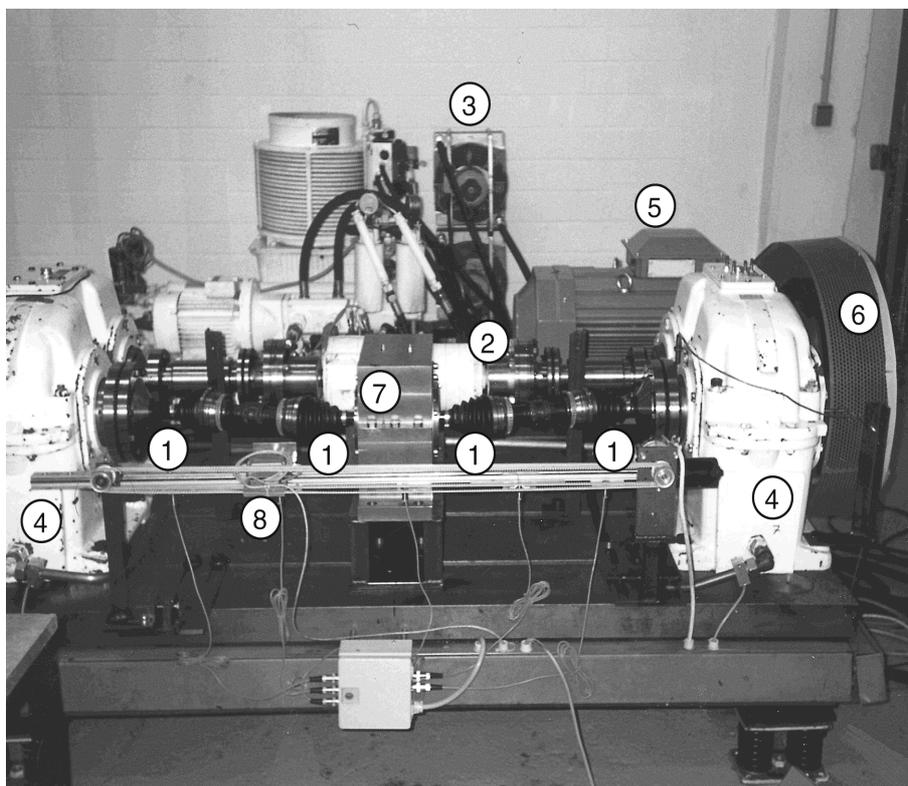


Bild 1: Gelenkwellenprüfstand

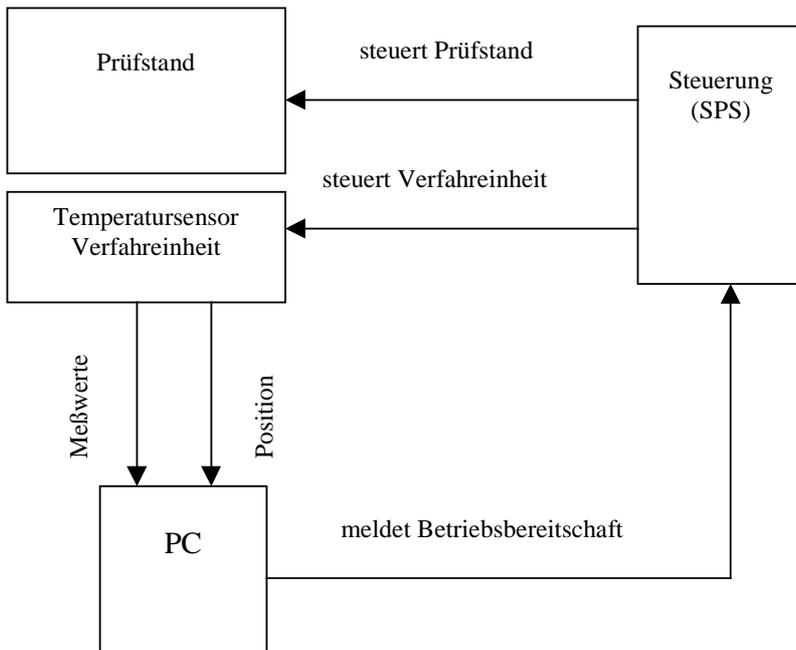


Bild 2: Konzept der Prüfstandssteuerung und Meßwerterfassung

Lebensdauer entspricht, wird mit Hilfe eines elektromagnetischen Pulsgebers ermittelt und gespeichert.

2 Meßwerterfassung

Um den Prüfstand zu überwachen und Versuchsauswertungen zu erstellen, werden die Temperaturen der Gelenkwellen erfaßt, da bei auftretenden Verschleißerscheinungen mit einem deutlichen Temperaturanstieg in den Gelenken zu rechnen ist. Der Temperaturanstieg setzt zu einem nicht genau vorherbestimmbaren Zeitpunkt ein, so daß eine kontinuierliche Messung notwendig ist. Die Rotation der Gelenkwellen läßt nicht zu, die Temperaturmessung direkt berührend durchzuführen, so daß auf ein berührungsloses Verfahren, beruhend auf einem speziellen Infrarot-Temperatursensor, zurückgegriffen wird.

Im Prüfstand befinden sich gleichzeitig immer vier Gelenkwellen, die erfaßt werden müssen. Als Alternative zur Verwendung von vier Sensoren wird im Aufbau ein einzelner Sensor verwendet, der regelmäßig die vier Meßpunkte an den Gelenken abfährt. Dies bietet den Vorteil, daß nur ein einziger Sensor kalibriert werden muß, und es so zu keinen Ungenauigkeiten durch verschiedene und ggf. leicht unterschiedlich kalibrierten Sensoren kommen kann.

Die Temperaturüberwachung, bestehend aus einem Temperatursensor und einer Verfahreinheit, ist eingebettet in das Gesamtsystem des Prüfstands (**Bild 2**). So werden die Meßwerte des Sensors

kombiniert mit einem Signal, das angibt, an welchem Meßpunkt er sich befindet, an den Meßrechner geleitet. Ist der PC ordnungsgemäß in Betrieb und befinden sich die gemessenen Temperaturen im zulässigen Bereich, so sendet der Meßrechner ein Betriebsbereitschaftssignal an die SPS-Steuerung, die sowohl den Prüfstand selbst als auch das Verfahren des Temperatursensors steuert. Liegt die gemessene Temperatur außerhalb des als zulässig am PC eingestellten Bereichs oder tritt ein Defekt an den Bestandteilen der beteiligten elektronischen Prüfstandseinrichtungen auf, so schaltet sich der Prüfstand selbsttätig ab.

Der Temperatursensor (**Bild 3**) registriert die Infrarotstrahlung, die die Objekte in seinem Erfassungsfeld abstrahlen. Die Linse des verwendeten Sensors hat einen Öffnungswinkel von 1 : 10, was bedeutet, daß im Abstand 300 mm, der in etwa dem zwischen Sensor und Gelenkwelle entspricht, die mittlere Temperatur einer Kreisfläche mit Durchmesser 30 mm erfaßt wird. Diese Fläche ist wesentlich kleiner als die zur Verfügung stehende und zu messende Oberfläche der Gelenke, so daß keine Objekte aus der Umgebung mit erfaßt werden, die das Meßergebnis verfälschen könnten. Das Abstrahlverhalten von Objekten ist wesentlich abhängig von der Beschaffenheit der Oberfläche.

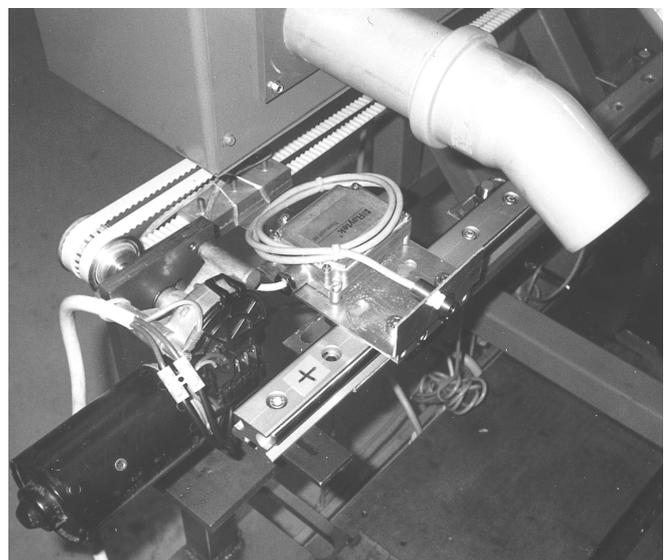


Bild 3: Temperatursensor

Um normierte Verhältnisse sicherzustellen, werden vor der Messung alle relevanten Flächen der Gelenke mit schwarzer Farbe eingesprüht. Während der Messung liefert der Temperatursensor dann kontinuierlich eine Spannung, die eine Funktion der Temperatur ist. Durch eine Kalibrierung des Sensors, dessen Meßwerte dabei mit berührend gemessenen Temperaturwerten abgeglichen werden, hat sich eine

Kalibrationskurve zur Umrechnung von Spannungsin Temperaturwerten ergeben. Die so interpretierbaren Spannungswerte gelangen über eine Meßwerterfassungskarte zum PC und stehen dort dem Meßwerterfassungsprogramm DASYLab[®] zur Verfügung. Das analoge Signal wird mehrmals pro Sekunde abgetastet. Um der so entstehende Datenflut Herr zu werden und um eine etwaige ungleichförmige Temperaturverteilung auf dem Umfang der Gelenkwelle zu berücksichtigen, ist in DASYLab[®] eine Mittelwertbildung programmiert. Erreicht der Temperatursensor eine neue Meßposition, so verweilt er ein bestimmte Zeit, bis dann der aktuelle Mittelwert angezeigt und in eine Meßwertdatei gespeichert wird. Für jedes Gelenk befindet sich eine Anzeige auf dem Bildschirm und für jedes Gelenk werden die Werte in eine separate Datei geschrieben. Somit ist eine direkte Betrachtung des Zustands der Gelenkwellen als auch eine spätere Auswertung der Meßwertdateien möglich. Die Zeit, die zwischen der Aufnahmen von zwei Meßwerten eines Gelenks vergeht, beträgt etwa drei Minuten, in denen die Temperaturen der anderen Gelenke erfaßt werden.

Schaltet sich der Prüfstand aufgrund der voreingestellten Bedingungen automatisch ab, so stoppt das Meßwerterfassungsprogramm zu diesem Zeitpunkt und die aktuell vorhandenen Anzeigewerte bleiben erhalten. Es kann dann mit der genauen Uhrzeit des Abschaltens, die zusätzlich mit festgehalten

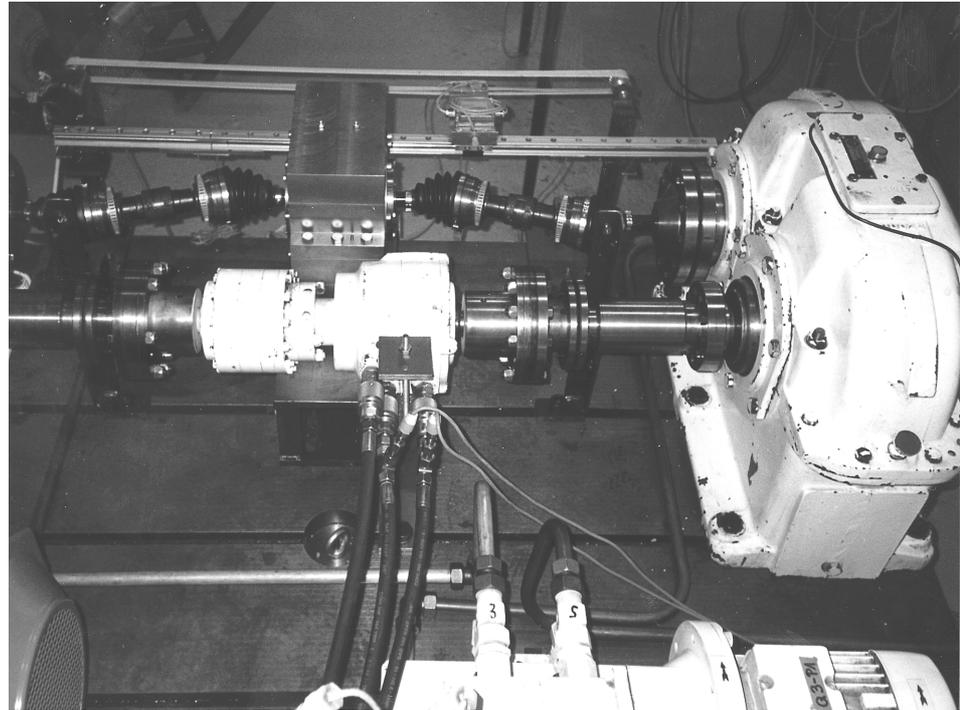


Bild 4: Prüfstand (Ansicht von hinten)

wird, rekonstruiert werden, an welcher Meßstelle der vorgegebene Temperaturbereich verlassen worden ist.

Die Gelenkwellen werden durch ein Moment mit einer vorgegebener Größe verspannt. Um sicherzustellen, daß die Gelenkwellen auch tatsächlich die geforderte Belastung erfahren, ist auf dem Gelenkwellenstrang ein Dehnungsmeßstreifen (DMS) aufgeklebt. Da das Moment im Betrieb bestimmt werden muß, wird eine Telemetrieanlage verwendet. Der DMS ist mit einem sich ebenfalls auf der Welle befindlichen Sender und einer Batterie verbunden. Vom Sender aus werden die Meßsignale berührungslos über Funk an einen Empfänger weitergeleitet, der an ein Auswertegerät mit Anzeige angeschlossen ist.

Die Kalibration des Dehnungsmeßstreifens und der Auswerteelektronik erfolgt über den Abgleich mit einer gleichzeitig für die Dauer der Kalibrierung in den Wellenstrang eingebauten hochpräzisen Drehmomentenmeßwelle.

3 Inbetriebnahme

Vor dem Einbau der Prüflinge wurde zunächst eine Überprüfung des aufzubringenden Drehmomentes durchgeführt. Dazu wurde eine Drehmomentmeßwelle der Firma Hottinger-Baldwin-Meßtechnik GmbH (HBM) in den Verspannkreis eingesetzt und

dieser mittels Distanzstücken geschlossen. Anschließend wurde der Öldruck in gleichmäßigen Schritten bis zum Maximum erhöht und wieder abgesenkt. Das durch den hydraulischen Verspannmotor aufgebrachte Drehmoment wurde mit Hilfe der Drehmomentmeßwelle aufgenommen und eine Öldruck-Drehmoment-Kurve erstellt. Eine Überprüfung bei laufendem Antriebsstrang ergab, daß das Moment nicht mit dem Stillstandsmoment übereinstimmte, sondern die Werte leicht unter die Werte für das Stillstandsmoment abfielen.

Nach dem Ausbau der Drehmomentmeßwelle und dem Einbau der Prüflinge wurden das Moment sowie der Auslenkungswinkel auf den geforderten Wert eingestellt und der Prüfstand gestartet. Dabei wurde die Drehmomentdifferenz zwischen Stillstand und Lauf berücksichtigt. Auf eine laufende Überprüfung des Drehmomentes im Verspannkreis ist zunächst verzichtet worden, da der am Verspannmotor anliegende Öldruck überwacht und als ausreichendes Kontrollmittel angesehen wurde.

Es konnte beobachtet werden, daß sich die Gelenkwellen auf ein bestimmtes Temperaturniveau erwärmten, die Temperatur blieb danach vorerst konstant. Nach einiger Zeit konnte jedoch ein Abfallen der Temperatur auf einen Wert nahe RT beobachtet werden. Zusätzlich fiel auf, daß die Laufleistung der Gelenkwellen erheblich höher lag, als erwartet. Dies legte den Schluß nahe, daß die Belastung im Verspannkreis keinen konstanten Wert einhielt.

Nach dem Stoppen des Prüfstandes wurde die Drehmomentmeßwelle wieder eingesetzt und der Öldruck auf den notwendigen Wert eingestellt. Danach wurde die Förderrichtung umgestellt. Dabei konnte beobachtet werden, daß die im Verspannkreis eingesetzten Spannelemente durchrutschten. Nach dem Durchrutschen fuhr der Verspannmotor gegen seine mechanische Begrenzung, so daß trotz nominell richtigen Öldrucks kein Nennmoment mehr anlag, die Gelenkwellen folglich mit sehr viel geringerer Belastung rotierten.

Das Durchrutschen der Spannelemente konnte auf Montagefehler zurückgeführt werden. Nach gründlicher Reinigung der Kontaktflächen von Wellen und Naben wurden die Spannelemente wieder eingesetzt und vorschriftsmäßig angezogen. Zusätzlich wurde zur Drehmomentüberwachung die bereits beschriebene Drehmomentmeßbrücke mit Telemetrieübertragung in den Verspannstrang integriert. Damit ist eine Überwachung des an den Gelenk-

wellen anliegenden Drehmomentes jederzeit möglich.

4 Ausblick

Nach der Wiederinbetriebnahme des Prüfstandes stellten sich praxisnahe Werte für die Temperatur an den Gelenkwellen ein. Eine ständige Überprüfung des Drehmomentes gewährleistet die richtige Belastung der Prüflinge. Die Versuche zur Ermittlung der Lebensdauer laufen derzeit noch.

Schallflußmodellierung – ein Konzept zur Unterstützung des Konstrukteurs bei der Entwicklung lärmarmen Maschinen

Beisheim, N.; Gummersbach F.; Käferstein, B.

Zur Unterstützung des Konstrukteurs bei der Entwicklung lärmarmen Produkte entsteht im Rahmen eines DFG-Projekts ein Konstruktions-Informationssystem zur Bereitstellung von maschinenakustischem Wissen. Hierzu muß eine Verknüpfung maschinenbaulicher Komponenten mit maschinenakustischen Eigenschaften erfolgen. Das wird mittels eines Schallflußmodellierers realisiert, der den Zugriff auf systematisch aufbereitetes Methoden- und Faktenwissen der Maschinenakustik ermöglicht und Auswertetechniken zum Auffinden von akustisch kritischen Bereichen bei Maschinen bietet.

An information system for low noise design is the aim of a DFG research project. This system consists a component based noise path modeller and a knowledge base for machine acoustic information, structured according to ISO 11688-1. The modeller represents a link between the Engineering view and the acoustic view of mechanical components. It has utilities for a weak-point analysis of the noise path.

1 Einleitung

Im Rahmen der Produktentwicklung erhält die Anforderung „lärmarm“ eine zunehmende Bedeutung. Diese Tatsache wird durch strengere Gesetze und Richtlinien zusätzlich forciert. Der Konstrukteur muß schon in den frühen Entwicklungsphasen auf die Schallentstehung achten, um teure Sekundärmaßnahmen, wie z.B. die Kapselung einzelner Lärmquellen zu vermeiden. Letztendlich wird der von den Maschinen abgestrahlte Schall durch den Konstrukteur festgelegt. Dies erfolgt bei

- Auswahl der Wirkprinzipien
- Festlegung des Bau- und Systemzusammenhangs
- Dimensionierung und Auslegung von Bauteilen.

Die Hauptaufgabe des Systems besteht in der Bereitstellung von spezifischem Wissen der Maschinenakustik, begleitend zu den jeweiligen Entwicklungsstadien des Produkts. Der Konstrukteur hat jedoch im allgemeinen nur geringe Kenntnisse der Maschinenakustik. Deswegen muß das akustische

Wissen so aufbereitet sein, daß jeder die Zusammenhänge bei der Schallentstehung versteht und die in der Wissensbasis aufgeführten Informationen nutzen kann. Die Struktur des Systems muß so aufgebaut sein, daß für unterschiedliche Problemfälle eine allgemeingültige Lösung gefunden werden kann. Den Kern des Systems bildet, neben dem Schallflußmodellierer, eine Wissensbasis, in der das maschinenakustische Wissen strukturiert nach dem physikalischen Geschehen entsprechend der ISO 11688-1 /1/ abgelegt wird. Auf diese Wissensbasis kann auf zwei Arten zugegriffen werden:

- der Konstrukteur sucht prinzipielle Maßnahmen zu den maschinenakustischen Beeinflussungsmöglichkeiten entsprechend der physikalischen Vorgänge (Quelle, Übertragung und Abstrahlung)
- der Konstrukteur sucht konkrete Lärminderungsmaßnahmen für bestimmte Baugruppen und Maschinenkomponenten.

Der Schallflußmodellierer bietet eine Hilfe zur Abbildung der Maschinenstruktur. Mit ihm lassen sich die Schallentstehungs-, Schallübertragungs- und Abstrahlwege nachbilden. Durch die Zerlegung der Maschine in einzelne Baugruppen, bei Bedarf bis hin zu den Einzelteilen möglich (Black-Box-System), kann der Konstrukteur sehr gezielt auf Maßnahmen für einzelne Bauteile aus der Datenbank zugreifen.

2 Maschinenakustische Wissensbasis

Die Betrachtung des allgemeinen Problemlösungsprozesses unter rein schalltechnischen Gesichtspunkten kann in drei Hauptarbeitsschritte unterteilt werden, **Bild 1**:

- schalltechnische Analyse
- Erarbeitung von Lärminderungsmaßnahmen
- Bewertung, Auswahl und Umsetzung der Maßnahmen.

Für jeden dieser Arbeitsschritte sind bestimmte Informationen erforderlich, die die Durchführung ermöglichen. So muß zu Beginn eine schalltechni-

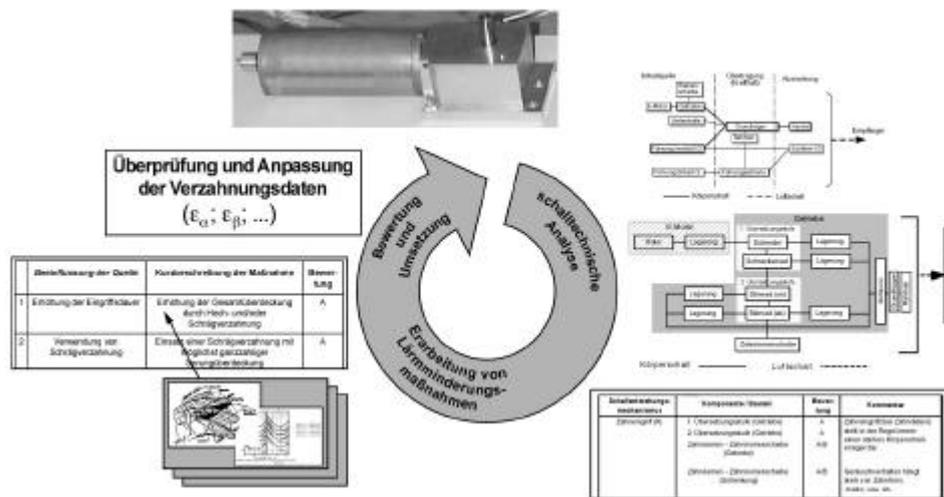


Bild 1: Allgemeiner Problemlösungsprozess unter schalltechnischen Gesichtspunkten /2/

schalltechnische Analyse des Konstruktionsobjekts erfolgen, bei der mit Hilfe der Schallflußmodellierung alle relevanten Bauteile in abstrakter Form erfaßt und maschinenakustischen Eigenschaften (Quelle, Übertrager oder Abstrahler) zugeordnet werden. Hierzu sind detaillierte Informationsbasen über Schallquellen, Übertragungsmechanismen und Abstrahlungsmöglichkeiten notwendig, die dem Konstrukteur zur Verfügung gestellt werden müssen, um einen entsprechenden Erfolg der Analyse unter qualitativen Gesichtspunkten zu ermöglichen. Für eine grobe Analyse reichen zu Beginn grundsätzliche Hinweise.

Aus einer akustischen Analyse des Konstruktionsprozesses wird deutlich, welche Informationen der Konstrukteur zur Berücksichtigung akustischer Aspekte benötigt.

Hierbei sind im wesentlichen zwei grundlegende Hilfsmittel zu sehen, die eine gezielte Unterstützung des Konstrukteurs erlauben. Zum einen handelt es sich dabei um eine maschinenakustische Wissensbasis, in der das notwendige Faktenwissen des Sachsystems "Maschinenakustik" unter konstruktiven Gesichtspunkten abgelegt

ist. Zum anderen wird eine Schnittstelle zwischen dem Konstrukteur und dieser Wissensbasis benötigt, die einen zielgerichteten Informationszugriff auf das abgelegte Faktenwissen ermöglicht. Von wesentlicher Bedeutung ist die Schnittstelle zur Verbindung der komponentenorientierten Konstrukteursicht und die der grundsätzlichen Beeinflussungsmöglichkeiten des physikalischen Geschehens. Diesem

Zweck dient u.a. auch die Schallflußmodellierung, bei der der Konstrukteur durch die Festlegung auf Konstruktionsbauteile einen Zugriff auf relevantes maschinenakustisches Wissen erhält.

2.1 Systematischer Informationszugriff

Aus der Analyse des Konstruktionsprozesses unter maschinenakustischen Gesichtspunkten geht hervor, daß abgesehen von der Aufgabenformulierungsphase und des Prototypings maschinenakustisches Wissen benötigt wird, das den Konstrukteur während des Konkretisierungsprozesses unterstützt: von grundlegenden maschinenakusti-

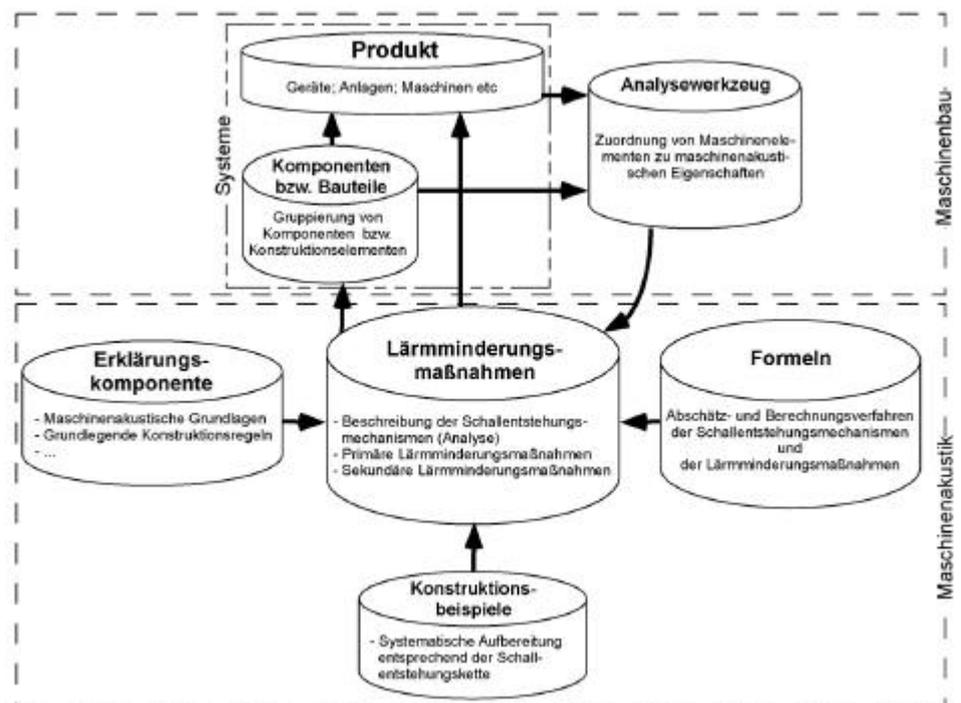


Bild 2: Zusammenhang der Informationsbasen und deren -fluß /2/

schen Hinweisen bei der Analyse und Auswahl der Wirkprinzipien über konkrete Lärminderungsmaßnahmen bis hin zu Abschätz- und Berechnungsverfahren der Schallentstehungsmechanismen und Lärminderungsmaßnahmen.

Ein Schwerpunkt dabei ist die Verbindung der Maschinakustik mit der Vorgehensweise des Konstrukteurs, um somit gezielt von konstruktiven Gegebenheiten auf schalltechnisch relevante Informationen schließen zu können. Als Ansatzpunkt kann hier die Verknüpfung von Systemelementen mit möglichen Schallentstehungsmechanismen gelten. So kann z.B. dem Konstruktionselement "Welle" und jedem anderen rotierenden Bauteil der Schallentstehungsmechanismus Unwucht (direkt bzw. optional Massenkkräfte) zugeordnet werden. Eine weitere Unterstützung ist hier durch eine "Erklärungskomponente" mit maschinenakustischen Grundlagen sowie bei der Ermittlung der Lärminderungsmaßnahmen mit deren Konstruktionsbeispielen zu sehen.

Zur grundlegenden Einteilung der benötigten Informationen während einer schalltechnischen Untersuchung kann **Bild 2** dienen, das den Zusammenhang der einzelnen Informationsbasen darstellt.

2.2 Kopplung von maschinenakustischen und maschinenbaulichen Merkmalen

Die Kopplungsmöglichkeiten zwischen maschinenakustischen und maschinenbaulichen Merkmalen hängt von den Zusammenhängen in technischen Systemen ab. In **Bild 3** wird der Zusammenhang zwischen den verschiedenen maschinenbaulichen Systemen und der maschinenakustischen Zuordnung verdeutlicht. Die Möglichkeiten der schalltechnischen Zuordnung von Merkmalen ist dabei auch vom Abstraktionsgrad abhängig. So können aus der Wirkstruktur im wesentlichen schalltechnische Angaben zu den Schallquellen ermittelt werden, da durch die Wirkprinzipien der Wirkort festgelegt wird, an dem der physikalische Effekt, die

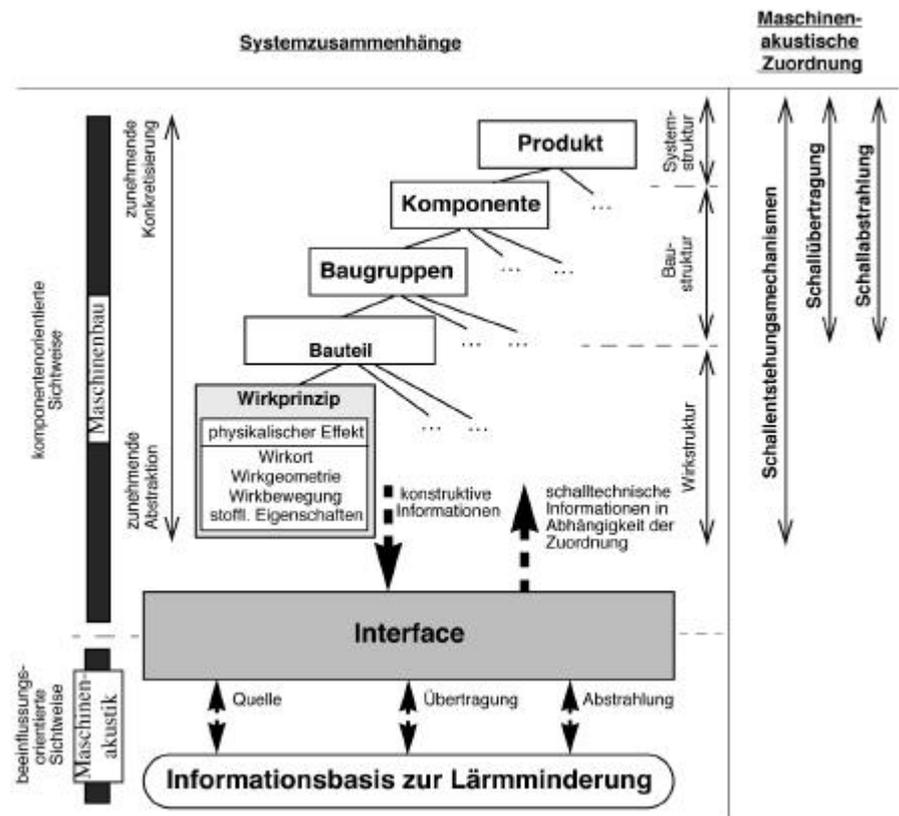


Bild 3: Systemzusammenhänge und schalltechnische Zuordnung

Wirkgeometrie und die Wirkbewegung mit den prinzipiellen stofflichen Eigenschaften zusammenwirken. Erst durch die Festlegung der Baustruktur einer Komponente bzw. Baugruppe kann eine erste gesamte schalltechnische Analyse erfolgen, aus der der innere Schallfluß und die Schallabstrahlungsmöglichkeiten bezogen auf Komponenten bzw. Baugruppen ermittelt werden können. Aus der Systemstruktur kann nun Aufschluß über Schallfluß und Schallabstrahlung des gesamten Produkts gezogen werden.

Eine Brücke zwischen der maschinenbaulichen und der maschinenakustischen Welt wird mittels eines Interfaces geschlagen. Erst dadurch wird die Zuordnung bestimmter schalltechnischer Informationen zu den verschiedenen Systemelementen möglich. Die Zuordnung maschinenakustischer Eigenschaften zu maschinenbaulichen ermöglicht den Zugriff auf weitere Informationen zur Lärminderung.

Betrachtet man nun die Art der zugeordneten Informationen zu den verschiedenen Systemelementen (vom Produkt bis zum einzelnen Maschinenelement), so fällt auf, daß detaillierte Informationen zur Beeinflussung der Schallentstehung am Wirkprinzip und dem Maschinenelement bzw. Bauteil sowie die Beeinflussung der Schallübertra-

gung und -abstrahlung bei der Verbindung einzelner Bauteile zu Baugruppen erfolgen kann. Komponenten und Produkte stellen dabei nur eine strukturierte Gruppierung dar.

Mittels des Schallflußmodellierers wird diese Verknüpfung verschiedener Zugriffsweisen ermöglicht, wobei die damit oft hervorgerufene Detaillierung eine Fixierung in ihrer Anwendbarkeit hervorruft. So kann auch ein Konstrukteur mit wenig maschinena-kustischen Erfahrungen das System verwenden. In diesem Fall muß die Möglichkeit geboten werden, das Konstruktionsobjekt durch die ihm bekannten Komponenten abzubilden. Verbindet er nun die Komponenten, werden automatisch alle möglichen Körperschallübertragungswege festgelegt. Eine Schallabstrahlung von der Oberfläche eines Bauteils erfolgt von jedem körperschallangeregten Bauteil. Dies führt letztendlich zu einem Modell, bei dem "nur" noch die Relevanz bezüglich der Schallquellen, Übertragung- und Abstrahlungsmöglichkeiten angegeben werden muß.

3 Schallflußmodellierer

3.1 Idee und Konzept

Der Zweck der Schallflußmodellierung liegt neben der graphischen Repräsentation des Konstruktionsobjektes (des Maschinenbauteils) auch in dem darauf folgenden Arbeitsschritt des Verweises auf qualitative und quantitative Informationen, mit denen der nächste Grundschrift im Problemlösungsprozess, die Lösungsfindung, unterstützt werden kann. Der Verweis führt somit auf Lösungsmöglichkeiten bezüglich Schallquellen, Übertragungswege und der Abstrahlung.

Der Konstrukteur kann im Modellierer den Schallfluß von Entwürfen grob nachbilden als auch den von Prototypen und existierenden Produkten detailliert abbilden, um eine Schallflußanalyse durchzuführen. Dazu wählt er aus der vordefinierten Ma-

schinenelemente- bzw. Baugruppensammlung die zu seinem Entwurf oder Prototypen gehörenden Objekte aus. Je nach Bedarf wird man sich durch die Ebenen der Wissensbasis mit den maschinena-kustischen Regeln bzw. Hinweise und Mechanismen führen lassen können, um sich über geeignete Lärm-minderungsmaßnahmen für einzelne Baugruppen oder Komponenten zu informieren. Bei akustischem Hintergrundwissen des Konstrukteurs ist auch die direkte Auswahl geeigneter Maßnahmen möglich. Außerdem kann sich der Konstrukteur allgemein über Aspekte der Maschinenakustik bis hin zu Maßnahmen zur Lärm-minderung informieren.

Im Modellierer selbst werden die einzelnen Komponenten einer Maschine durch Linien zu einer Gesamtstruktur verbunden. Diese Struktur bildet den Schallfluß der Maschine ab. Die Linienfarbe und der Buchstabe an den Aus- und Eingängen der Komponenten zeigt die Zuordnung zu Körper-, Flüssigkeits- oder Luftschallübertragung bzw. -schallabstrahlung an.

Durch die Verbindung der Modellelemente entsprechend der Maschinenstruktur (z.B. Schweiß- und Schraubverbindungen) wird die Körperschalleitung automatisch mit angegeben. Die Anordnung der Felder in der Benutzeroberfläche kann der Anwender frei gestalten und so die Struktur der betrachteten Komponente abbilden. Die Eingänge einer Komponente befinden sich auf der linken Seite, die Ausgänge auf der rechten. Um zwei Komponenten zu koppeln, wählt der Bediener zwei Felder nacheinander an und trägt die Art der Verbindung in das

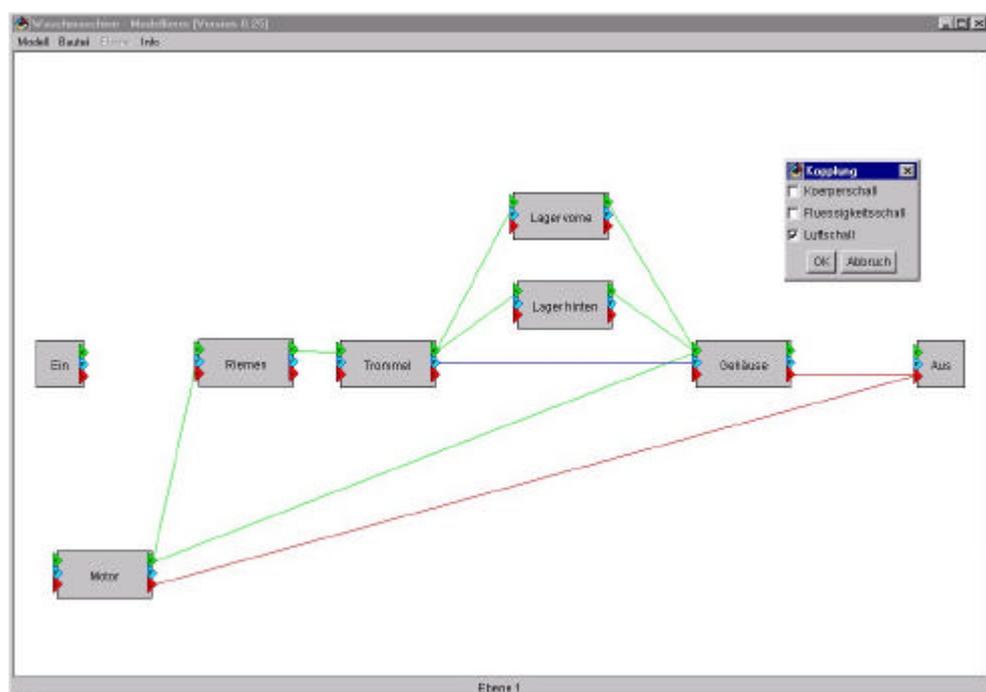


Bild 4: Abbildung einer Waschmaschine im Modellierer, Ebene 0

in **Bild 4** dargestellte Kopplungsmenü ein. Der Modellierer zeichnet nun die Verbindungslinien von der ersten zur zweiten Komponente.

Durch Abspeichern und neues Aufrufen können Baugruppen erzeugt werden, die als Substruktur oder bei der Modellierung anderer Maschinen wiederverwendet werden können (rekursive Objektdefinition), z.B. Lager, Getriebe, Motoren. Diese Baugruppen werden nach dem Aufruf in das Schallflußmodell übernommen. Eventuell zugehörige und modellierte Einzelkomponenten der Baugruppe befinden sich dann in untergeordneten Ebenen des Modellierers, die wiederum bei Bedarf erweitert und verändert werden können. Die Baugruppe selbst kann auf einer beliebigen Ebene in das Modell eingebunden werden. Als Beispiel für eine solche Baugruppe ist in Bild 4 eine Waschmaschine abgebildet.

Die Felder „Ein“ und „Aus“ sind die Verknüpfungspunkte zur Umgebung. Da bei dem Beispiel die Ebene 0 abgebildet ist, entspricht das einem äußerem Schallfeld, das nicht beeinflussbar ist (Umgebungsgeräusch). Der Ausgang ist dann der Empfänger, also der Mensch mit seinem Gehör (Luftschall). Bei anderen betrachteten Komponenten besteht die Möglichkeit zum Kontakt mit einer Flüssigkeit (Flüssigkeitsschall z.B. bei Ultraschallgeräten) oder Berührung zu einem schwingenden Festkörper (z.B. Fahrersitz) als Körperschall.

In **Bild 5** ist der Motor der Waschmaschine weiter in Einzelteile aufgespalten, die eine neue Ebene im Modell bilden. Da im übergeordneten Schaltbild kein Schall in den Motor fließt, ist auch hier nichts am Eingang angeschlossen. Der aus dem Motor

austretende Schall wird in die übergeordnete Ebene durch die „Aus“-Schnittstelle übertragen.

Auf diese Weise ist ein flexibler Modellierer entstanden, mit dem es dem Konstrukteur möglich ist, je nach gewünschtem Detaillierungsgrad ein streng hierarchisches Modell seiner zu untersuchenden Komponenten zu erzeugen. Wenn er eine Maschine aus zugelieferten Teilen konstruiert, hat er keinen Einfluß auf das Akustikverhalten der Teile. Er kann dann nur die Übertragung des Schalls über die Verbindungsstellen untersuchen und mindern. In diesem Fall ist eine Detaillierung bis auf einzelne Bauteile unnötig.

Der Lieferant dieser Teile sollte jedoch eine Optimierung des Lärmverhaltens seiner Komponente bis in Details vornehmen.

Der Modellierer dient im Gesamtsystem als Bindeglied bzw. Schnittstelle zwischen der maschinenbaulichen und der maschinenakustischen Sichtweise. Zuerst bildet der Konstrukteur seine Maschinenbaukomponenten ab. Durch eine Verknüpfung mit den maschinenakustischen Beeinflussungsmöglichkeiten (Quelle, Übertragung und Abstrahlung) wird der Bezug auf die Wissensbasis hergestellt. Zum Beispiel kann eine Welle durch Unwucht zu einer Körperschallquelle werden, eine Achse jedoch nicht. So kann der Anwender des Modellierers auch gezielt auf die zugehörigen Beispiele zur Lärminderung der betrachteten Komponente zugreifen oder er sucht sich entsprechende Lärminderungsmaßnahmen anhand der Entstehungsmechanismen heraus: z.B. „Unwucht vermeiden durch dynamische Balancierung“ oder „Zweite, gleichgroße Unwucht mit 180° Phasendifferenz“.

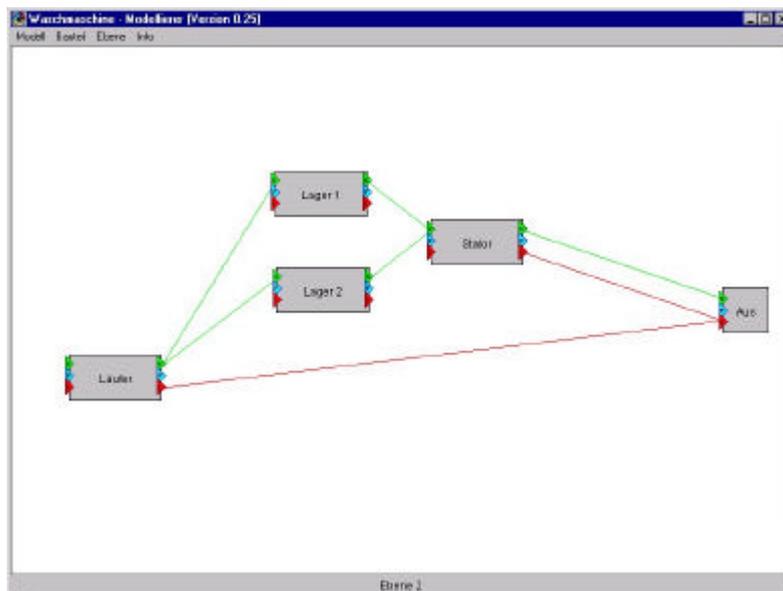


Bild 5: Abbildung der Baugruppe Motor im Modellierer, Ebene 1

3.2 Aufbau und Struktur

Der Schallflußmodellierer ist in einem Black-Box-System aufgebaut. Das bedeutet, daß ein Knoten (Baustein, Komponente) wieder aus mehreren Unterbausteinen zusammengesetzt sein kann, z.B. wurde der Motor in Läufer, Lager und Stator detailliert. Dadurch wird gewährleistet, daß eine weitere Untergliederung der Komponenten möglich ist und ein durchgängiges Datenkonzept vorliegt. Die höchste Ebene, von der ausgegangen wird, habe den Ebenenzähler $E=0$. Je tiefer man in den streng hierarchisch gegliederten Graphen de-

taillierte Ebenen anlegt, desto größer wird der Ebenenzähler E.

Auf jeder Ebene können mehrere Komponenten K liegen. Zwischen den Komponenten der gleichen Ebene E_i sind Verknüpfungen (gerichtete Kanten in Form von geradlinigen Verbindungslinien) durch eine Adjazenzmatrix jeweils für Körperschall (Kennbuchstabe k), Flüssigkeitsschall (f) und Luftschall (l) festgelegt. Diese sind nicht nur mit Logikwerten besetzt (verbunden oder nicht verbunden) sondern auch mit Zahlenwerten. $f=0$ bedeutet kein Schallfluß für Flüssigkeitsschall, ein positiver Wert gibt die „normierte“ Größe der Schallmenge an, und „N/A“ bedeutet, daß gar keine Verbindung besteht. Verknüpfungen können nur zwischen den Komponenten innerhalb einer Ebene erstellt werden. Die Position einer Komponente wird im Strukturbaum in folgender Reihenfolge eindeutig bestimmt: E0K3-E1K2-E2K3 = Komponente 3 in Ebene 0 hat eine Unterebene E1. Dort wählt man die 2. Komponente, die weiter untergliedert ist. In dieser Ebene 2 wählt man die 3. Komponente aus.

Die Adjazenzmatrix existiert für jede Ebene, der Graph ist schlicht (schlingenfrei) und hat keine Kreise. Das bedeutet praktisch, daß keine Schallrückkopplung stattfindet, sondern nur in eine Richtung (vom Eingang zum Ausgang) Schall fließt. Der Eingangsknoten „Ein“ bekommt die Werte, die von der übergeordneten Ebene in diese Komponente fließen. Der „Aus“-Knoten ist die Schnittstelle der Unterebene E_i zur übergeordneten Ebene E_{i-1} , an die das Ergebnis weitergegeben wird. Die Größe der Matrix ist je nach Anzahl N der Komponenten pro Unterebene variabel und berechnet sich zu $(N+2; N+2; 3)$. Die „+2“ stehen für die auf jeder Ebene vorhandenen „Ein“- und „Aus“-Knoten, die man natürlich auch direkt verbinden könnte. Die „3“ ist jeweils die Quantität der Schallflüsse (k, f, l).

3.3 Kernel und Rechensystematik

Jeder Knoten des Graphen, also jeder Baustein im Bild (=jede Komponente der Maschine) hat einen Eingang e und einen Ausgang a jeweils für Körper-, Flüssigkeits- und Luftschall (Index k, f und l). Die drei Komponenten werden zu einem Eingangsvektor $\mathbf{e} = (e_k, e_f, e_l)^T$ und Ausgangsvektor $\mathbf{a} = (a_k, a_f, a_l)^T$ zusammengefaßt. Viele Maschinenteile übertragen nicht nur eine Schallart, sondern wandeln eine Schallart in eine andere um. Für diese Fälle ist für jede Komponente eine Übertragungsmatrix $\mathbf{Ü}$ entsprechend dem Verhalten der

Komponente zu besetzen.

$$\mathbf{Ü} = \begin{pmatrix} \ddot{u}_{kk} & \ddot{u}_{fk} & \ddot{u}_{lk} \\ \ddot{u}_{kf} & \ddot{u}_{ff} & \ddot{u}_{lf} \\ \ddot{u}_{kl} & \ddot{u}_{fl} & \ddot{u}_{ll} \end{pmatrix}^T \quad \text{Gl. 1}$$

Neben diesen passiven Eigenschaften (reine Übertragung) kann die Komponente auch Quelleneigenschaften für eine einzelne oder die drei obengenannten Schallarten haben. Diese werden durch einen Quellenvektor $\mathbf{q} = (q_k, q_f, q_l)^T$ beschrieben. Der Ausgangsvektor ist dann mit dem Eingangsvektor wie folgt linear verknüpft:

$$\begin{pmatrix} a_k \\ a_f \\ a_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{u}_{kk} & \ddot{u}_{fk} & \ddot{u}_{lk} \\ \ddot{u}_{kf} & \ddot{u}_{ff} & \ddot{u}_{lf} \\ \ddot{u}_{kl} & \ddot{u}_{fl} & \ddot{u}_{ll} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e_k \\ e_f \\ e_l \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} q_k \\ q_f \\ q_l \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 2}$$

Oder in Matrixschreibweise:

$$\mathbf{a} = \mathbf{Ü} \mathbf{e} + \mathbf{q} \quad \text{Gl. 3}$$

Ausmultipliziert erhält man z.B. für den Körperschallausgang a_k die Linearkombination:

$$a_k = \ddot{u}_{kk} e_k + \ddot{u}_{fk} e_f + \ddot{u}_{lk} e_l + q_k \quad \text{Gl. 4}$$

Das bedeutet, daß sich der Körperschall des Maschinenbauteils aus den Körper-, Flüssigkeits- und Luftschallkomponenten jeweils mit den Gewichtungsfaktoren \ddot{u}_{kk} (Körperschall nach Körperschall), \ddot{u}_{fk} (Flüssigkeitsschall nach Körperschall) und \ddot{u}_{lk} (Luftschall nach Körperschall) zusammensetzt. Der erste Index steht also für die Quellenkomponente (k, l, f) und der zweite Index für die Zielkomponente (hier immer k). Am Ende wird noch der Körperschallquellenanteil q_k addiert.

Die Besetzung der Matrix wird aus der Datenbank anhand von Regeln und Abfragen vorgenommen und vom Benutzer entsprechend seinem Anwendungsfall eingetragen. Dabei bedeutet 0 „kein“ bis 5 „sehr gut“ bzw. „sehr viel“. In den folgenden Beispielen wird dieses Vorgehen erläutert:

- Gleitlager:

Da das Gleitlager als reiner Körperschallübertrager (von der Welle zu Außenring) fungiert, ist nur \ddot{u}_{kk} besetzt. Gleitlager haben eine hohe Dämpfung, deshalb wird hier $\ddot{u}_{kk} = 1 \dots 2$ angenommen. Es entstehen keine Geräusche, so daß $q_k = 0$ ist.

$$\mathbf{Ü} = \begin{pmatrix} 1 \dots 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{q} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Wälzlager:

Die Übertragungsmatrix bleibt in ihrer Form beste-

hen, es wird aber $\dot{u}_{kk} = 2...3$ angesetzt. Da Lager eine Körperschallquelle darstellen (Relevanz je nach Bauart, Größe und Belastung) setzt man $q_k = 1...2$.

$$\ddot{\mathbf{U}} = \begin{pmatrix} 2..3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{q} = \begin{pmatrix} 1..2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

• Hydraulikpumpe:

Die Pumpe überträgt die Schwingungen ihres Antriebs z.B. auf das Gestell, erzeugt durch die bewegten mechanischen Teile selbst Körperschall, der wiederum das Fördermedium zu Flüssigkeitsschall anregen kann und über das Gehäuse auch als Luftschall abgegeben wird. Je nach Bauart wird außerdem nicht unerheblich Flüssigkeitsschall erzeugt.

$$\ddot{\mathbf{U}} = \begin{pmatrix} \ddot{u}_{kk} \approx 4 & \ddot{u}_{fk} \approx 2 & 0 \\ \ddot{u}_{kf} \approx 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ mit } \mathbf{q} = \begin{pmatrix} q_k \approx 4 \\ q_f \approx 5 \\ q_l \approx 4 \end{pmatrix}$$

Die Belegung der Matrizen und der Vektoren ist also je nach betrachteter Komponente sehr unterschiedlich.

3.4 Berechnung und Auswertung

Die Gesamtübertragungswege werden auf Kommando berechnet und zu Beginn alle Eingangs- und Ausgangsgrößen auf 0 gesetzt. Die Rechnung kann an jeder beliebigen Stelle in der Ebenenstruktur beginnen und erfaßt dann alle folgenden Unterebenen. Für eine vollständige Auswertung wird auf Ebene 0 begonnen, so daß sich der rekursive Algorithmus schrittweise durch den Komponentenbaum arbeiten kann. Versehentlich eingebaute Schleifen werden dabei ebenso erkannt wie Unterebenen ohne Inhalt. **Bild 6** zeigt das Flußdiagramm des Hauptprogramms. Da an jedem Eingang einer Komponente mehrere Ausgänge von Vorgängern angeschlossen sein können, wird jeweils das Rechenergebnis des Vorgängers nach **Gl.3** auf den Eingang addiert. Hat der Vorgänger eine oder mehrere Unterebenen, dann werden diese zuerst berechnet. Da die Verbindungen nicht auf eine Schallart beschränkt sind, wird eine neue Adjazenzmatrix durch „Oder“ Verknüpfung der drei Untermatrizen für Körper- Luft- und Flüssigkeitsschall erstellt. So ist immer gewährleistet, daß nur Knoten mit vollständig bekannten Eingangsvektoren berechnet werden. Sollte eine Schleife in einer Ebene sein, dann findet der Rechner keine weiteren Knoten zur Verarbeitung. Wenn die Zahl der

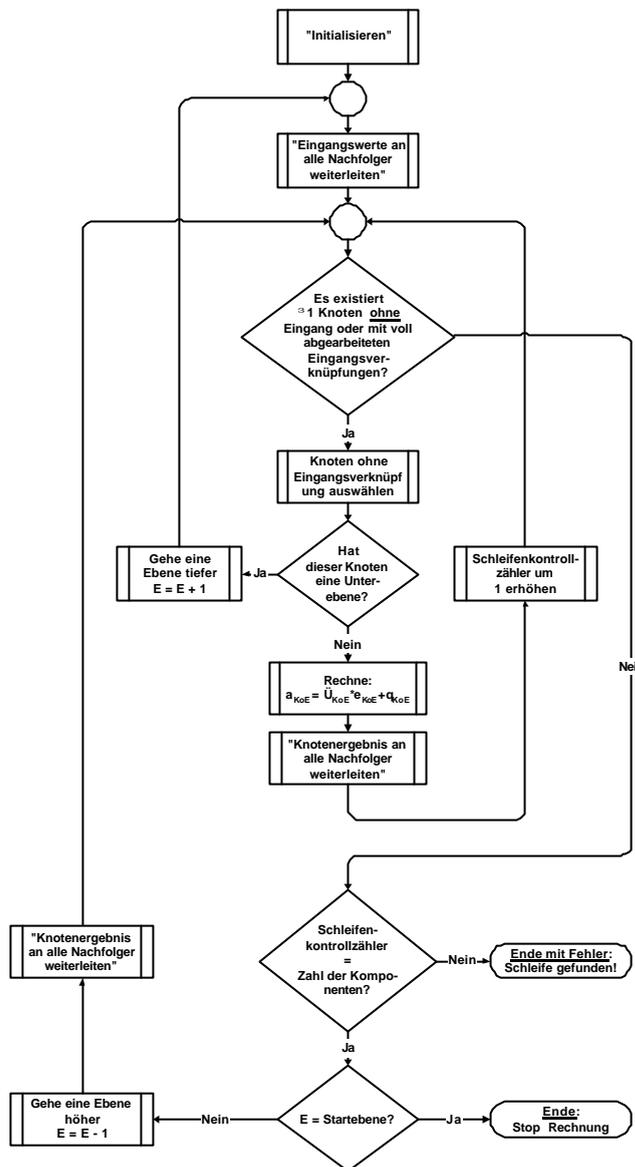


Bild 6: Rekursiver Rechenablauf zur Bewertung des Schallflusses

abgearbeiteten Knoten kleiner als die Zahl der Knoten auf der aktuellen Ebene ist, dann hat der Benutzer versehentlich eine Schleife im Graphen erzeugt, die als Fehler gemeldet wird.

Da jede Komponente aus Unterbaugruppen zusammengesetzt sein kann, ist es wichtig, die Gesamtübertragungsmatrix für diese Komponente und ihre Quelleneigenschaften zu ermitteln. Dazu sind die folgenden Rechenschritte notwendig:

Um die Quelleneigenschaften einer Substruktur zu ermitteln, setzt man den Eingangsvektor dieser Struktur auf Null. Da kein Eingangsschall vorhanden ist, bleibt nach dem vollständigen Durchrechnen nur der gesamte innere Quellenanteil jeweils für die drei Schallarten übrig.

Die Summenübertragungsmatrix einer Baugruppe erhält man in drei Schritten ähnlich einer Matrizeninvertierung. Man beginnt, indem man den Ein-

gangsvektor auf den Einheitsvektor $\mathbf{e} = (e_k = 1, e_f = 0, e_l = 0)^T$ mit reinem Körperschall setzt. Nach dem Durchrechnen erhält man einen Ausgangsvektor, der die Anteile aus der Übertragung des Einheitsvektors und die Quelleneigenschaften enthält. Letztere werden subtrahiert, und man bekommt die Übertragungskomponenten \ddot{u}_{kk} (KS nach KS), \ddot{u}_{kf} (KS nach FS) und \ddot{u}_{kl} (KS nach LS). Die Übertragungsmatrix ist also somit in der ersten Spalte besetzt. Analog permutiert man die Eingangsvektoren durch und erhält dann auch die Übertragungskomponenten für FS und LS, so daß die Matrix voll definiert ist. Prinzipiell kann man auch die Quellenvektoren aller Unterkomponenten auf Null setzen und braucht dann nicht mehr den Quellenanteil zu subtrahieren.

Für den Anwender sind Informationen über kritische Pfade im Schallflußplan nach der Rechnung extrahierbar. Wenn man sie in einer Liste nach der Größe sortiert, hat man sofort die Ansatzpunkte für eine Schallminderung. Beispielhaft aufgelistet:

- „Wo ist die stärkste Quelle?“ kann beantwortet werden, wenn man alle Quellenvektoren aller Komponenten und Unterbaugruppen durchsucht
- „Wie hoch ist der Anteil einer Quelle zum Gesamtgeräusch?“ wird ermittelt, indem eine Rechnung nur mit dieser Quelle und eine Rechnung mit allen Quellen verglichen werden
- „Wo ist ein kritischer Übertragungsweg?“ zeigt an, wo ein großer Wert in der Übertragungsmatrix steht. Ein kritischer Weg ist aber auch dort, wo ein großer Eingangswert und ein großer Übertragungsfaktor zusammentreffen, also eine große Quelle und ein guter Übertrager sich in einem Pfad befinden. Diese Kombinationen können aufgefunden und in einem Ranking aufbereitet werden. Die Dicke der farbigen codierten Verbindungslinien im Modell kann proportional dem Schallfluß gestaltet werden, so daß man auch visuell leicht die Schwachstellen erkennt.
- „Wer ist ein starker Abstrahler?“ zeigt alle Komponenten mit einem hohen Luftschallanteil am Gesamtgeräusch an, die alle mit entsprechenden KS/FS- zu LS-Werten belegte Matrizen haben.

4 Zusammenfassung

Die eigentliche Schwierigkeit bei der Konstruktion lärmarmen Maschinen besteht in der Kopplung der verschiedenen „Welten“. So besteht die Welt der Konstrukteure im wesentlichen aus Kräften, Momenten, Spannungen, Kinematik, Dynamik sowie dem Kraft- und Energiefluß usw., wohingegen die der Maschinenakustik im wesentlichen aus Energieflüssen mit Schallquellen, Übertragungswegen und Abstrahlflächen besteht. Diese Betrachtungsweise entspricht nur einer groben Einteilung. Die Kopplung der maschinenbaulichen mit der maschinenakustischen Welt muß daher durch das Zusammenspiel verschiedener Hilfsmittel und Methoden unterstützt werden. Wichtig hierbei ist

- die Berücksichtigung involvierter Sichtweisen
- die Berücksichtigung entsprechend aufbereiteter Wissensbasen
- die Verwendung problemspezifischer Kopplungsmodule
- die Anwendung von Rechen- und Auswertetechniken

Mit dem im DFG-Projekt entwickelten Konstruktions-Informationssystem ist ein solches System zur Verknüpfung der Bereiche Maschinenakustik und Maschinenkomponenten entstanden. Durch dieses System sind umfangreiche Analysen von geplanten als auch bereits realisierten Maschinen und Anlagen im Hinblick auf ihr akustisches Verhalten möglich.

5 Literatur

- /1/ ISO 11688: Acoustics - Recommended practice for the design of low-noise machinery and equipment. Part 1: Planning, International Standardisation Organisation; Genf; März 1995
- /2/ Gummersbach, F.: Lärmabwehr, Etwas Historisches und Aktuelles-; Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr. hc. Dr.-Ing. Peter Dietz; Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal; 1999
- /3/ Pahl, G.; Beitz W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin 1997
- /4/ Rembold, U. (Hrsg.): Einführung in die Informatik für Naturwissenschaftler und Ingenieure. 2. bearb. Auflage, Carl Hanser Verlag, München 1991

Wirtschaftliche Bewertung von Lärminderungsmaßnahmen

Gummersbach, F.

Der Konstrukteur ist durch immer strengere gesetzliche Bestimmungen und Kundenforderungen gezwungen, Lärminderungsmaßnahmen im Konstruktionsprozeß zu berücksichtigen. Dabei ist nicht nur das maschinenakustische Wissen von Bedeutung, sondern es müssen zur Auswahl von Lärminderungsmaßnahmen auch Informationen über die resultierenden Kosten vorliegen.

Acoustical concerns are more and more important due to legal and market demands. To select appropriate noise reduction measure the designer has also to consider economical aspects.

1 Einleitung

Für eine wirtschaftliche Bewertung von Lärminderungsmaßnahmen müssen vergleichende Größen ermittelt werden. Dies können zum einen absolute Kosten und zum anderen relative Kosten sein. Dabei muß Klarheit darüber herrschen, welche Kosten berücksichtigt werden müssen, um einen Beitrag zur Stärkung des Unternehmens zu leisten.

Die Problematik wird u.a. darin deutlich, daß bei dem Vergleich zweier Angebote (z.B. Werkzeugmaschinen) die preiswertere Maschine eine wesentlich höhere Schallabstrahlung besitzt und letztendlich zu höheren Fehlzeiten von Fachkräften (Maschinenbediener) führt. Neben der gesundheitlichen Belastung des Fachpersonals, treten hierbei -bedingt durch den Produktionsausfall- höhere Kosten auf, welche in diesem Fall nicht mit berücksichtigt wurden und somit zu einer Fehlentscheidung führten.

1.1 Zielbildung

Rationale Entscheidungen können nur getroffen werden, wenn man seine Handlungsmöglichkeiten auf ein Ziel hin vergleichen kann /1/. Die Notwendigkeit eines Ziels begründet sich daraus, daß ohne konkrete Beurteilungskriterien keine Zielrichtung vorgegeben wird und somit ein nebulöses Herumgestocher in Gestaltungsalternativen hervorruft. Des weiteren müssen Regeln bekannt sein, um konfliktäre Beziehungen unter den Zielen aufzulösen.

In der Zieldefinition werden aus der Vielfalt aller möglichen Ziele jene genauer beschrieben, die von Interesse sind. So ist es u.a. auch aus unternehmenspolitischen Gründen sehr wichtig, dem konstruktiven Bereich alle hierfür relevanten Unternehmensziele vorzugeben, so daß diese zu Anforderungen an ein Produkt formuliert werden und gegebenenfalls weiter detailliert werden können. Anforderungen bezogen auf die Lärminderung sind Betriebsforderungen, die den Bereich der "Mensch-Maschine-Beziehung" zugeordnet werden können. Das heißt, sie geben an, "Wie" die Maschine ihre Aufgabe zu erfüllen hat. Hierzu sind natürlich auch Angaben über Grenzwerte für den Konstrukteur notwendig. Zu einer besseren Bewertung sollte sich ein Unternehmen auch klarmachen, wieviel einem eine bestimmte Anforderung wert ist, denn nichts gibt es umsonst. Bezüglich der Lärminderung also: "Wieviel ist mir eine Geräuschminderung um xy dB(A) wert?"

Die Beantwortung dieser Frage ist vielschichtig und zudem vom Betrachter abhängig. Unter unternehmerischen Gesichtspunkten ist eine Werterhöhung eines Produktes (z.B. durch eine geringere Geräuschemission) wünschenswert, wenn diese mit möglichst geringen Kosten einher geht. Grundsätzlich unterschieden werden muß, ob ein Grenzwert zwingend eingehalten werden muß und somit die Einhaltung der Anforderung zur Unternehmensehaltung beiträgt oder durch diese Werterhöhung, aufgrund eines geringeren Lärmpegels und der einhergehenden Wettbewerbsvorteile, ein höherer Erlös erzielt werden kann. Dies ist unabhängig davon ob dies nun gesetzliche oder marktspezifische Forderungen sind. Stellt man sich nun die Frage der Motivation nach der Lärminderung, kann diese immer unter sozialen und bzw. oder monetären Aspekten gesehen werden. Der soziale Aspekt begründet sich dabei aus der gesundheitlich schädigenden Wirkung des Lärms. So entsteht ein volkswirtschaftlicher Schaden aufgrund der hohen Anzahl von Schwerhörigkeit als anerkannte Berufskrankheit. Mikroökonomisch gesehen entsteht ein wirtschaftlicher Schaden durch krankheitsbedingte Fehltag, Motivationshämmung bis hin zu Wesensänderungen in der Persönlichkeit von Perso-

nen in lärmexponierten Betriebsbereichen. Dies führt schließlich auch wieder zu höheren Kosten durch steigende Unproduktivität. Letztendlich ergibt sich in der Regel eine Notwendigkeit zur Lärminderung aufgrund monetärer Aspekte. Aus unternehmerischer Sicht wäre hier der

Gewinn pro Lärminderung

zu sehen.

Vereinfacht läßt sich die Frage für den Konstrukteur formulieren:

"Um wieviel darf das Produkt pro dB-Lärminderung teurer werden?"

Dieser Frage wird im nächsten Kapitel unter verschiedenen Gesichtspunkten nachgegangen.

Erhält der Konstrukteur die Anforderung, einen schalltechnischen Grenzwert einzuhalten, ist dieser gezwungen, entsprechende Gestaltungsmöglichkeiten zu finden. Bei verschiedenen Gestaltungsalternativen, müssen unter technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten, die besten ermittelt werden.

1.2 Relevante Kosten für Lärminderungsmaßnahmen

Für den Konstrukteur ist es nun sehr wichtig zu wissen, welche Kosten er bei einer wirtschaftlichen Betrachtung seiner Gestaltungsalternativen zu betrachten hat. Nach /2/, /3/ und /4/ ist es sinnvoll, eine Unterteilung in investitions- und betriebsabhängige Kosten, Personalkosten, sonstige Kosten, Folgekosten sowie Erlöse aus Förderungsmaßnahmen vorzunehmen.

Zur Ermittlung der exakten Kostenarten für die Teilkostenrechnung sind die oben aufgezeigten Gruppen genau nach Einzel- und Gemeinkosten und damit nach variablen und fixen Kosten zu unterscheiden. Die Differenzierung aller Kosten hängt von der eingesetzten Kostenrechnung eines Unternehmens ab und kann daher an dieser Stelle nicht vorgenommen werden.

Zu den Betriebs-, Instandhaltungs- und den Investitionskosten ist anzumerken, daß sie in besonderem Zusammenhang mit der Nutzungsdauer der Lärminderungsmaßnahme stehen. Es gibt Produkte, die keine oder fast keine Betriebs- oder Instandhaltungskosten aufweisen (z.B. Gabelschlüssel, Schwingungsisolierung etc.). Hier kommt es nur darauf an, die Investitionskosten pro Nutzungsdauer möglichst gering zu halten. Es gibt aber auch Produkte (z.B. Wasserpumpen, Ventilatoren etc.), die überwiegend Betriebsko-

sten (hier Energiekosten) aufweisen, d.h. die Investitionskosten werden während der Nutzungsdauer gegenüber den Betriebskosten vernachlässigbar klein. Um die Produktgesamtkosten zu senken, erscheint es sinnvoll, ein Produkt mit womöglich höheren Investitionskosten jedoch niedrigeren Betriebskosten zu wählen. /3/

Es muß an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß eine optimale Entscheidung nur getroffen werden kann, wenn eine exakte Zielbildung für jede Kostenart vorliegt.

Im folgenden Beispiel wird die Betrachtung auf betriebsab- und -unabhängige Kosten gelegt.

2 Bewertung einzelner Maßnahmen am Beispiel einer Volumenstromregelung

Bei lufttechnischen Anlagen muß der Volumenstrom geregelt werden, was durch folgende Maßnahmen erreicht werden kann:

- Drosselregelung
- Drallregler
- Drehzahlregelung

In **Bild 1** ist der Leistungsbedarf über dem Volumenstrom für die Drehzahlregelung und die Drosselung dargestellt.

Welche dieser drei Möglichkeiten zur Volumenstromregulierung am geeignetsten ist, hängt von den jeweils geforderten Betriebsbedingungen ab, die über den gesamten Nutzungszeitraum betrachtet werden müssen. Die Auswahl muß letztendlich unter ökonomischen Gesichtspunkten erfolgen. **Bild 2** zeigt, daß bezüglich der Geräusentwicklung die Volumenstromregulierung durch Drehzahländerung den beiden anderen Methoden überlegen ist, da ein Betrieb im Unterlast- und Überlastbereich sehr gut anzupassen ist.

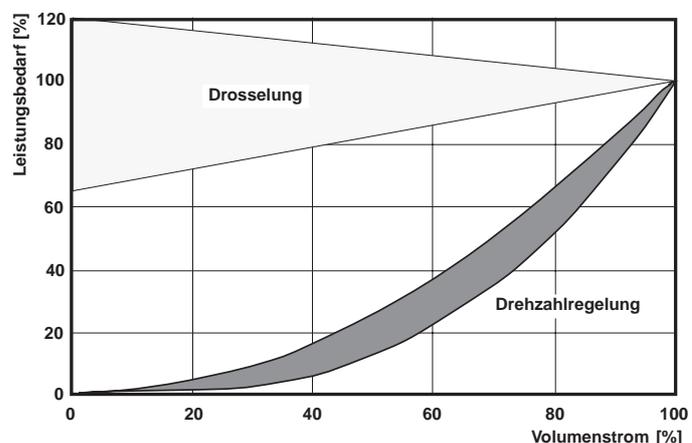


Bild 1: Leistungsbedarf bei verschiedenen Volumenstromregulierungen /5/

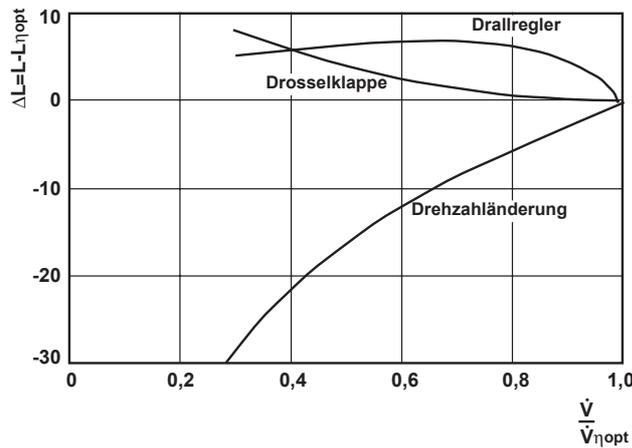


Bild 2: Geräuschentwicklung bei verschiedenen Volumenstromregulierungen /6/

Bei Anwendung der Drehzahlregelung reduziert sich der Leistungsbedarf des Laufrades mit der 3. Potenz der Drehzahl bzw. des Volumenstroms. Dabei ist der Volumenstrom direkt proportional zur Drehzahl.

Bei der Halbierung der Drehzahl sinkt der Leistungsbedarf auf ein Achtel des Wertes bei voller Drehzahl. Wieviel von dieser Leistungsminderung als Ersparnis bezüglich der Energiekosten übrig bleibt, hängt sehr stark von der Charakteristik des Antriebsmotors und des Drehzahlsteuergerätes ab. Die folgende Berechnung der Energiekostensparnis stellt eine Überschlagsrechnung dar und kann je nach Antriebsmotor davon abweichen. Die Berechnung vermittelt aber eine Vorstellung, in welchen Größenbereichen sich die Energiekostensparnis bewegt.

2.1 Berechnungsbeispiel

Der Radialventilator habe eine Leistungsaufnahme von 1,74 kW bei einer Nenndrehzahl von 1385 U/min. Der Preis für eine kWh betrage 0,25 DM. Der Radialventilator läuft in einem Jahr insgesamt 8000 Stunden. Davon 5000 Stunden bei halber Drehzahl und 3000 Stunden bei voller Drehzahl. Der Kostenvergleich wird anhand der Drosselung und der Drehzahlregelung für den festgelegten Betriebszustand durchgeführt. Wie aus dem **Bild 1** hervorgeht, schwankt der Leistungsbedarf bei der Volumenstromregulie-

rung mit Hilfe der Drosselung zwischen 65% und 120% bei sinkendem Volumenstrom. Daher wird bei der Berechnung der Energiekosten für die Drosselung ein Leistungsbedarf von 100% in allen Drehzahlbereichen festgelegt, **Tabelle 1**.

Mit Hilfe der berechneten Werte für den Leistungsbedarf ergeben sich für die Energiekosten, hochgerechnet für 10 Jahre, die in **Tabelle 2** berechneten Kosten.

Hieraus ergibt sich eine Energiekostensparnis bei der Volumenstromregulierung mit Hilfe der Drehzahlregelung gegenüber der Drosselung von 19032 DM in dem festgesetzten Zeitraum von 10 Jahren mit einer Laufzeit von 80 000 Betriebsstunden. Daraus ergibt sich eine Ersparnis nur für die Energiekosten pro Jahr von 1903,2 DM.

Bei Halbierung der Drehzahl reduziert sich der Geräuschpegel um 15 dB (A). Bei der Drosselung

Tabelle 1: Abgeschätzter Leistungsbedarf bei verschiedenen Volumenstromregulierungen /7/

	Drosselung (DS)	Drehzahlregelung (DR)
Leistungsbedarf bei voller Drehzahl $n = n_0$	$P_{L, DS} = P_{L, 0} = 1,74 \text{ kW}$	$P_{L, DR} = P_{L, 0} = 1,74 \text{ kW}$
Leistungsbedarf bei halber Drehzahl $n = 0,5 n_0$	$P_{L, DS} = P_{L, 0} = 1,74 \text{ kW}$	$P_{L, DR} = P_{L, 0} \times \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 = 0,2175 \text{ kW}$

steigt der Geräuschpegel bei halber Drehzahl um ca. 5 dB(A), **Bild 2**. Als Gesamtunterschied ergibt sich demzufolge 20 dB(A). Geht man nun davon aus, daß die Immissionsgrenzwerte am Arbeitsplatz im Nennlastbereich gerade noch eingehalten werden, würden sie bei Verwendung einer Drosselung überschritten, so daß weitere Lärminderungsmaßnahmen (z.B. Kanalschalldämpfer) nötig wären.

Tabelle 2: Energiekosten für die Volumenstromregulierung pro Jahr /7/

	Drosselung (DS)	Drehzahlregelung (DR)
Energiekosten bei voller Drehzahl $n = n_0$ und 30000 Stunden	$Ek_{DS, 30000} = 30000 \text{ h} \times 1,74 \text{ kW} \times 0,25 \text{ DM/kWh} = 13050 \text{ DM}$	$Ek_{DR, 30000} = 30000 \text{ h} \times 1,74 \text{ kW} \times 0,25 \text{ DM/kWh} = 13050 \text{ DM}$
Energiekosten bei halber Drehzahl $n = 0,5 n_0$ und 50000 Stunden	$Ek_{DS, 50000} = 50000 \text{ h} \times 1,74 \text{ kW} \times 0,25 \text{ DM/kWh} = 21750 \text{ DM}$	$Ek_{DR, 50000} = 50000 \text{ h} \times 0,2175 \text{ kW} \times 0,25 \text{ DM/kWh} = 2718,75 \text{ DM}$
SUMME (80000 Stunden in 10 Jahren)	34800 DM	15768 DM
Energiekosten pro Jahr	3480 DM/Jahr	1576,8 DM/Jahr

Zur Drehzahlregelung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Dabei unterscheidet man grundsätzlich Drehzahlregelungen bei Gleichstrommotoren, einphasigen Wechselstrommotoren und Drehstrommotoren. Der hier zu bewertende

Radialventilator wird durch einen Drehstrommotor angetrieben, die Drehzahlregelung kann mittels eines Frequenzumrichters oder eines Trafo-Drehzahlstellers durchgeführt werden. Zunächst erfolgt eine Aufstellung der Schallpegelveränderung und des Anschaffungspreises für die Drosselung, den Frequenzumrichter und den Trafo-Drehzahlsteller, **Tabelle 3**. Anschließend werden die Gesamtkosten pro Jahr für die einzelnen Maßnahmen berechnet, **Tabelle 4**.

Tabelle 3: Schallpegelerhöhung und Anschaffungskosten der Maßnahmen

Drosselung (DS)	
Schallpegelerhöhung:	$\Delta L_{pA, DS} = + 5 \text{ dB(A)}$
Anschaffungskosten Drosselung:	$A_{DS} = 200 \text{ DM}$
Frequenzumrichter (FU)	
Schallpegelminderung:	$\Delta L_{pA, FU} = -15 \text{ dB(A)}$
Anschaffungskosten Frequenzumrichter:	$A_{FU} = 6900 \text{ DM}$
Trafo-Drehzahlsteller (TD)	
Schallpegelminderung:	$\Delta L_{pA, TD} = -15 \text{ dB(A)}$
Anschaffungskosten Trafo:	$A_{TD} = 2000 \text{ DM}$

Die Betrachtung der Gesamtkosten aller Maßnahmen zeigt, daß sich für den Frequenzumrichter, auf zehn Jahre betrachtet, geringere Gesamtkosten pro Jahr ergeben (die Differenz beträgt 558 DM), obwohl der Anschaffungspreis des Frequenzumrichters das 34,5 fache des Preises der Drosselung beträgt. Dies resultiert aus den wesentlich geringeren Energiekosten durch die Volumenstromregelung mittels Drehzahländerung. Besonders groß ist der Kostenunterschied zwischen Drosselung und Trafo-Drehzahlsteller. Der Trafo-Drehzahlsteller liegt sehr niedrig im Anschaffungspreis gegenüber dem Frequenzumrichter. Der Frequenzumrichter

bietet jedoch mehr Möglichkeiten bei der Drehzahlregelung. Die Entscheidung, ob Frequenzumrichter oder Trafo, richtet sich somit nach den jeweiligen Anforderungen und müsste im Einzelfall beantwortet werden.

3 Zusammenfassung

Wie das zuvor beschriebene Beispiel zeigt, müssen Lärminderungsmaßnahmen letztendlich keine zusätzlichen Kosten verursachen. Im allgemeinen kann man jedoch davon ausgehen, daß die Investitionskosten für die jeweiligen Maßnahmen erst einmal Kosten verursachen, diese jedoch immer im Rahmen einer Kostenrechnung gesehen werden müssen. Zudem wird häufig das Einsparungspotential von zusätzlichen Personalkosten durch die Reduzierung von lärmbedingt auftretenden Fehltagen nicht berücksichtigt.

Denn: „Können Sie effektiv arbeiten, wenn neben ihnen jemand mit einer Kreissäge oder einem Aufreißhammer arbeitet?“

4 Literatur

- /1/ Matschke, M.J.: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre I+II; Vorlesungsskripte des Instituts für Wirtschaftswissenschaften der TU Clausthal; 1994
- /2/ VDI-Richtlinie 3800: Kostenermittlung für Anlagen und Maßnahmen zur Emissionsminderung; VDI-Verlag; Düsseldorf 1979
- /3/ VDI-Richtlinie 2235: Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren –Methoden und Hilfen-; VDI-Verlag; Düsseldorf 1987
- /4/ Greim, H.-R.: Kosten alternativer Lärminderungsmaßnahmen, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin; Dortmund 1981
- /5/ Neise, W.: Turbulenz und Geräuschminderung bei Ventilatoren; Kraftwerkstechnik 63; Heft 11; 1983

- /6/ Katalog Lärminderungsmaßnahmen: Zentralinstitut für Arbeitsschutz beim Staatssekretariat für Arbeit und Löhne (ZIAS). Dresden 1976
- /7/ Liehmann, K.: Konstruktive Untersuchung zur Auswahl von Geräuschminderungsmaßnahmen; Diplomarbeit TU Clausthal; 1997

Tabelle 4: Berechnung der Gesamtkosten/Jahr für Drosselung, Frequenzumrichter und Trafo-Drehzahlsteller /7/

	Drosselung	Frequenzumrichter	Trafo-Drehzahlsteller
Kapitalkosten: kalkulatorische Abschreibung	$A_{DS}/10 \text{ Jahre}=20 \text{ DM/Jahr}$	$A_{FU}/10 \text{ Jahre}=690 \text{ DM/Jahr}$	$A_{TD}/10 \text{ Jahre}=200 \text{ DM/Jahr}$
kalkulatorische Zinsen (10% von A)	20 DM/Jahr	690 DM/Jahr	200 DM/Jahr
Sonstige fixe Kosten: Instandhaltung	5 DM/Jahr	10 DM/Jahr	10 DM/Jahr
Variable Kosten: Energiekosten	3480 DM/Jahr	1576,8 DM/Jahr	1576,8 DM/Jahr
Gesamtkosten:	3525 DM/Jahr	2966,8 DM/Jahr	1986,8 DM/Jahr

Erarbeitung sicherheitstechnischer Maßnahmenkataloge zur Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse, Maschinen und Anlagen

Bönig, S.

Neben der Durchführung von Sicherheitsanalysen lässt sich die Anlagensicherheit durch Anwendung sicherheitstechnischer Maßnahmenkataloge effizient erhöhen. Im Rahmen des Teilprojektes A2 des Sonderforschungsbereiches 180 wird das Wissen aus Fehler- und Störfallanalysen für den Entwicklungsingenieur aufbereitet und in Abhängigkeit der Entwicklungsschritte in Katalogen systematisiert.

In addition to failure and hazard analysis the safety in plant design can be improved efficiently by using safety catalogues. Within the framework of the project A2 in the Sonderforschungsbereich 180 (Special Reserach Area) the knowledge of failure and hazard analysis has been made applicable to the development engineer in form of safety catalogues for each design phase.

1 Einleitung

Bedingt durch die hohe Komplexität einer Anlage können in allen Lebensphasen, von der Anlagenplanung über die Fertigung und Montage bis hin zum Produktionsbetrieb und schließlich der Stilllegung der Anlage Fehler auftreten. Die Fehler während des Anlagenbetriebes, die trotz aufwendiger Sicherheitstechnik zu meldepflichtigen Störfällen (wie Brand, Explosion, Stofffreisetzung) eskalieren können, haben ihren Ursprung (Störungsursache) nicht ausschließlich zu diesem Zeitpunkt. Oft schleichen sich Fehler während der Anlagenentwicklung ein, die unbemerkt weitere Entwicklungsschritte passieren und schließlich beim Zusammenwirken der Komponenten (siehe **Bild 1**) unter Prozessbedingungen oder aber auch bei unerwünschten Prozessabweichungen zum Vorschein kommen. Ein Beheben dieser Fehler ist z.T. nur unter erheblichem finanziellen Aufwand (Produktionsausfall) wenn überhaupt möglich (Zerstörung der Anlage).

Fehler während der Entwicklung können nur vermieden werden, wenn diese im Voraus bekannt sind oder im realistischen Maße vorausgesehen werden können. Gerade aber bei Neuanlagen lie-

gen nur unzureichende Erfahrungen über die Anlage und deren Komponenten – und folglich auch über ihre Schwachstellen vor. Trotz umfangreicher experimenteller Simulationen vor dem eigentlichen Produktionsbeginn verbleibt aufgrund der Vielzahl von Einflußparametern ein Restrisiko beim Betrieb einer Anlage.

Ein frühzeitiger und entwicklungsbegleitender Einsatz von bewährten sicherheitserhöhenden Maßnahmen kann den Entwicklungsingenieuren helfen, den Sicherheitsgrad der Anlage zu steigern, ohne dabei die wirtschaftlichen Aspekte neben der potentiell machbaren Prozess- und Maschinentechnik außer Acht zu lassen.

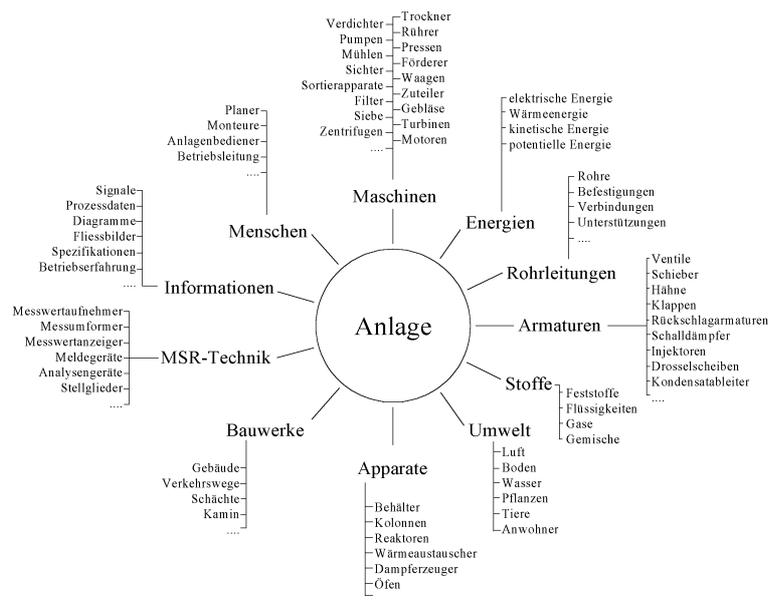


Bild 1: Komponenten einer verfahrenst. Anlage

2 Entwicklungsschritte bei der Anlagenplanung

Bei der Entwicklung verfahrenstechnischer Anlagen ist grundsätzlich zwischen den Phasen Verfahrensentwicklung und Maschinenentwicklung zu unterscheiden. Beide Phasen werden zum Teil nacheinander, zum Teil parallel abgewickelt.

Unter Verfahrensentwicklung versteht man die Entwicklung eines Prozesses, mit dem Ziel, ausgehend von bestimmten Einsatzstoffen und den geforderten Ausgangsprodukten, eine „gewünschte

Anlagenplanung

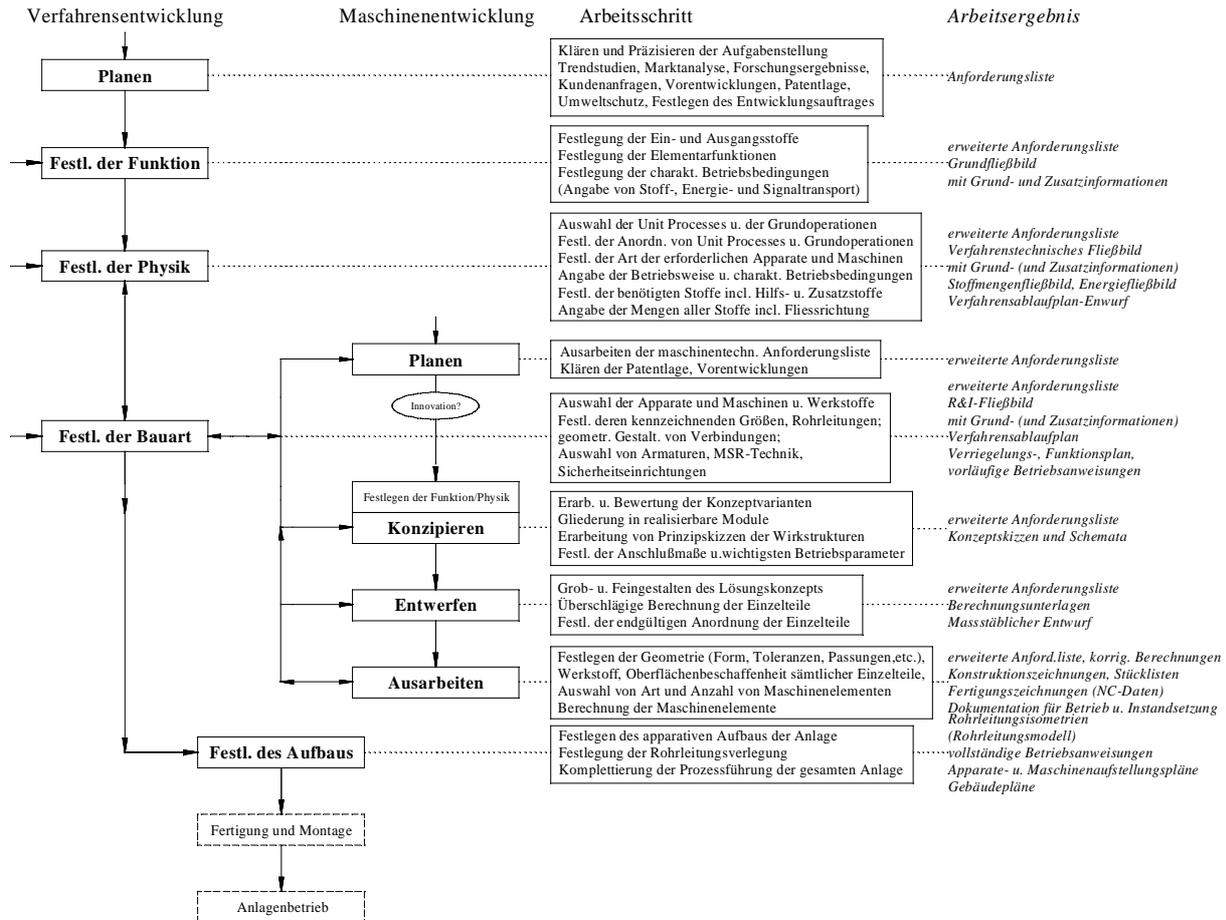


Bild 2: Entwicklungsschritte der Anlagenplanung

Stoffänderung auf einem neuen, technisch machbaren, wirtschaftlich und industriell auswertbaren Weg“ zu realisieren /1/. Die konstruktive Umsetzung des Prozesses durch maschinen- bzw. apparatetechnische Komponenten wird als Maschinenentwicklung definiert.

Obwohl in Deutschland jährlich ca. 250 neue chemische Stoffe (ca. 1000 weltweit) hergestellt und vermarktet werden /2/ ist die Verfahrensverbesserung bzw. -modifizierung zahlenmäßig bedeutender als die Entwicklung tatsächlich innovativer Verfahren. Bei der Auswahl der für den Prozess benötigten Apparate und Maschinen wird in der Regel auf bewährte Standardkomponenten zurückgegriffen; Neuentwicklungen sind die Ausnahme. Aber auch gerade eine Anpassung der Maschinen an veränderte Stoff- bzw. Prozessparameter und vor allem das Zusammenspiel aller Anlagenkomponenten untereinander erfordert z.T. aufwendige Entwicklungsarbeit und kann mitunter zu Neukonstruktionen mit innovativen Wirkstrukturen führen.

Eine Möglichkeit, die Entwicklungsschritte der Anlagenplanung von der Aufgabenstellung bis hin zur

Freigabe für die Fertigung und Montage anlagenunabhängig und zielorientiert darzustellen, zeigt **Bild 2**. Hierzu wurden die Vorschläge von Blaß /1/ zur Verfahrensentwicklung sowie die in der VDI Richtlinie 2222 /3/ beschriebene methodische Vorgehensweise zur Konstruktion technischer Produkte auf die Weise kombiniert, dass ein paralleles Entwickeln der beiden Aufgabenstellungen Verfahrensentwicklung und Maschinenentwicklung bereits auf hohem Abstraktionsniveau (und damit zu einem frühen Zeitpunkt) möglich ist.

Allerdings sollte beim Lesen dieses Ablaufschemas bedacht werden, dass jeder Entwicklungsprozess auch schon aufgrund der Komplexität der Aufgabenstellung und des Vorwissens (z.B. Erfahrung mit den Einsatzstoffen) sich thematisch und zeitlich individuell gestaltet. Nicht jeder Entwicklungsschritt kann und wird aus diesem Grund in der gleichen Intensität durchgeführt. Nur eine iterative Vorgehensweise kann zur optimalen Lösungsfindung bei der Auswahl von Prozess- oder Konstruktionsparametern, Hilfsstoffen oder beispielsweise der Reihenfolge von Prozessfunktionen führen. Bevor im einzelnen auf die Planungsschritte und deren Er-

gebnisse eingegangen wird, werden zunächst mögliche Faktoren vorgestellt, die den zeitlichen aber auch den thematischen Ablauf beeinflussen können.

2.1 Anlagenplanung- ein individueller Entwicklungsprozess

Bei der Verfahrensentwicklung ist es üblich, eine gewisse Reihenfolge einzuhalten, die unter dem Namen „Zwiebelmodellentwicklung“ bekannt ist: Es wird mit der Entwicklung derjenigen Prozesse begonnen, die aufgrund ihrer Betriebsbedingungen die geringste Flexibilität aufweisen, wie die chemischen Prozesse („Unit Prozesses“ wie z.B. Oxydieren, Neutralisieren, Polymerisieren) und Stoffaustauschprozesse (Rektifizieren, Absorbieren, etc.). Erst danach werden die anpassungsfähigeren Prozesse behandelt, zunächst die Wärmeaustauschprozesse, dann die mechanischen Prozesse (wie z.B. Mischen, Zerkleinern, Sichten). Zum Abschluß erfolgt die Behandlung der Förderung und der Lagerung von Feststoffen bzw. Fluiden /3/. Inwieweit bei der Entwicklung die individuelle Behandlung der einzelnen Prozesse voranschreitet (konkretisiert wird) ist nicht nur aufgabenspezifisch sondern auch abhängig von der Erfahrung der Entwicklungsingenieure sowie der Arbeitsorganisation im Betrieb.

Vor allem bei neuen Verfahren werden Prozesse in unterschiedlichen Maßstäben realisiert, um so die Risiken der Betriebsleitung (Entwicklungsstopp) zu minimieren und ggf. unbekannte Parameter wie physikalisch-chemische Stoffdaten zu erarbeiten. Bei der Entwicklung der Laborversuche, der halotechnischen Anlagen und großtechnischen Produktionsanlagen unterscheiden sich aber nicht nur Stoff-, Energie- und Informationsströme voneinander. Abweichungen in Art, Größe, Anzahl und Anordnung der zu entwickelnden Komponenten und ggf. die Übertragung auf eine andere Betriebsweise erfordern zusätzliche Entwicklungsarbeit, auch durch die Integration bisher nicht betrachteter Verfahrensschritte (Lagerung, Transport, Speicherung, etc.).

Im Laufe der Anlagenentwicklung sind zu verschiedenen Zeitpunkten immer wieder Stellungnahmen und Genehmigungen sowohl von betriebseigenen als auch externen Fachleuten einzuholen. Neben den zu bewilligenden Investitions- und Betriebskosten mit Hilfe von Wirtschaftlichkeitsabschätzungen /-berechnungen bestimmen die „Planungskosten“ nicht selten den weiteren Entwicklungsablauf. Auch

sind Genehmigungen für die gesamte Anlage (z.B. im Rahmen der Störfallverordnung oder der Umweltverträglichkeitsprüfung), für einzelne Komponenten (z.B. nach der Maschinenrichtlinie) oder für die dort zu beschäftigenden Personen (Arbeitsschutzgesetz, etc.) von den entsprechenden Behörden zu beantragen, bevor es zur Realisierung der Anlage bzw. zur Inbetriebnahme kommt. Um Verzögerungen zu vermeiden und bei Bedarf Auflagen seitens der Behörde in die Problemlösung einbeziehen zu können, ist es für den Anlagenbetreiber sinnvoll, diese Anträge zu einem frühen Zeitpunkt und parallel zur weiterer Entwicklungsarbeit zu erstellen. Es kann aus diesem Grund erforderlich sein, bereits zu Beginn der Entwicklung in bestimmten Bereichen über Detailwissen zu verfügen (oder über entsprechend abgesicherte Annahmen), wobei die Richtigkeit des Sachverhaltes allerdings im Laufe der Entwicklung und im ganzheitlichen Zusammenwirken immer wieder bestätigt werden muss. Die Entwicklung verfahrenstechnischer Anlagen wird somit neben den oben genannten Einflussfaktoren auch durch die erforderlichen Genehmigungsanträge geprägt.

Der in **Bild 2** dargestellte Ablauf zur Entwicklung verfahrenstechnischer Anlagen ist demzufolge ein starke Vereinfachung der tatsächlichen Problematik. Die einzelnen Entwicklungsschritte sollen im folgenden kurz erläutert werden.

2.2 Beschreibung der Arbeitsschritte und Ergebnisse

2.2.1 Planen

Zu Beginn der Entwicklung einer neuen Anlage steht die Planungsphase des Verfahrens. Hier werden Verfahrensideen in der Aufgabenstellung konkretisiert und der Arbeitsumfang festgelegt. Forderungen und Wünsche des Kunden, wenn Anlagenbauer und -betreiber nicht identisch sind, sowie Ergebnisse der Analyse des Anwendungspotentials werden in einer ersten Anforderungsliste dokumentiert. Ausführliche Recherchen über den Stand der Technik wie z.B. Patentliteratur, Fachbücher, Konkurrenzprojekte, etc. sind notwendig, um die Entwicklungszeit zu reduzieren oder den Einsatz verbotener Substanzen auszuschließen.

2.2.2 Festlegen der Funktion

Nach Festlegung der Aufgabenstellung wird der Gesamtprozess auf der sog. Funktionsebene, als

oberste Abstraktionsebene, in die erforderlichen Elementarfunktionen für Stoff-, Energie- und Signalumsatz aufgeteilt (siehe **Tab. 1**).

Elementarfunktionen
1. Stoff umwandeln
2. Stoff trennen
3. Stoff vereinigen
4. Phasenzustand einstellen
5. Stoff leiten
6. Stoff speichern

Tab.1: Elementarfunktionen, Stoffumsatz

Es wird entschieden, auf welche Weise und in welcher Reihenfolge die in Menge und Art angegebenen Stoffe behandelt werden. Die so erarbeiteten neuen Anforderungen werden mit den erforderlichen charakteristischen Betriebsbedingungen und Energien in der erweiterten Anforderungsliste aufgenommen. Liegt die Funktionsstruktur des Prozesses fest, so wird sie mit den zu diesem Zeitpunkt bekannten Informationen im Grundfließbild dokumentiert, siehe **Bild 3**. In den Rechtecken werden die Elementarfunktionen angegeben, die Pfeillinien zwischen den Rechtecken symbolisieren den Stoffein- bzw. austritt.

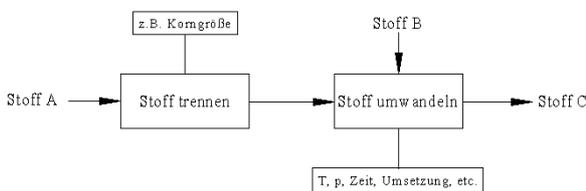


Bild 3: Beispiel eines Grundfließbildes

(In der Praxis differiert der Informationsgehalt von Grundfließbildern erheblich, z.B. weil bei einer Anlage nicht alle (Teil-) Prozesse neu konzipiert werden müssen. So können die Rechtecke der „Grundfließbilder“ neben den Elementarfunktionen ganze Verfahren (z.B. „Gasentstaubung“) oder bereits festgelegte Operationen (z.B. „Mahltrocknung“) beinhalten.)

2.2.3 Festlegen der Physik

Auf der Grundlage der Informationen des Grundfließbildes werden die einzelnen Schritte des Verfahrens konkretisiert, indem die physikalischen Wirkzusammenhänge festgelegt werden. Zur Erfüllung der Elementarfunktionen werden systematisch geeignete chemische Reaktionen (Unit

Processes) sowie Grundoperationen (Unit Operations wie z.B. Klassieren, Absorbieren, Elektroabscheiden) ausgewählt und deren Verknüpfung untereinander festgelegt. Hilfsstoffe (wie Transportluft) oder Zusatzstoffe (Lösungsmittel, Katalysatoren) können erforderlich werden, die z.T. eine gesonderte Behandlung im System benötigen (neues Teilsystem) und bei der Berechnung der Stoffmengen- und Energiebilanzen zusätzlich zu den bereits bekannten Ein- und Ausgangsstoffen Berücksichtigung finden müssen. Ebenso muss die Betriebsweise (kontinuierlich, diskontinuierlich oder halbkontinuierlich) des Prozesses bzw. der Teilprozesse festgelegt werden. Bei diskontinuierlichen Prozessen unterliegen die einzelnen Stufen zeitlich veränderten Betriebsbedingungen während des Prozessablaufes. Somit ist es erforderlich, dass mehrere Funktionen/ Operationen in einem Bauteil nacheinander realisiert werden müssen (z.B. Einfüllen, Aufheizen/Rühren, Entleeren). Zusätzlich zum Stoffmengen- und Energiefließbild ist bei diskontinuierlichen und halb-kontinuierlichen Prozessen zusätzlich ein Verfahrensablaufplanentwurf zu entwickeln, der die Reihenfolge der erforderlichen Arbeitsgänge der betroffenen Teilsysteme enthält. Diskontinuierliche Prozesse (Chargenprozesse) werden beispielsweise bei geringen Stoffdurchsätzen oder häufigem Produktwechsel vorgesehen.

Für Stoff- und Wärmeaustauschprozesse muss die Art der Stromführung festgelegt werden. Ob eine Gegenstrom-, Gleichstrom oder Kreuzstromführung gewählt wird, hängt neben dem erforderlichen Austauschgrad auch von der konstruktiven Realisierung oder aber von prozessspez. Anforderungen, wie z.B. schonende Gutbehandlung oder große Triebkräfte zu Prozessbeginn, ab /1/.

Als wichtigstes Ergebnis dieses Entwicklungsschrittes steht das verfahrenstechnische Fließbild (VT-Fließbild), das die bisherigen Informationen mit den in DIN 28004, Teil 3 genormten Bildzeichen dokumentiert, siehe **Bild 4**.

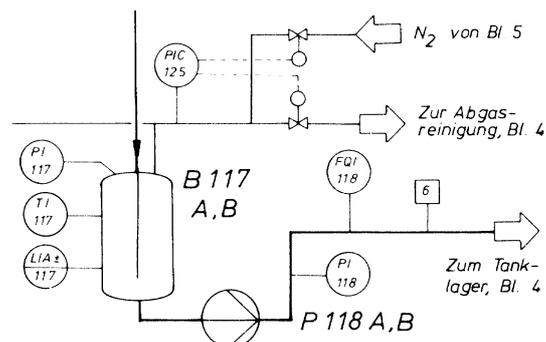


Bild 4: Ausschnitt eines VT-Fließbildes /4/

Diese erste Anordnung von den Komponenten der geplanten Anlage, die die erforderlichen Operationen durchführen sollen, ist mit dem entsprechenden Stofffluß und dessen Richtungsangabe (z.T. auch Energie- und Signalfuß) in dem Fließbild bereits zu diesem Zeitpunkt möglich. Denn aufgrund der Wahl der Grundoperationen mit den zugehörigen physikalischen Zuständen der Stoffe, die sich entweder aus den Anforderungen ergeben (Aufgabenstellung) oder im Zuge der Entwicklung erarbeitet werden, und der gewählten Betriebsweise kann bereits die Art der erforderlichen Apparate und Maschinen prinzipiell festliegen.

Zum Teil ergibt sich schon hier die Möglichkeit, die wesentlichen Armaturen im System zu platzieren sowie die Aufgabenstellung und den Ort für die Technik zum Messen, Steuern und Regeln des Prozesses festzuhalten.

Die Angabe von Zusatzinformationen im Fließbild, wie z.B. kennzeichnende Größen sowie die Höhenlage von wesentlichen Apparaten und Maschinen sind in der Praxis ebenfalls üblich und ergibt sich zumeist aus den (Fest-) Anforderungen aus der Aufgabenstellung, oder sie ist in diesem Entwicklungsschritt noch nicht möglich.

2.2.4 Festlegen der Bauart

In dieser Phase findet die detaillierte Auswahl und Berechnung aller für das Verfahren benötigten Komponenten statt. Sie ist die Schnittstelle zwischen der Verfahrens- und der Maschinenentwicklung und erfordert demnach einen hohen Informationsaustausch zwischen den Ablaufschritten aber auch zwischen den beteiligten Fachgebieten.

Hier werden auch sämtliche Armaturen, Rohrleitungen, die meß- und regelungstechnische Ausstattung und Sicherheitseinrichtungen (auch redundante Komponenten) festgelegt. Für die Rohrleitungen müssen die Nennweiten, Druckstufen und Werkstoffe bestimmt sowie alle Verbindungen und Unterstüzungen erarbeitet werden. Nach Auswahl der Bauformen müssen die kennzeichnenden Größen der Maschinen und Apparate (wie beispielsweise Fördervolumen, Trenngrenze) ebenso festgelegt werden wie deren wesentlichen Werkstoffe.

Sind alle benötigten Bauteile zur Verwirklichung des Prozesses verfügbar, lassen sich die nun vorliegenden Informationen wiederum grafisch im sog. Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild (R&I-Fließbild, **Bild 5**) darstellen. Das VT-Fließbild wird somit weiter konkretisiert und insbesondere um die

Bildzeichen der MSR-Technik erweitert (DIN 19227 Blatt 1).

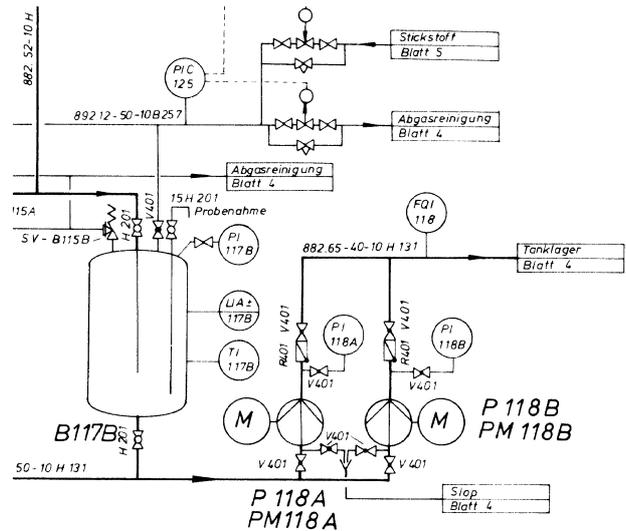


Bild 5: Ausschnitt eines R&I-Fließbildes /4/

Informationen, die im R&I-Fließbild nicht erkennbar werden, aber für die Betriebsvorbereitungen, die Inbetriebnahme oder bei Betriebsstörungen bekannt sein müssen, sind in weiteren Plänen wie Verriegelungsplan oder Funktionsplan zu erarbeiten sowie in vorläufigen Betriebsanweisungen zu dokumentieren. In Rohrleitungslisten werden alle Rohrleitungen mit den zugehörigen Daten eingetragen (Bezeichnung, Verlauf, Druck, Temperatur, Isolation, Begleitheizung, Korrosionszuschlag) /5/.

2.2.5 Maschinenentwicklung

Bei neuartigen oder modifizierten Verfahren kann und soll z.T. nicht auf bekannte (bewährte) Bauarten zurückgegriffen werden. Sollen Wirkstrukturen auf innovative Weise maschinell umgesetzt werden, muss auf hohem Abstraktionsniveau in den Konstruktionsprozess eingestiegen werden, der sich in die vier Phasen Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten unterteilt, siehe VDI Richtlinie 2222. Nicht immer müssen alle Phasen mit der gleichen Intensität durchgeführt werden. Zur Anpassung der Apparate und Maschinen an veränderte Stoff- oder Prozessparameter (Temperatur, Druck) reicht es z.B. aus, bei der Dimensionierung einzelner Bauteile beim Entwerfen und Ausarbeiten Konstruktionsparameter oder Werkstoffkenngrößen zu variieren und zu optimieren.

Der Einstieg in den Konstruktionsprozess kann demnach vor, während oder nach der Festlegung der Bauart erfolgen.

Ebenso ist es denkbar und z.T. auch erforderlich, nach der Entwicklung einer neuartigen Maschine

rückwirkend in die Verfahrensentwicklung einzugreifen. Massenbilanzen müssen ggf. korrigiert oder Komponenten hinzugefügt bzw. weggelassen werden.

2.2.6 Festlegen des Aufbaus

Auf der Grundlage der zuvor erfolgten Detailplanung kann nun der apparative Aufbau der Anlage in Maschinen- und Apparateaufstellungsplänen dokumentiert werden. Diese enthalten den räumlichen Aufbau, die Aufstellung und die Abstände zwischen den einzelnen Komponenten. Anhand dieser Informationen können die Gebäudepläne und anschließend die Rohrleitungsverlegung (Rohrleitungsisometrien, Bild 6) erarbeitet werden.

Heute ersetzen z.T. maßstäbliche 3D-Computer-Modelle der Anlage die früher aufwendig gestalteten Rohrleitungsmodelle zur Überprüfung der Konformität. Zum Ende des letzten Entwicklungsschrittes müssen sämtliche Informationen zur Bestellaufgabe sowie zur Fertigung und Montage vorliegen. Auch müssen die Arbeiten zur Erstellung von Betriebsanweisungen abgeschlossen sein.

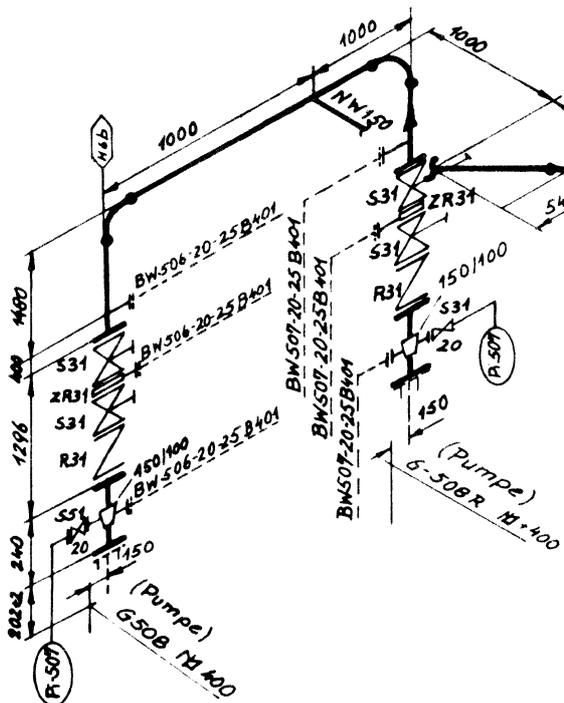


Bild 6: Ausschnitt einer Rohrleitungsisometrie /4/

3 Konkretisierung der Maßnahmen zur sicheren Entwicklung von Anlagen

Um nachhaltig sicher zu planen, ist es erforderlich, die Arbeitsergebnisse jedes einzelnen Entwicklungsschrittes einerseits auf Vollständigkeit, andererseits auf Schwachstellen/Fehler zu überprüfen. Beispiele der zu überprüfenden Punkte sind in Bild 7 aufgeführt.

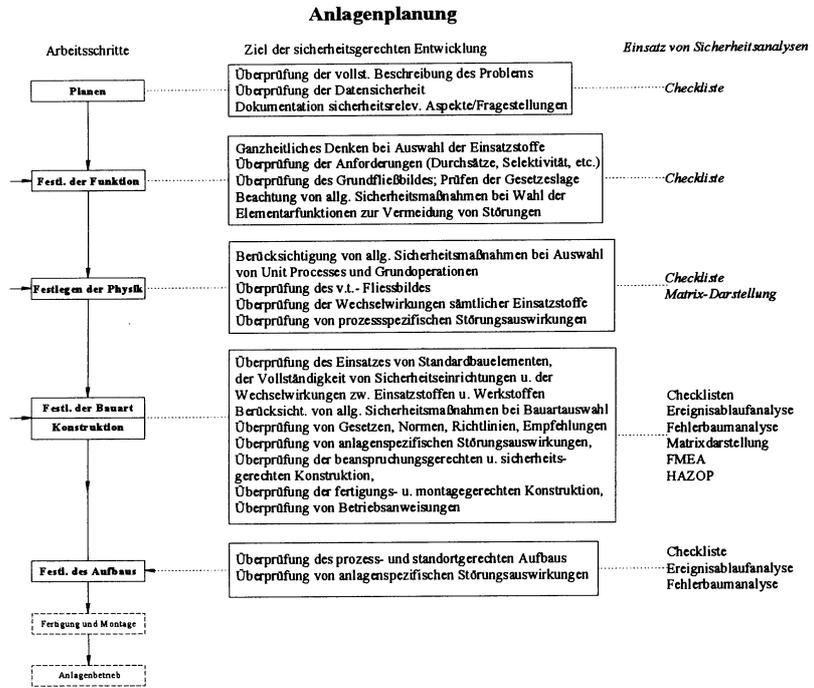


Bild 7: Entwicklungsbegleitende Maßnahmen zur Anlagenplanung

In Abhängigkeit des Konkretisierungsgrades bieten sich hierzu verschiedene prospektive Analysemethoden, sog. Sicherheitsanalysen, an, wie z.B. Checklisten, Matrix-Darstellungen, HAZOP-Verfahren (PAAG-Verfahren), FMEA's, Fehlerbaumanalysen, Ereignisablaufanalysen oder Entscheidungstabellen, siehe /6/.

Die Methoden unterscheiden sich u.a.:

- in ihrem Leistungsspektrum (*Untersuchung binärer/nicht binärer Ursache-Wirkung-Beziehungen, qualitative/quantitative Auswertung, Erarbeitung von Gegenmaßnahmen, etc.*)
- in ihrer Vorgehensweise (*induktiv/deduktiv*)
- in ihrem Informationsbedarf (*Betriebsverhalten, Unfall-/Störfallauswertung, aktuelle Gesetzeslage, Ausfallraten, etc.*) und
- in ihrer Darstellungsweise (*Formblatt, log. Diagramme, Matrix, Fragestellungen*).

Welche Analyse zu welchem Zeitpunkt (Konkretisierungsgrad) nutzbringend eingesetzt wird, bzw. welche Analysen miteinander / nacheinander har-

monieren, ist u.a. abhängig von den zur Verfügung stehenden Informationen sowie vom Zweck der Analyse (Überprüfung bekannter Sachverhalte, der Vollständigkeit, Ermittlung des Systemverhaltens, unbekannter Strukturen, etc.) sowie der Komplexität der Anlage.

In **Bild 7** (rechter Teil) ist eine Möglichkeit eines entwicklungsbegleitenden Einsatzes unterschiedlicher sicherheitsanalytischer Methoden aufgeführt. Der optimale Einsatzzeitpunkt der in der Praxis mit Erfolg angewendeten Sicherheitsanalysen bei der Entwicklung verfahrenstechnischer Anlagen und Maschinen wird zur Zeit vom IMW untersucht.

Die Anwendung von Sicherheitsanalysen während der Anlagenplanung ist im Allgemeinen sehr zeitaufwendig, personalintensiv und bedarf zur effizienten Durchführung neben einem interdisziplinären Wissen ebenso Detailwissen, Vorstellungsvermögen sowie einer gewissen Analysenerfahrung. Vor allem das Erarbeiten von Schwachstellen und deren Ursachen der einzelnen (insbesondere innovativer und/oder sicherheitsrelevanter) Komponenten in Verbindung mit den festgelegten Stoff- und Prozessparametern aber auch angrenzenden Komponenten kann den Analysten Schwierigkeiten aufgrund fehlender Betriebserfahrung bereiten.

Es ist demnach unzumutbar, jeden Entwicklungsingenieur oder Konstrukteur eine umfangreiche Analyse „seines“ Systems durchführen zu lassen. Allerdings können die Arbeiten unterstützt werden, indem eine systematisch angelegte und erweiterbare sicherheitstechnische Datenbasis für die Entwicklungsarbeit zur Verfügung steht (**Bild 8**). Die Datenbasis muss nicht nur imstande sein, mögliche realistische und bereits bei ähnlichen oder gleichen Systemen aufgetretene Störungen mit deren Ursachen (evtl. auch Auswirkungen) sowie konkreten Vorschlägen für Gegenmaßnahmen zu dokumentieren. Sie muss ebenso ihre Informationen sinnvoll miteinander verknüpfen können, damit eindeutige Zuordnungen möglich sind.

In /7/ wurde beispielsweise gezeigt, dass die am IMW entwickelte KOMB-Analyse, als modifiziertes HAZOP-Verfahren, geeignet ist, Fehler an Anlagenkomponenten während der Planung eines verfahrenstechnischen Systems (Pilotanlage) zu erkennen und diese komponentenweise so zu systematisieren, dass Informationen für eine Datenbasis geliefert werden können.

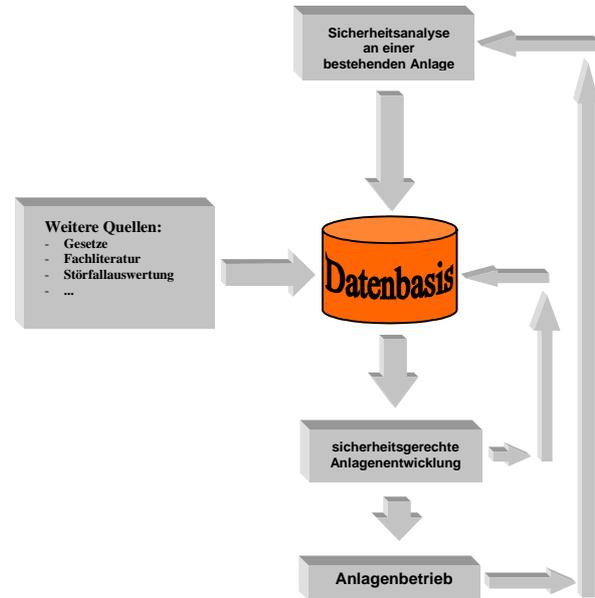


Bild 8: Aufbau und Nutzen der Datenbasis

Damit die Informationen der Datenbasis dem Konstrukteur frühzeitig zur Verfügung stehen können, sind sämtliche Planungsschritte, also nicht nur auf der Bauart-, sondern bereits auf der Funktions- und Physikebene zu berücksichtigen. Der Nutzen dieser Informationen für die Entwicklungsingenieure umfasst folgende Punkte:

- Vermeiden von Wiederholungsfehlern,
- Erkennen von Risiken beim Einsatz von Verfahren, Stoffen, Komponenten,
- Frühzeitige Integration von Sicherheitsanforderungen in die Verfahrens- und Maschinenentwicklung,
- Entwickeln der Kreativität zur Beseitigung von Störungsursachen,
- Einsatz in der Praxis bewährter Verfahren, Komponenten,
- Reduzierung der Anzahl von Entwicklungsänderungen,
- Bereitstellung maschinen- und anlagenunabhängiger Daten,
- Vorhandensein personenungebundenes Wissens,
- Zugänglichkeit interdisziplinärer Informationen,
- Reduzierung des Leistungsumfanges, Aufwandes von gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsanalysen.

Ebenso kann dieses Wissen bei der Durchführung von Sicherheitsanalysen an bestehenden Anlagen die Vollständigkeit aber auch die Kreativität beim Auffinden von Gefahrenquellen und der anlagenweiten Ursache-Wirkungskette unterstützen.

3.1 Beispiel eines sicherheitstechnischen Maßnahmenkataloges

In Anlehnung an die oben beschriebenen Entwicklungsschritte ist beispielhaft eine Datenbasis für die Funktions-, Physik- und Bauartebene in Form eines sicherheitstechnischen Maßnahmenkataloges erarbeitet worden (**Tab. 2, 3** und **4** im Anhang). Der Katalog beinhaltet Maßnahmen zur Verhinderung von Störungen unter Angabe möglicher Ursachen für Elementarfunktionen, Grundoperationen und Bauteile. Zur Erarbeitung der Daten wurde zum einen auf Fachliteratur, zum anderen aber auch auf Störfallauswertungen und die Ergebnisse aus der durchgeführten Sicherheitsanalyse an einer Pilotanlage [7] zurückgegriffen.

Zunächst wurden 5 **Störungsarten** festgelegt, die einzeln oder gemeinsam bei einer Anlage zu einem (meldepflichtigen) Störfall führen können:

1. Keine oder unvollständige Funktionserfüllung,
2. Unerwünschte chemische Reaktionen, Effekte (*durchgehende Reaktion, Brand, Explosion*),
3. Unerwünschte physikalische Effekte (*Staubexplosion*),
4. Unerwünschte thermische Effekte (*Wärmeproduktion*),
5. Stofffreisetzen.

Anschließend wurden die **Ursachen** der Störungen, für die Gegenmaßnahmen erarbeitet werden mußten, wie folgt systematisiert:

1. Unzulässige Wahl der Funktion: (*Art, Position im Gesamtsystem*),
2. Unzulässige Stoffparameter der Eingangsstoffe: (*Konzentration, Aggregatzustand, Anzahl der Phasen, Partikelgröße, Verunreinigungen, etc.*),
3. Unzulässige Prozeßparameter: (*Temperatur, Druck, Verweilzeit (Stoffakkumulation, etc.) incl. unzulässiger Schwankungen, unsicherer Betriebspunkt*),
4. Unzulässige Energiezufuhr/-abfuhr: (*Vorhandensein einer unzulässigen Drucksenke/Druckquelle, Vorhandensein einer unzulässigen Temperatursenke/Temperaturquelle*),
5. Energieausfall,
6. Signalausfall,
7. Unzureichende Stoffkenntnis,
8. Fehlbedienung der Funktion: (*unzulässige Zugabe der Einsatzstoffe bzw. Entnahme der*

Ausgangsstoffe, Menge, Mengenverhältnisse, Zeitpunkt, Ort, Stoffverwechslungen),

9. Unzulässiger Wechselwirkungen zwischen Einsatzstoffen und anderen Stoffen im System: (*z.B. Hilfsmittel-, Lufteinbruch, Selbsterhitzung, Empfindlichkeit der Stoffe gegenüber Betriebsbedingungen (z.B. Druck, Temp., Verweilzeit) oder Unverträglichkeiten gegenüber Hilfsstoffen; Zusammentreffen von Zündquelle, Luft-sauerstoff und brennbarem Stoff, Verluste (Wärme, Druck, Reibung), unerwünschte Sedimentation, Korrosion*)
10. Unerwünschte äußere Einwirkungen auf System: (*z.B. Druck, Wärme, Wind, Niederschlag*)

Diese Einteilung nach bestimmten Störungs- bzw. Ursachenarten erweist sich als sinnvoll, da sie ein systematisches und damit vollständiges Auffinden der Störungen und ihrer Ursachen unterstützt. Zudem wird verhindert, dass neben der eigentlichen Basisursache Folgeereignisse in großer Anzahl aufgelistet werden, durch die die Anwendung der Maßnahmenkataloge für den Entwicklungsingenieur aufgrund der Informationsfülle ohne zusätzlichen Nutzen erschwert werden würde.

Beispielhaft sind in **Tab. 2, 3** und **4** (siehe Anhang) Auszüge aus den sicherheitstechnischen Maßnahmenkatalogen für die drei Abstraktionsebenen aufgeführt.

4 Zusammenfassung

Eine methodische Vorgehensweise der Anlagenplanung wird vorgestellt und anhand der durchzuführenden Arbeiten sicherheitstechnische Zielsetzungen der einzelnen Entwicklungsschritte abgeleitet. Die Notwendigkeit aber auch die Problematik der entwicklungsbegleitenden Durchführung prospektiver Sicherheitsanalysen zur frühzeitigen Identifizierung und Behebung von Gefahrenquellen und deren Ursachen wird erläutert. Eine systematische Wissensintegration in den Entwicklungsprozess vor allem aus Sicherheitsanalysen, die komponentenabhängige Störungen ermitteln können, wie beispielsweise die KOMB-Analyse, wird im Rahmen beispielhaft erarbeiteter sicherheitstechnischer Maßnahmenkataloge vorgestellt und deren Vorteile für den Entwicklungsingenieur und die Anlagensicherheit aufgezeigt.

5 Literatur

/1/ Blaß, E.: Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse, Methode- Zielsuche- Lösungssuche- Lösungsauswahl, Otto Salle Verlag, Frankfurt /Main, 1989

/2/ Mayer, P.: Gefahrstoffe 1, Fernstudienunterlagen Sicherheitstechnik/Umweltschutz, TFH Berlin, 1995

/3/ VDI Richtlinie 2222; Konstruktionsmethodik; Konzipieren technischer Produkte; VDI Handbuch Konstruktion 1977

/4/ Bernecker, G.: Planung und Bau verfahrenstechnischer Anlagen: Projektmanagement und Fachplanungsfunktionen, 3. Aufl., Düsseldorf, VDI-Verlag 1984

/5/ Mevenkamp, P.; Krux P.: Sicherheitsfragen bei der Planung verfahrenstechnischer Anlagen; Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, 4. Auflage; Band 6 Umweltschutz

und Arbeitssicherheit; Verlag Chemie, Weinheim 1981

/6/ 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

/7/ Bönig, S.; Heimannsfeld, K.: Die KOMB-Analyse am Beispiel einer Niedertemperaturschwefelungsanlage; Institutsmittellung Nr. 23 (1998)

6 Anhang

- Tab. 2:** Auszug aus sicherheitstechn. Maßnahmenkatalog, Funktionsebene
- Tab. 3:** Auszug aus sicherheitstechn. Maßnahmenkatalog, Physikebene
- Tab. 4:** Auszug aus sicherheitstechn. Maßnahmenkatalog, Bauartebene

Sicherheitstechnischer Maßnahmenkatalog			Funktionsebene
Elementarfunktion: Stoff trennen			
Störungen	Ursachen	Maßnahmen	
S1 Stoff wird nicht o. nicht vollständig getrennt	U1 unzul. Wahl der Funktion	M 1 Suche nach alternativer Elementarfunktion	
		M 2 Überprüfung der Stellung und Schaltung der Elementarfunktion im System	
	U2 unzul. Stoffparameter	M 3 andere Elementarfunktion voranstellen	
		M 4 Fremdphasen vermeiden	
		M 5 Wahl eines sicheren Betriebspunktes in Abhängigkeit des Stoffes	
		M 6 extreme Betriebsbedingungen vermeiden	
	U3 unzul. Prozessparameter	M 7 schwierige Trennungen vermeiden, große Trennfaktoren anstreben	
M 8 grobe Körnung disperser Feststoffe bevorzugen			
M 9 fluide Phasen gegenüber festen Phasen bevorzugen			
U4 Fehlbedienung	M10 Anstreben eines hohen Automatisierungsgrades		
S2 Brand	U5 unzur. Stoffkenntnis	M11 ausreichende Bestimmung der Sicherheitskennwerte der Stoffe (wie Explosionsgrenzen, Flammpunkt, Brennbarkeit, exotherme Zersetzung)	
	U4 Fehlbedienung	M12 Betriebsanweisungen bei Abweichungen des bestimmungsgemäßen Betriebes (Löschmittel, Verhaltensregeln, etc.)	
	U6 Zusammentreffen Zündquelle, Sauerstoff u. brennbarer Stoff	M13 Prüfung der Notwendigkeit von Explosionsschutzmaßnahmen	

Tab. 2: Auszug aus sicherheitstechnischem Maßnahmenkatalog, Funktionsebene

Sicherheitstechnischer Maßnahmenkatalog			Physikebene
Grundoperation:		Klassieren	
Elementarfunktion: Stoff trennen			
Phasen: fest-gasförmig, fest-flüssig			
Störungen	Ursachen	Maßnahmen	
S1 Klassierung mit unerw. Ergebnis, schwankend	U1 unerw. Partikelgrößenvert. des Gutes	M 1 Dispergierung des Aufgabegutes	
		M 2 Optimierung des Zugabeortes des Aufgabegutes	
		M 3 Vorabscheidung erforderlich	
	U2 zu hohe Feuchtigkeit	M 4 Trocknung der Partikel vor Klassierung	
		M 5 Bei Umluftbetrieb: ausreichende Frischlufterneuerung	
U3 zu hohe Durchsätze	M 6 Nachsichtung, Parallelschaltung erforderlich		
U4 Verunreinigungen (Abrieb, Fremdstoffe)	M 3 Vorabscheidung erforderlich		
	M 7 Verschleißfeste Ausführung des Sichters		
S2 Brand	U5 Verunreinigungen	M 8 Brandschutzmaßnahmen	
		M 3 Vorabscheidung erforderlich	
	U6 Aufheizung der Sichtluft	M 5 Bei Umluftbetrieb: ausreichende Frischlufterneuerung	
S3 instabiles Betriebsverhalten (Verstopfung)	U7 Betriebsbedingungen wechselnd	M 9 Bypassschaltung bei An- und Abfahrvorgängen	

Tab. 3: Auszug aus sicherheitstechnischem Maßnahmenkatalog, Physikebene

Sicherheitstechnischer Maßnahmenkatalog			Bauebene
Bauart:		Abreinigungsfilter	
Grundoperation: filtrieren fest - gasförmig			
Elementarfunktion: Stoff trennen			
Störungen	Ursachen	Maßnahmen	
S1 instabiles Betriebsverhalten (Verstopfung)	U1 zu hohe Filterflächenbelastung	M 1 Schwankungen der Betriebsbedingungen bei Auslegung berücksichtigen	
	U2 Stoff nicht kontin. förderbar	M 2 Trocknen des Feststoffs in Filterkammer	
	U3 unzur. Abreinigung des Filtermediums	M 3 pneumatische Abreinigungsverfahren mechanischen bei problematischen Stoffen bevorzugen	
		M 4 Geometrie des Filtermediums hinsichtlich Stoffeigenschaften und Abreinigungsverfahren auswählen	
		M 5 Beschichtung des Filtermediums	
		M 6 bei Druckluftabreinigung: Impulsdauer u/o Stärke im Versuch optimieren	
S2 Stofffreisetzung aus Filterkammer	U4 Filtermedium ungeeignet	M 7 verschleißfestes Filtermedium wählen	
		M 8 schonendes Abreinigungsverfahren wählen	
		M 6 bei Druckluftabreinigung: Impulsdauer u/o Stärke im Versuch optimieren	
	U5 Montage fehlerhaft	M 9 reingasseitige Montage in Konstruktion vorsehen	
		M10 Durchströmungsrichtung vom Filterhersteller beachten	
	U6 Wartung fehlerhaft	M11 Wartungsintervalle Standzeiten des Filtermediums anpassen	
M12 kein Öffnung der Filterkammer während des Betriebes (Betriebsanweisung)			
M13 Schutzkleidung vorschreiben (Betriebsanweisung)			

Tab. 4: Auszug aus sicherheitstechnischem Maßnahmenkatalog, Bauteilebene

Untersuchungen zur Optimierung der Kläranlage Halle - Bruckdorf

Wilke, K.

In der Vergangenheit gab es immer wieder Probleme, die vom Regierungspräsidium Halle geforderten Überwachungswerte für die Kläranlage Halle-Bruckdorf einzuhalten. Im Rahmen meiner Diplomarbeit fand ich die Ursachen und gab Lösungsvorschläge.

In the past there have always been problems in achieving the correct results according to the limits given by the government of Halle / Germany in the purification plant Halle – Bruckdorf. In my examination I found out the reasons and gave several suggestions for a technical solution of these problems.

1 Problemstellung

Die Reinigungsleistung der Kläranlage war nicht zufriedenstellend. Die empfohlene CSB-Ablaufkonzentration von max. 70 % des Grenzwertes wurde langfristig überschritten. Vor allem die plötzliche Ausbildung einer Blähschlammschicht in der Nachklärung führte zu erhöhten CSB-Werten (CSB = Chemischer Sauerstoffbedarf). Die Reinigungsleistung sank hauptsächlich an den Wochenenden stark ab, so dass vermutet wurde, dass die Einleiter umwelt- und abwassergefährdende Stoffe entsorgen. Problematisch war auch die starke Schaumbildung auf der Oberfläche der Belebungsbecken, die dazu führte, dass ein Großteil der Mikroorganismen mit dem Schaum ausgetragen wurde.

2 Anlagenbeschreibung

Die Kläranlage Halle-Bruckdorf wurde zur Behandlung der Abwässer des Ortsteils und des Gewerbegebietes Bruckdorf errichtet. Es handelt sich bei der KA um eine Anlage mit mechanischer Vorreinigungsstufe (ohne Vorklärbecken) und Belebtschlammverfahren mit gemeinsamer aerober Schlammstabilisierung.

Das zulaufende Abwasser setzt sich aus den Abwässern der Betriebe des Gewerbegebietes zusammen. Kommunale Einleiter tragen unwesentlich zur Abwasserzusammensetzung bei. Die Anlage ist ausgelegt für 1250 Einwohner.

In **Bild 1** ist das Fließschema der Anlage dargestellt.

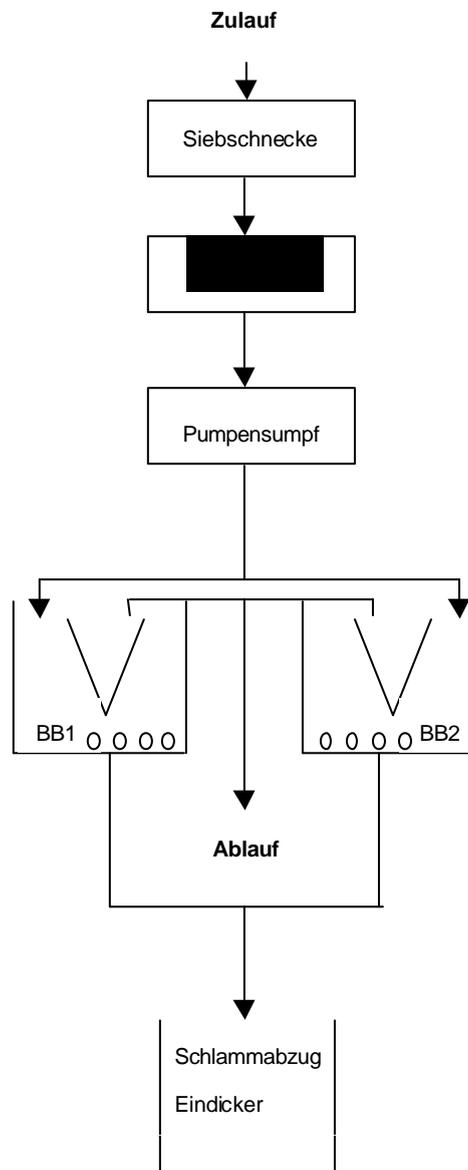


Bild 1: Fließschema der Kläranlage

Das Abwasser fließt in einem Zulaufschacht mit Grobfanggitter zu. Mittels der Siebschnecke mit integrierter Siebgutpresse werden die Schwimm- und Schwebstoffe sowie größere Sinkstoffe aus dem zulaufenden Abwasser entfernt, durch ein Steigrohr nach oben transportiert, entwässert und in einem Container gelagert. Das Presswasser fließt zu-

Die Schwankungen der Zulaufmengen waren vor allem von den Mikroorganismen in den Belebungsbecken schwer zu „verdauen“. Besonders die Mangelperioden an den Wochenenden, wenn das Einkaufszentrum geschlossen ist, führten zu einer starken Verminderung der Mikrobenpopulation, mit der Folge, dass bei Abwasserüberschuß an den Montagen, die Ein- und Vielzeller völlig überlastet waren und die Ablaufwerte der KA sich verschlechterten.

3.2 Sauerstoffversorgung

Besonders wichtig bei einer biologischen Kläranlage ist, dass in den Belebungsbecken genügend Sauerstoff gelöst ist. Als Richtwert dafür gelten 2 mg O₂/l. Sinkt der Sauerstoffgehalt über mehrere Stunden erheblich unter diesen Wert, wird das empfindliche Gleichgewicht der Mikrobenbevölkerung gestört und die Reinigungsleistung nimmt ab. In folgendem **Bild 5** sind die Sauerstoffgehalte der beiden Belebungsbecken über den Zeitraum von einem Tag dargestellt.

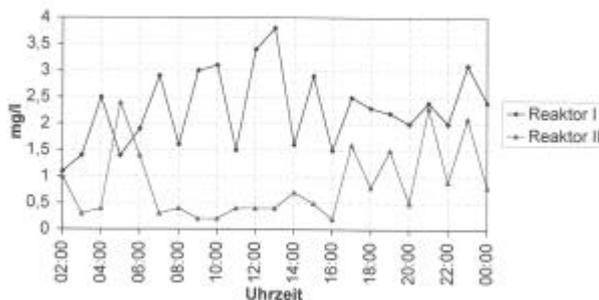


Bild 5: Tagesgang Sauerstoffgehalt der Bioreaktoren

Der Sauerstoffgehalt in den Belebungsbecken wurde über Sauerstoffmesssonden ermittelt. Die Regulierung des Sauerstoffeintrages erfolgte nur über den Gehalt in Reaktor I. Sank dort der Sauerstoffgehalt unter 2 mg/l so wurde vom Gebläse die Luft mit 100 % Leistung eingetragen. Bei Gehalten über 2 mg/l lief das Gebläse auf Halblast.

Diese Art der Regulierung läuft völlig unabhängig vom Sauerstoffgehalt im Reaktor II. Im schlimmsten Fall (siehe Bild 5) bekam der Reaktor II über Stunden nicht genug Luft ab, und die Mikroorganismen begannen abzusterben.

3.3 Einleiterwerte

Die für die Abwasserreinigung entscheidenden Kennwerte, wie pH-Wert, CSB- und BSB₅-Wert (BSB₅ = Biologischer Sauerstoffbedarf) sowie der Ammonium-Gehalt besaßen im Zulauf sehr hohe Werte (siehe z.B. **Bild 6**), aber nicht zu hoch, um auf illegale Schadstoffentsorgung zu schließen. Die problematische pH-Wert-Absenkung in den Belebungsbecken hing in erster Linie mit der Abnahme, der in jedem natürlichen Gewässer vorhandenen Säurekapazität zusammen.

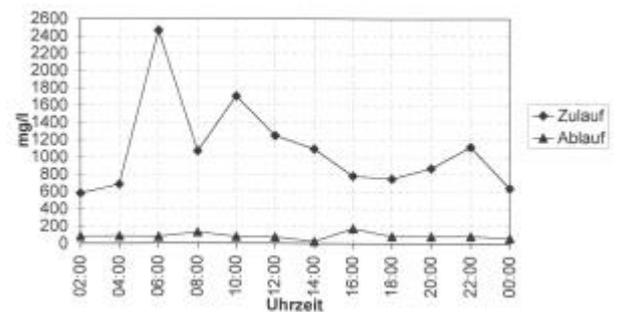


Bild 6: Tagesgang CSB-Wert

Kommunales Abwasser enthält Stickstoff in Form von Harnstoff und organisch gebundenen Stickstoff sowie einen kleinen Anteil Ammonium. Die Umsatzreaktionen des Ammoniaks durch Oxidation über Nitrit zu Nitrat sind die Ursachen für die pH-Wert-Absenkung in der Belebung und im Ablauf. Die Reaktionsgleichung lautet:



Hat das zulaufende Abwasser eine geringe Säurekapazität, so können die bei der Nitrifikation frei werdenden Wasserstoffionen nicht mehr gebunden werden und der pH-Wert sinkt. Wenn die Säurekapazität kleiner als 1,5 mmol/l wird, beginnen die Belebtschlammflocken zu zerfallen, und der Absetzvorgang in der Nachklärung wird behindert. Schwebstoffe setzen sich nicht ab und gelangen in den Ablauf, verbunden mit erhöhten CSB-Werten. Sinkt der pH-Wert infolge verminderten Säurebindungsvermögens weiter ab, so kann es in der Belebung zur schnellen Vermehrung von Pilzsporen kommen. Pilze bilden große fädige Kulturen und bevorzugen saures Milieu zum Wachsen. Diese können in der Nachklärung mit den anderen Fädenorganismen zur Blähschlamm-Bildung führen.

Die Untersuchung des Trinkwassers des Zuflussgebietes ergab, dass es sich bei dem Trinkwasser, und somit auch bei dem Abwasser, um sehr weiches Wasser mit weniger als 5°dH (im gesamten restlichen haleschen Gebiet liegt sie bei > 25°dH) handelte. Somit war die natürliche Säurekapazität dieses Wassers sehr gering und Hauptursache der ungenügenden Klärleistung der Anlage.

Die Einleiter waren somit entlastet.

Durch die Zugabe einer geeigneten chemischen Substanz kann man das Absinken des pH-Wertes vermindern oder auch verhindern.

4 Laborversuche zur Ermittlung der geeigneten Substanz und Menge

Es war leider nicht möglich, die Versuche in der Kläranlage durchzuführen, weil der Kostenfaktor dabei eine zu große Rolle spielte. So wurden z.B. die üblichen Kalkgaben weggelassen, um den ursprünglichen Klärablauf herzustellen. Dabei kippte die gesamte biologische Stufe innerhalb einer Woche um und die Anlage musste neu befüllt werden. Zusätzlich kam just in dem Moment das Staatliche Umweltamt Halle zur Kontrolle vorbei und stellte eine 1000-fache Grenzwertüberschreitung des CSB-Wertes im Ablauf fest (20000 DM,- Strafe). Daraufhin habe ich mir ein Kläranlagenmodell (siehe **Bild 7**) im Labormaßstab gebaut.

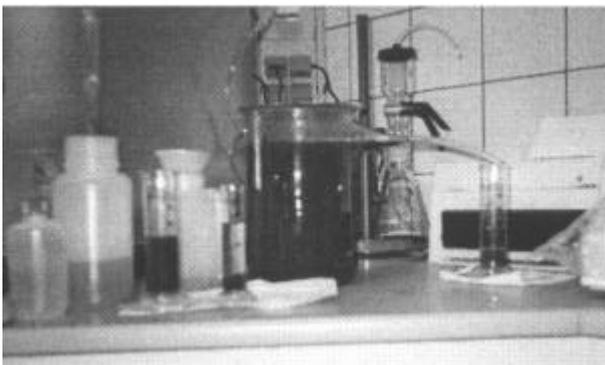


Bild 7: Fotografie der Laboranlage

Als chemische Mittel zur Erhöhung der Säurekapazität kamen zum einen eine Kalkmilchemulsion und zum anderen eine alkalisch gelöste Tonerde (Natal-10) zum Einsatz.

Anhand der im Abwasser befindlichen Ammoniumkonzentration konnte die erforderliche Zugabemen-

ge der chemischen Mittel genau berechnet werden. Es wurden 5 verschiedene Versuchsreihen durchgeführt. Eine ohne Zugabe von Kalk, 3 mit den Kalkkonzentrationen 87,5 mg/l, 175 mg/l und 250 mg/l und eine mit Natal-10.

Zu Beginn einer Versuchsreihe wurde Originalbelebtschlamm aus der Kläranlage entnommen. Eine Versuchsreihe erstreckte sich über 5 Tage. Dabei wurde jeden Morgen das Originalabwasser dem Zulauf der Kläranlage entnommen und der Laboranlage alle 15 min zugegeben, bis die durchschnittliche Tagesmenge erreicht wurde. Zusätzlich wurde die erforderliche Menge an chemischen Substanzen zugegeben. Danach wurden Proben genommen und analysiert. Besonders aufschlussreich war die Beobachtung der Mikroorganismen unter dem Mikroskop, weil sofort zu erkennen war, in welchem Zustand sich der Belebtschlamm befand.

4.1 Auswertung der Versuche

Die Ergebnisse der Versuche werden in den folgende Diagrammen zusammengefasst.

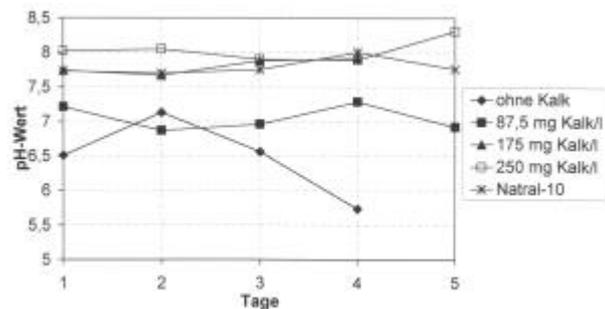


Bild 8: pH-Werte im Ablauf

Es ist deutlich zu erkennen, dass der pH-Wert der Versuchsreihe mit 87,5 mg Kalk/l annähernd konstant im Neutralbereich von pH = 7 liegt. Für den Versuch ohne Kalk ist nach 4 Tagen ein deutliches Absinken in den sauren Bereich zu erkennen. Die restlichen Versuchsreihen ergaben pH-Werte von 7,7 bis 8,2.

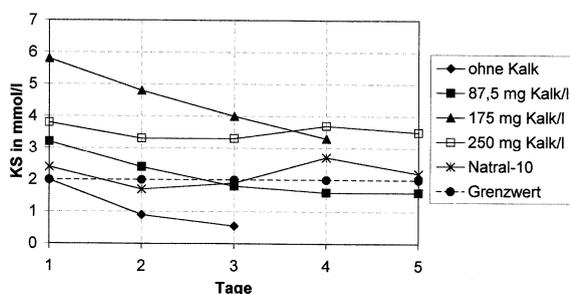


Bild 9: Abnahme der Säurekapazität in den Laborversuchen

Die Säurekapazität des Ablaufes der Versuche mit Zugabe von 175 und 250 mg Kalk/l liegt während der ganzen Versuchsreihe deutlich über $KS = 3 \text{ mmol/l}$ und somit im sicheren Bereich. Bei der Versuchsreihe mit Natral-10 liegt die Säurekapazität immer in der Nähe des Grenzwertes. Die Versuche mit wenig Kalk und ohne ergaben das erwartete Ergebnis, da hier die zugegebene OH^- -Ionenmenge nicht ausreichte, um die durch die Nitrifikation freigewordenen H^+ -Ionen zu binden.

5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Untersuchungen zur Optimierung der Kläranlage bezogen sich auf drei Teilgebiete:

- 1.) Begutachtung der Kläranlagentechnologie und der Betriebsweise.

Durch das tägliche Beobachten des Kläranlagenbetriebes konnten Fehlerquellen aufgedeckt werden. Auch die Auswertung der Online-Messungen gab Hinweise auf Probleme.

- 2.) Untersuchung des zufließenden Abwassers in bezug auf Menge und Belastung

Es wurde über einen großen Zeitraum (6 Monate) das zulaufende Abwasser analysiert. Dabei konnte den Indirekteinleitern kein Verstoß gegen das Wasserhaushaltsgesetz nachgewiesen werden. In größeren Abständen traten erhöhte Konzentrationen von schwerflüchtigen lipophilen Stoffen (Fette) auf, die zur Grenzwertüberschreitung führten. Verglich man die Daten mit dem Reinigungsprotokoll der Fettabscheider von Mc Donalds, so wurde klar, woher das Fett stammte.

Anhand der BSB_5 -Belastung des Zulaufes war erkennbar, dass die Anlage, mit den daraus errechneten Einwohnergleichwerten von 1500, deutlich überlastet ist.

Ein weiter Grund für die unzureichende Klärleistung der Anlage liegt in den Stoßbelastungen. Von Montag bis Samstag wird die Anlage überlastet und am Sonntag kommt viel zu wenig Abwasser an. Die Mikroorganismen in den Belebungsbecken können Stoßbelastungen nur schwer kompensieren, daher auch die Verschlechterung der Ablaufwerte.

- 3.) Chemische Versuche mit verschiedenen Neutralisationsmitteln

Im Labor wurden Versuchsreihen zur Prüfung der Wirksamkeit chemischer Zugabemittel in Bezug auf die Stabilisierung der Säurekapazität im Ablauf durchgeführt.

Im Folgenden werden die erkannten Probleme, welche zur ungenügenden Abwasserreinigung beigetragen haben, aufgeführt und Lösungsmöglichkeiten sowie Verbesserungsvorschläge gegeben.

1. Problem: Belebungsbecken werden ungleichmäßig mit Abwasser beschickt.

Lösung:

- 1.) Einsatz einer weiteren Pumpe, damit jeder Reaktor getrennt, aber mit der gleichen Abwassermenge versorgt wird.
- 2.) Steuerung der Zulaufmengen der Bioreaktoren durch den Einsatz von induktiven Durchflussmessern gekoppelt mit automatisch regelbaren Schiebern in jedem Zulaufrohr der Reaktoren.

2. Problem: Ungleichmäßige Sauerstoffversorgung der Bioreaktoren

Lösung:

Sauerstoffversorgung des Reaktors II von der Regelung über den Reaktor I entkoppeln. Die Messsonde von Reaktor II mit dem in der Kläranlage befindlichen Zusatzgebläse in Verbindung bringen und somit für jeden Reaktor eine separate Sauerstoffmess- und versorgungsstrecke gewährleisten.

3. Problem: Überlastung des Sand- und Schlammfanges

Lösung:

Sand- und Schlammfangrinne mehrmals wöchentlich reinigen und entleeren.

4. Problem: Abwassermangel am Wochenende

Lösung:

- 1.) Bau eines Vorratsbeckens mit 40 m³ Volumen, in dem für die abwasserarmen Tage das Abwasser gesammelt wird und dann zur Verfügung steht.
- 2.) Das Trübwasser aus dem Eindicker mit Anteilen von noch nicht abgesetzten Belebtschlamm als BSB₅ - Quelle nutzen.
- 3.) Instandsetzung und Nutzung der vorhandenen Bypass -Schaltung für die Wochenenden.

5. Problem: Hohe BSB₅-Schlammbelastung in den Belebungsbecken

Lösung:

Anhebung des TS-Wertes (TS = Trockensubstanzgehalt des Belebtschlammes) durch verminderten Abzug von Überschussschlamm. Damit sinkt die Belebtschlammbelastung, welche durch hohe BSB₅ - Tagesbelastung verursacht wird.

6. Problem: Verschlechterung der Ablaufwerte durch Absinken der Säurekapazität

Lösung:

- 1.) Einsatz von Kalkmilch zur Stabilisierung der Säurekapazität. Die chemischen Versuche ergaben eine optimale Kalkkonzentration im Bereich von 87,5 bis 175 mg/l.
- 2.) Einsatz des flüssigen Fällmittels Natral-10. Die chemischen Versuche ergaben eine Einsatzkonzentration von 70 µl/l.
- 3.) Die Zugabe der chemischen Mittel muss mittels Dosierpumpen erfolgen, damit eine konstante Versorgung über den ganzen Tag gewährleistet ist.
- 4.) Sobald die Trinkwasserversorgung des Einzugsgebietes der Kläranlage Halle – Bruckdorf mit Wasser des Wasserwerkes Halle gewährleistet ist, müssen die Mengen der chemischen Zugabesubstanzen verringert werden, da dann die Trinkwasserhärte höher ist und damit das Abwasser größere Säurekapazität besitzt. Es ist denkbar, dass dann völlig auf den Einsatz der Mittel verzichtet werden kann.

Literatur:

Wilke, K.: Untersuchungen zur Optimierung der Kläranlage Halle – Bruckdorf, Diplomarbeit, Institut für Thermische Verfahrenstechnik, TU Clausthal 1998

Jugend forscht am Institut für Maschinenwesen

Große, A.; Grünendick, T.

Zwei Forscherteams des "Jugend forscht"-Wettbewerbs haben ein Praktikum am Institut für Maschinenwesen gewonnen und konnten hier ihre Erfindungen "professionell" weiterentwickeln. Der folgende Beitrag soll den Wettbewerb "Jugend forscht" und die Ideen der Jungforscher vorstellen.

Two researcher teams have won within the contest "Jugend forscht" (similar to the american contest "Science Fairs") a practical training at the Institute for Mechanical Engineering where they could develop their inventions further. The following article deals with the contest "Jugend forscht" and the presentation of the ideas of the young researchers.

1 Einleitung

Für die Sieger des Wettbewerbs *Jugend forscht* werden Jahr für Jahr interessante Preise vergeben. Bei der diesjährigen Ausschreibung gab es u.a. 4-wöchige Forschungspraktika an der TU Clausthal zu gewinnen. Drei junge Forscher aus zwei Forschungsteams konnten ihren Gewinn am Institut für Maschinenwesen einlösen und ihre Erfindungen ganz wie die Ingenieure weiterentwickeln.

2 Der Wettbewerb *Jugend forscht* I/1

Im Jahre 1965 rief Henri Nannen, der damalige Chefredakteur und Herausgeber des STERN, den naturwissenschaftlichen/technischen Wettbewerb unter dem Motto "Wir suchen die Forscher von morgen" ins Leben. In den ersten zehn Jahren wurde *Jugend forscht* ausschließlich vom STERN finanziert. Seit 1975 ist der Wettbewerb ein gemeinsames Förderungswerk des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und des STERN. Rund 80 Patentfirmen finanzieren die Regional- und Landeswettbewerbe.

In 30 Wettbewerbsjahren haben sich insgesamt weit

mehr als 83.000 Mädchen und Jungen im Alter von 7 bis 21 Jahren beteiligt. Alle, die noch keine 16 Jahre alt sind, starten in der Juniorsparte *Schüler experimentieren*. Für die 16- bis 21-jährigen heißt der Wettbewerb *Jugend forscht*.

Die angemeldeten Teilnehmer werden zu einem der 58 Regionalwettbewerbe eingeladen. Die Besten gehen weiter zu den Landeswettbewerben. Die jeweiligen Landessieger der sieben Fachgebiete (z.B. Mathematik/Informatik, Technik, Arbeitswelt) aller 16 Bundesländer treffen sich danach um die fünf Erstplatzierten aller Fachgebiete zu ermitteln. Als Juroren sind bei den Wettbewerben Lehrer, Wissenschaftler und Fachleute aus der Industrie aktiv.

Neben Bar- und Sachpreisen gibt es interessante Reisen, Forschungspraktika und Studienaufenthalte zu gewinnen.

3 Forschungspraktikum am Institut für Maschinenwesen

Bei dem diesjährigen Wettbewerb zählten zu den Preisen u.a. Forschungspraktika an der TU Clausthal. Drei Jungforscher konnten in diesem Rahmen am Institut für Maschinenwesen die Umsetzung ihrer Erfindungen vorantreiben.

Der 16-jährige Christian Neugebauer aus Mön-



Bild 1: Entwickelte Versuchsbrennkammer während der Fertigung

chengladbach wird von folgender grundlegenden ingenieurmäßigen Frage getrieben: „Wie kann thermische Energie noch effizienter in Leistung einer Maschine gewandelt werden?“ Seine Idee, mit der er bei der Landesausscheidung *Jugend forscht* in Nordrhein-Westfalen gewann, erscheint zunächst bestechend einfach. Mit fein zerstäubten Wassertropfchen will er die hohe thermische Energie der Abgase eines Kolbenmotors (Kolbenverdichter - kontinuierlich brennende Brennkammer - Arbeitskolben) oder Triebwerks nutzen, um durch die Verdunstung des Wassers einen höheren Expansionsgrad der Abgase zu erreichen. Dieser so erzeugte überhitzte Wasserdampf wird dann dazu verwendet, um eine Arbeitsturbine oder einen Arbeitskolben anzutreiben. Damit würde die Abgaswärme noch genutzt, um mehr Motorleistung zu gewinnen. Zunächst analysierte er das Geschehen in der Brennkammer und modellierte mit grundlegenden thermodynamischen Gleichungen die wesentlichen Zusammenhänge, anschließend zeichnete er mit dem Zeichenprogramm Medusa eine Versuchsbrennkammer, die so dann in der Werkstatt des IMW angefertigt wurde, **Bild 1**.

Die beiden Schüler Stefan Flemming und Dominik Zander aus Berlin haben eine stufenlose Gangschaltung für Fahrräder, die aber auch für andere Anwendungen geeignet ist, entwickelt und gebaut. Der Schaltmechanismus wurde von den beiden Erfindern aufgrund der rein mechanischen Wirkungsweise *AnalogiX* genannt. Von diesem Schaltsystem und dem Forschungspraktikum wurde bereits in einem Artikel der Goslarschen Zeitung vom 17. August 1999 berichtet, **Bild 2**.

Das Forschungspraktikum haben die beiden

Jungforscher für die Erstellung von CAD-Zeichnungen des bestehenden Systems und für die Weiterentwicklung und überschlägige Dimensionierung von *AnalogiX II*, das eine veränderte Funktionsweise bzw. eine andere Kinematik aufweist, genutzt.

4 Die Erfindungen der Forscher

Im Folgenden sollen die beiden Erfindungen und deren Funktionsweise näher vorgestellt werden.

4.1 Wasser zur Leistungssteigerung von Triebwerken

Am Beispiel eines Strahltriebwerkes wird die Funktionsweise der Erfindung von Christian Neugebauer erläutert, **Bild 3**. Das Strahltriebwerk saugt Luft an. Beim anschließenden Durchströmen des Verdichters wird die Luft auf ein Vielfaches des Außenluftdruckes komprimiert. Aus dem Verdichter gelangt



Mit diesem Fahrrad ist ein stufenloses Schalten möglich. Dominik Zander und Stefan Flemming konnten bei Dipl.-Ing. Andreas Große im Institut für Maschinenwesen ihre Idee weiterentwickeln (v.l.) Foto: Brinkmann

Berliner Jungforscher zu Gast am Institut für Maschinenwesen

Von der Idee zur stabilen Umsetzung

CLAUSTHAL-ZELLERFELD. „Vier Wochen waren eigentlich zu kurz“, sind sich Dominik Zander und Stefan Flemming einig. Beim Berliner Landesausscheidung von „Jugend forscht“ gewannen sie ihr Forschungspraktikum an der TU Clausthal und waren mit ihrem neuartigen Fahrrad „AnalogiX“ für vier Wochen zu Gast im Institut für Maschinenwesen (IMW).

Bei Dipl.-Ing. Andreas Große hatten sie mit ihrem von der Bundesstif-

tung Umwelt geförderten Forschungspraktikum nun die Gelegenheit, ihre Idee zu konkretisieren. Der „Clou“ an ihrem Fahrrad ist der besondere Schaltmechanismus der Gangschaltung. Sie ist stufenlos regelbar; kein störendes „Klacken“, kein Verhaken der Kette mehr – wenn es denn einmal zuverlässig funktioniert. Dipl.-Ing. Andreas Große versorgte sie mit dem richtigen CAD-Programm und führte Berechnungen für die beiden durch,

so dass sie den wesentlichen Schritt im zukünftigen Ingenieurstudium – von der cleveren Idee zur stabilen Umsetzung der Idee in der Praxis – kennenlernten. Mit guter Unterstützung und in langen Konstruktionsnächten („einmal wurde es halb fünf“) ist ihr Projekt jetzt so weit gediehen, dass ein Clausthaler Maschinenbaustudent die Grundansätze ihrer Konstruktion in einer Studienarbeit weiterverfolgen wird. *tuc*

Bild 2: Artikel über *Jugend forscht* am IMW (Goslarsche Zeitung vom 17.8.99)

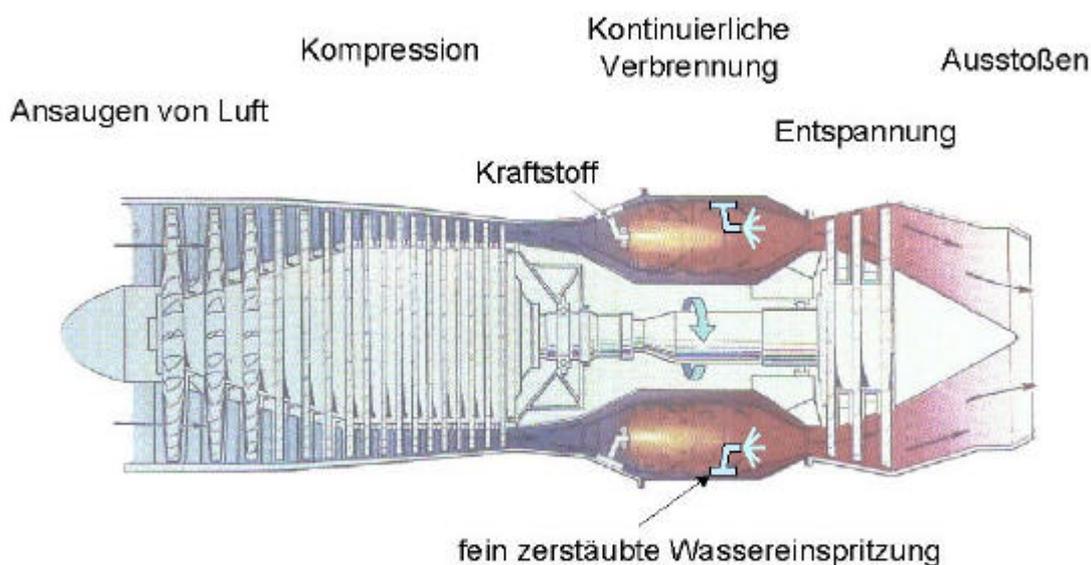


Bild 3: Prinzipskizze eines Strahltriebwerkes mit Wassereinspritzung /2/

die Luft in die Brennkammer und wird mit dem dort eingespritzten Brennstoff vermischt. Das entstandene Brennstoff-Luftgemisch wird dann kontinuierlich verbrannt. Hier erreichen die Verbrennungsgase ihre höchste Temperatur. Dem heißen komprimierten Gas (1500°C) werden dann fein zerstäubte Wassertröpfchen zugeführt, die verdunsten, anschließend überhitzten Wasserdampf bilden und bei abnehmender Temperatur dennoch zu einer starken Volumenzunahme führen. Dies führt bei verminderter Turbineneintrittstemperatur zur Leistungssteigerung des Triebwerks. Das überhitzte Wasserdampf-Gasgemisch schießt von der Brennkammer in die Turbine, treibt dieses an und liefert die Wellenleistung zum Antrieb des Verdichters. Anschließend wird der Gas-Wasserdampfstrahl in der Schubdüse beschleunigt, mit hoher Geschwindigkeit ausgestoßen und damit das Flugzeug angetrieben.

Natürlich würde ein Flugzeug durch das mitgeführte Wasser zu schwer werden, so daß die gewonnene Schubenergie doch wieder für den Mehrtransport des Wassers aufgewandt werden müßte. Mit zusätzlichen Turbinenstufen und Getrieben kann jedoch ein hoher Anteil der Energie in mechanische Leistung umgesetzt werden. So zählen z.B. Wellenleistungstriebwerke zu leistungsstarken Antriebsquellen von schnellen Schiffen, stationäre Gasturbinen für die Stromerzeugung oder zum Be-

treiben von Pumpen für Pipelines. Da für diese Anwendungen die Versorgung mit Wasser zu keinen Leistungseinbußen führt, wäre eine Leistungssteigerung durch das Einspritzen von Wasser durchaus sinnvoll.

4.2 *AnalogiX* - Die stufenlose Fahrradgangschaltung

Die beiden Forscher Stefan Flemming und Dominik Zander hatten die Idee für eine stufenlose Gangschaltung für Fahrräder, bei der es kein störendes Verhakeln oder Abspringen der Kette mehr geben sollte. Eine Bedingung war dabei die Umsetzung der Lösung auf rein mechanischem Wege, d.h. es sollten keine zusätzlichen elektronischen Bauteile erforderlich sein. Nach kinematischen Untersuchungen sind die Erfinder auf eine Prinziplösung gekommen, die auf der Verwendung von Freiläufen basiert. Freiläufe haben die Eigenschaft nur eine Drehrichtung zuzulassen. Damit kann in Sperrichtung die Kette mitgenommen und das Hinterrad angetrieben werden.

Anhand der Prinzipskizze in **Bild 4** soll die Funktionsweise von *AnalogiX*, der stufenlosen Gangschaltung für Fahrräder, erläutert werden. Die Tretkurbel ist wie an jedem beliebigen Fahrrad ausgeführt, allerdings geht die Kette nicht direkt an das Hinterrad, sondern an ein kleines Kettenrad, das

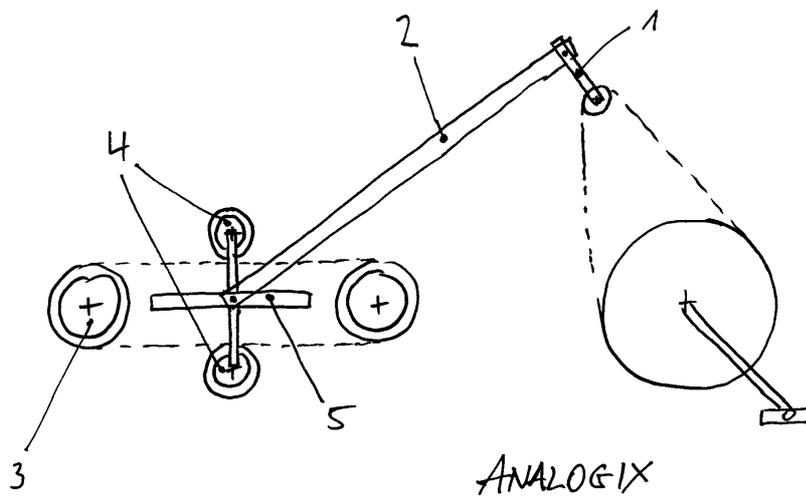


Bild 4: Prinzipskizze für stufenlose Gangschaltung *AnalogiX*

am Rahmen befestigt ist. Mit diesem Kettenrad ist eine Skalierstange (1) fest verbunden, die also mitrotiert. Über einen Bowdenzug kann die Verbindungsstange (2) auf der Skalierstange stufenlos eingestellt werden. Dadurch ergibt sich eine andere Amplitude an den hinteren Einheiten (4) und (5). Das linke Kettenrad (3) sitzt an dem Hinterrad und sorgt für den Antrieb. Die beiden Kettenräder oben und unten (4), die auf einer Linearführung (5) geführt werden, sind mit Freiläufen versehen und lassen somit nur eine Drehrichtung zu. Wie bereits oben beschrieben wird in Sperrichtung die Kette bewegt und das Hinterrad angetrieben.

Natürlich ist diese Konstruktion noch nicht serienreif, stellt aber mit Sicherheit eine interessante und weiterverfolgbare Idee dar.

Im Rahmen einer Studienarbeit am Institut für Maschinenwesen wird in Zusammenarbeit mit den beiden Forschern an einem neuen *AnalogiX* gearbeitet.

Neueste Informationen zu *AnalogiX* sind unter der Web-Seite www.analogix.mysite.de abrufbar.

5 Zusammenfassung

Der Artikel hat den Wettbewerb *Jugend forscht* sowie die Erfindungen zweier Forschungsteams, die beim diesjährigen Durchgang ein Praktikum am Institut für Maschinenwesen gewonnen haben, vorgestellt. Vielleicht wird demnächst die stufenlose Gangschaltung am Fahrrad serienmäßig sein oder die Wassereinspritzung bei Triebwerken zum Stand der Technik zählen.

6 Literatur

- /1/ N.N.: <http://www.jugend-forscht.de>, 1999
- /2/ N.N.: 50 Jahre Turbostrahlflug. MTU, München 1989

Entwicklung einer Backup und Recovery Strategie für die Oracle8-Infrastruktur des IMW

Düsing, C.; Jach-Reinke, H.-J.

Das Informationssystem eines Unternehmens stellt oftmals eine lebensnotwendige Struktur dar, auf deren Erhaltung und Instandhaltung ein sehr großer Wert gelegt werden muß. Der Aufbau und die Inhalte einer Backup und Recovery Strategie sollen hier am Beispiel einer bestehenden Oracle Infrastruktur aufgezeigt werden.

The information system often represents an essential part of a company, which must be maintained for a healthy existence. This article points at the development process and the contents of a Backup and Recovery strategy exemplified on an existing Oracle infrastructure.

1 Die Notwendigkeit eines Backup und Recovery

Am Institut für Maschinenwesen wurde am Beginn dieses Jahres eine Migration des vorhandenen Datenbanksystems auf die aktuelle Oracle 8.i Datenbank durchgeführt. Dieses Datenbankmanagementsystem wird zur Zeit in verschiedenen Projekten, wie z.B. SIMNET /1/ und KARE /2/ eingesetzt, der Einsatz in der Lehre ist geplant.

Es ist somit absolut notwendig, die Datenbank für die Benutzung bereitzuhalten. Bei Eintritt eines Fehlers soll die Datenbank so schnell wie möglich wieder betriebsbereit sein und keine oder nur sehr wenige Daten verloren gehen. Um die Daten vor verschiedenen Fehlern zu schützen, ist es wichtig, regelmäßige Backups der Datenbank durchzuführen, denn diese bilden die Grundlage für ein entsprechendes Recovery der Daten.

Die Entwicklung eines solchen Strategiekonzeptes soll am Beispiel der Oracle Infrastruktur des IMW erläutert werden.

1.1 Datenbankverwaltungsziele bei Backup und Recovery

Die Anforderungen einer Sicherungsstrategie lassen sich generell in vier Zielstellungen einteilen /3/:

- Schutz der Datenbank vor möglichen Fehlern
- Erhöhung der Mean-Time-Between-Failure (MTBF)

- Reduzierung der Mean-Time-To-Recover (MTTR)
- Minimierung des Datenverlustes

Diese allgemeinen Erwartungen an ein Datenbankmanagementsystem, wie z. B. möglichst hohe Verfügbarkeit oder Ausschluß eines Datenverlustes müssen in der Regel jeweils der speziellen Situation angepaßt werden.

1.2 Definition einer Backup und Recovery Strategie

Um ein Sicherungskonzept in eine bestimmte Unternehmensstruktur einfügen zu können, werden die Anforderungen an dieses in drei Bereiche eingeteilt, welche die Backupstrategie definieren:

- Geschäftsanforderungen
- Operationale Anforderungen
- Technische Anforderungen

Die Auswirkungen der Ausfallzeit auf die Geschäftsabläufe können erheblich sein. Die Kosten einer eventuellen Ausfallzeit und der Datenverluste müssen quantifiziert werden und mit den Kosten verglichen werden, die durch die Minimierung der Ausfallzeit und die Minimierung der Datenverluste entstehen.

Die Art des Backup und Recovery sind stark vom Typ der operationalen Anforderungen abhängig. Die richtige Konfiguration der Datenbank ist Voraussetzung dafür, daß eine Datenbank z. B. rund um die Uhr, sieben Tage die Woche verfügbar ist. Diese Aspekte sind direkt mit den technischen Ansprüchen verknüpft.

Die technischen Anforderungen stellen die Basis für die Entwicklung einer Backup und Recovery Strategie dar. Generell gilt, daß genügend Systemressourcen für ein Backup zur Verfügung gestellt werden müssen, so daß die Performance der Datenbankanwendung nur geringfügig beeinflusst wird. So muß z. B. für physikalische und logische Kopien der Daten genügend Speicherplatz vorhanden sein. Da beide Arten jedoch die Systemleistung unterschiedlich beeinflussen, ist es im Einzelfall abzu-

wägen, welche Art der Kopien und in welchem Umfang diese benutzt werden können.

Durch eine gründliche Analyse dieser Anforderungen werden die Informationen gesammelt, die zur Einrichtung eines Backup Konzeptes erforderlich sind.

1.3 Test einer Backup und Recovery Strategie

Die einzige Möglichkeit sicherzustellen, daß die geplante Strategie die MTTR reduziert und die MTBF erhöht, ist ein regelmäßiger Test der Backups in Bezug auf Gültigkeit und Funktionalität. Das Recovery einer Datenbank kann nur so gut wie die verfügbaren Backups sein. Dies bedeutet, daß bei jeder strukturellen Veränderung der Datenbank der Backupplan den neuen Anforderungen angepaßt und erneut getestet werden muß. Dieses sind die Minimalanforderungen für die Testhäufigkeit einer Datenbank. Bei starken Veränderungen der Transaktionslast in der Datenbank sollten auf jeden Fall in regelmäßigen Abstände zusätzliche Tests durchgeführt werden.

2 Gesamtübersicht über das Backup-Schema

Ein Backup und Recovery Schema setzt sich aus insgesamt drei Teilen zusammen (siehe **Bild 1**) /4/ :

- BACKUP
- RESTORE
- RECOVERY

2.1 Backup

Das BACKUP kann in ein physisches und ein logisches Backup unterteilt werden.

Das physische Backup entspricht einer Kopie von den Betriebssystemdateien, welche die Datenbankstruktur repräsentieren, das logische Backup entspricht einem Export von Teilen oder der gesamten Datenbank aus dem Datenbankmanagementsystem heraus. Ein physisches Backup kann sowohl „offline“, d. h. bei heruntergefahrener Datenbank, als auch „online“, also während des laufenden Betriebes, durchgeführt werden.

2.2 Restore

Unter dem Begriff RESTORE versteht man in diesem Zusammenhang die Wiederherstellung von einer oder mehrerer defekter Datendateien einer Datenbank. Das logische Restore ist gleichbedeutend mit einem Import von vorher ausgelagerten Daten. Das physische Restore kann in vollständig und unvollständig unterteilt werden. Die Begriffe vollständig und unvollständig sind im Zusammenhang auf die Vollständigkeit der Daten zu interpretieren. Beim vollständigen Restore wird nur die defekte Datei durch ihre Sicherung ersetzt, wohingegen bei einem unvollständigen Restore alle Datendateien durch ihre Sicherung ersetzt werden. Unvollständig bedeutet hier, daß absolut ein Datenverlust eintritt, da alle, auch aktuellen, Datendateien durch ältere Kopien ersetzt werden.

2.3 Recovery

Das RECOVERY wird immer dann verwendet, wenn kein Restore möglich, oder z. B. Datenverlust inakzeptabel und nur durch eine Recoveryprozedur wiederherstellbar ist.

Für den Fall, daß alle Datendateien der Datenbank physisch noch vorhanden sind, kann ein sogenanntes Instance Recovery durchgeführt werden.

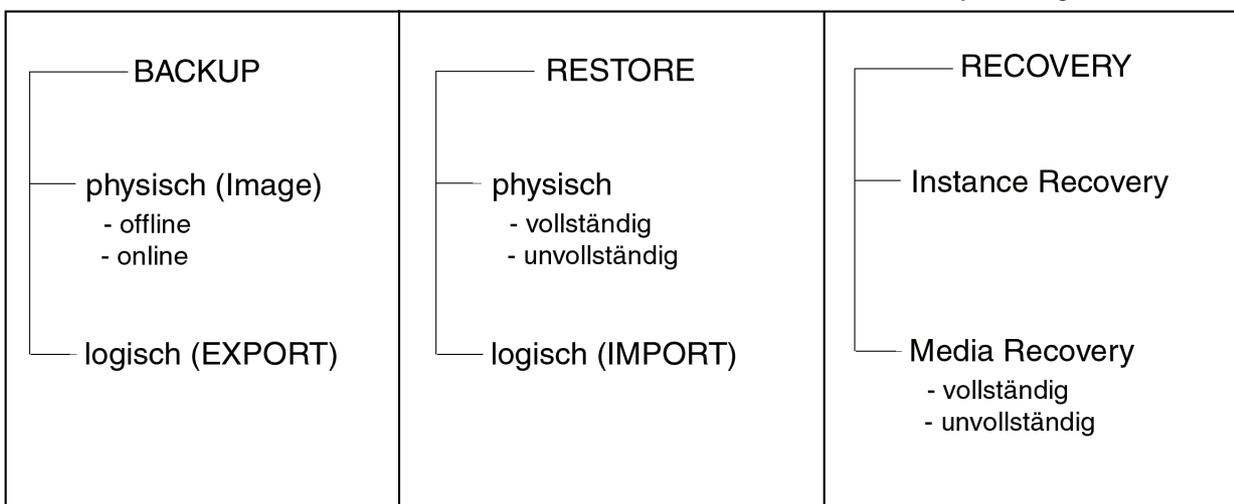


Bild 1: Drei Module eines Oracle Backup Schemas

Dies tritt z. B. bei einem Stromausfall oder bei Fehlern in der Software ein. Ein Instance Recovery wird beim erneuten Starten der Datenbank automatisch durchgeführt, d. h. es ist keine spezielle Aktion durch den Administrator erforderlich.

Bei dem Verlust oder Beschädigung einer Festplatte oder Datendatei muß ein sogenanntes „Media – Recovery“ durchgeführt werden.

Bei einem Verlust von Datendateien oder den sogenannten Kontrolldateien ist ein vollständiges Recovery möglich.

Die Kontrolldateien enthalten alle Informationen, die zur Sicherstellung der Datenbankintegrität benötigt werden. Eine Voraussetzung für ein vollständiges Recovery in diesem Sinne ist, daß ein gültiges Backup und alle archivierten Redo-Log-Dateien seit dem Zeitpunkt dieses Backups existieren. Die Redo-Log-Dateien enthalten einen Datensatz mit den an der Datenbank vorgenommenen Veränderungen. Diese Veränderungen an der Datenbank können somit nach Einspielen der letzten gültigen Sicherung bis zum Zeitpunkt des Absturzes der Datenbank wieder vollzogen werden. Somit entsteht bei dieser Methode kein Datenverlust.

Sollte der Verlust oder die Beschädigung einer aktiven Redo-Log-Datei eintreten, ist nur noch ein unvollständiges Recovery möglich. Dies bedeutet, daß nur noch Daten bis zu dem Zeitpunkt der zuletzt aktiven Redo-Log-Datei, welche die Veränderungen an den Daten enthält, zurückgeholt werden können. Somit entsteht in diesem Fall immer ein Datenverlust.

3 Definition der Anforderungen des IMW

Die Anforderungen des Instituts für Maschinenwesen an die Verfügbarkeit des Oracle Servers und die Backup und Recovery Strategie basieren auf der Tatsache, daß es sich überwiegend um ein System handelt, auf dem Prototypen für Projekte entwickelt werden.

Daraus ergeben sich zusammengefaßt folgende geschäftliche, technische und operationale Anforderungen:

- Die MTBF soll soweit wie möglich erhöht und die MTTR reduziert werden, um bei einem Ausfall den Arbeitsprozeß nicht unnötig lange aufzuhalten.
- Es soll kein Datenverlust auftreten.

- Da die Transaktionslast der Anwendungen auf dem Server stark schwanken kann, soll die Strategie so flexibel wie möglich sein, damit notwendige Änderungen schnell und ohne Beeinflussung des normalen Betriebes durchgeführt werden können.
- Die Datenbank soll innerhalb der Woche im 24-Stunden Betrieb laufen, so daß längere Transaktionen auch während der Nacht bearbeitet werden können. An Wochenenden besteht die Möglichkeit den Server für bis zu zwei Stunden in der Nacht aus dem Betrieb zu nehmen.
- Die Backup und Recovery Strategie soll in regelmäßigen Abständen getestet werden.
- Backup Kopien sollen dezentral aufbewahrt werden.
- Der Backup-Plan sollte gut dokumentiert und gepflegt sein.
- Es sollen redundante physikalische Kopien der Datendateien auf dem System verfügbar sein.
- Die Datenbank soll so konfiguriert sein, daß sie gegen bestimmte Fehler immun ist.

4 Kurzbeschreibung des Oracle-Servers am IMW

Als Grundlage für die Backup und Recovery Strategie soll an dieser Stelle kurz der Oracle8-Server des Instituts für Maschinenwesen und dessen Architektur vorgestellt werden, **Bild 2**.



Bild 2: Oracle Server des IMW, rechts daneben: Externes SCSI Gehäuse mit drei weiteren Festplatten

Der Server basiert auf einer PC-Architektur mit einem 400 MHz Intel Prozessor und 256 MB Arbeitsspeicher.

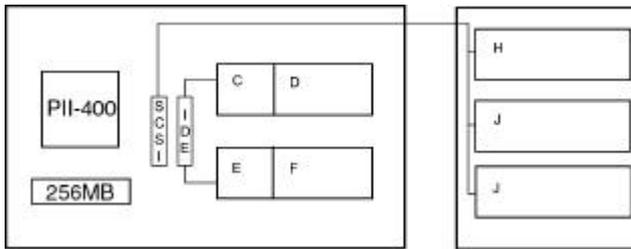


Bild 3: Struktur des Oracle-Servers des IMW

Diese Ressourcen sind für das derzeitige Transaktionsvolumen vollkommen ausreichend. Das System ist jedoch so ausgelegt, daß eine Vergrößerung der Systemressourcen bei Bedarf jederzeit möglich ist. Als Datenspeichermedien werden für die Datenbank aus Performancegründen nur Festplatten eingesetzt /5/. In dem 19“-Gehäuse sind intern zwei identische Festplatten an den IDE-Bus angeschlossen, in einem externen Gehäuse befinden sich drei weitere, ebenfalls gleich große Festplatten, welche über einen externen SCSI-Anschluß angesprochen werden, **Bild 3**. Durch die Verwendung verschiedener Bussysteme wird die anfallende I/O - Last auf verschiedene Kanäle verteilt, damit es nicht zu Leistungseinbrüchen kommt. Diesen physischen Laufwerken sind sechs logische Laufwerke (C – J) zugewiesen.

5 Struktur des Backup

Um eine strukturelle Beschreibung des Backup zu geben, werden einige wichtige Zusatzinformationen über die Architektur des Datenbankmanagementsystems Oracle benötigt. Im folgenden Abschnitt werden die für die Erläuterung wichtigen Datenstrukturen kurz zusammengefaßt vorgestellt.

5.1 Datenstrukturen der Oracle Architektur

Die Oracle Datenbank repräsentiert die physikalischen Strukturen und besteht aus Betriebssystemdateien, den sogenannten Datenbank-Dateien, **Bild 4**.

Innerhalb der eigentlichen Datenbank existieren drei Arten von Dateien, die für das Backup von Bedeutung sind:

- Die *Kontrolldateien* enthalten Informationen, die zur Erhaltung und Prüfung der Datenbankintegrität benötigt werden. Eine Datenbank benötigt mindestens eine Kontrolldatei.
- Die *Redo Log Dateien* enthalten einen Datensatz mit den an der Datenbank vorgenommenen Änderungen. Dadurch können die Daten

bei Fehlern wiederhergestellt werden. Für die Erhaltung der Funktionalität der Datenbank werden immer mindestens zwei dieser Dateien benötigt, da es sich hierbei um einen zyklischen Buffer handelt, d. h. die Dateien werden immer wieder beschrieben. Ist die eine Datei voll, werden die Änderungen in der nächsten festgehalten, bis diese wiederum voll ist, und die erste wieder beschrieben wird.

- In den *Datendateien* werden die eigentlichen Objekte der Benutzer einer Datenbank festgehalten, wie z. B. die Tabellen und Relationen mit zugehörigen Definitionen sowie Namen, Paßwörter und Privilegien.

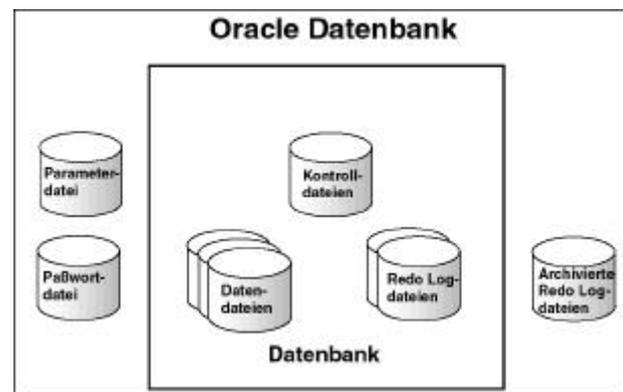


Bild 4: Betriebssystemdateien einer Oracle Datenbank

Außerhalb dieses Bereiches der Datenbank existieren weitere Betriebssystemdateien, welche unter anderem für die Datenbankintegrität und den laufenden Betrieb von Bedeutung sind:

- In der *Parameterdatei* befinden sich alle für den Betrieb der Datenbank wichtigen Parameter. Beim Hochfahren der Datenbank wird diese Datei eingelesen und ihr Inhalt verarbeitet. Ohne diese Datei kann eine Datenbank nicht wieder hochgefahren werden.
- Die *Paßwortdatei* beinhaltet alle Informationen, welche einem Benutzer zugeordnet werden, um sich bei der Datenbank authentifizieren zu können.
- Die sogenannten *archivierten Redo Log-Dateien* werden angelegt, wenn die Datenbank im ARCHIVE-Modus betrieben wird. Im ARCHIVE-Modus wird von den Redo Log-Dateien, bevor sie überschrieben werden, eine Sicherungskopie gemacht, die archivierte Redo Log-Datei, mit deren Hilfe auch länger zurückliegende Veränderungen an der Datenbank wieder zurückgerollt werden können.

5.2 Aufbau der Backupstrategie im IMW

Die Struktur des Backup am Oracle8-Server des IMW lässt sich im allgemeinen in drei Bereiche aufteilen:

1. Spiegelung von Dateien, die für den Betrieb der Datenbank unmittelbar von Bedeutung sind.
2. Betreiben der Datenbank im ARCHIVE-Modus.
3. Regelmäßiges Backup der gesamten Datenbank.
4. Spiegelung der Backupdateien auf dezentralen Medien.

Das sogenannte Spiegeln von Dateien stellt die bevorzugte Methode dar, um die Ausfallsicherheit zu erhöhen und die Notwendigkeit eines Recovery zu reduzieren, indem man bei laufender Datenbank ein Restore durchführen kann. Im laufenden Betrieb werden die gerade verwendeten Datenbankdateien auf mehreren Speichermedien gesichert. Fällt dann eine dieser Dateien zum Beispiel aufgrund eines Hardwarefehlers aus, so kann die Datenbank weiter betrieben und die Fehlerquelle währenddessen beseitigt werden. In diesem Fall handelt es sich bei den gespiegelten Datenbankdateien um die Kontrolldateien (CTRLn) und die Redo Log-Dateien (RLGn). Die Kontrolldateien werden hier auf drei und die Redo Log-Dateien auf zwei unabhängigen Festplatten gespeichert, um beim Ausfall einer Festplatte auf laufende Platten noch zugreifen zu können, **Bild 5**.

Die vorliegende Datenbank wurde so konfiguriert, daß die Redo Log-Dateien archiviert werden. Um ein erfolgreiches Recovery durchführen zu können, werden immer ein komplettes Backup der Datenbank sowie alle Redo Log-Dateien seit dem Zeitpunkt des letzten Backups benötigt. Wäre dies nicht der Fall, so könnte nur ein unvollständiges Recovery durchgeführt werden, was immer mit dem Verlust von Daten verbunden wäre. Durch den ARCHIVE-Modus der Datenbank werden immer alle Redo Log-Dateien archiviert, so daß bis zum Zeitpunkt des letzten gültigen Backups immer alle benötigten Redo Log-Dateien zur Verfügung stehen. Diese Archivdateien (ARCHn) werden auf zwei verschiedenen Festplatten gespiegelt um hier ebenfalls das Ausfallrisiko zu verringern und im Notfall eine zweite Kopie vorliegen zu haben. Wie in **Bild 5** zu erkennen ist, werden die Archive und die eigentlichen Redo Log-Dateien, sowie ihre Spiegelungen auf verschiedenen physikalischen Festplatten gespeichert.

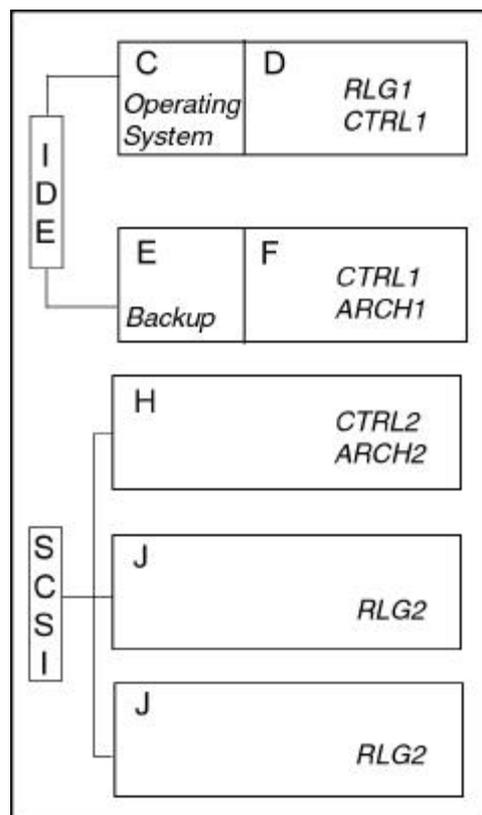


Bild 5: Verteilung der Betriebssystemdateien auf physisch unterschiedliche Laufwerke

Der Grund dafür liegt darin, daß für beide Prozesse eine hohe I/O-Last anfällt, welche so auf verschiedene Festplatten und Bussysteme verteilt werden kann, so daß es nicht zu gravierenden Einbrüchen in der Performance kommt.

Das Backup einer Oracle Datenbank bedeutet, daß Kopien aller Betriebssystemdateien angefertigt werden. Dieses kann generell auf zwei verschiedene Arten geschehen.

- Offline Backup: Die Datenbank wird heruntergefahren und die Kopie der Betriebssystemdateien wird angefertigt. Dies hat den Nachteil, daß die Datenbank heruntergefahren werden muß und somit während dieser Zeit kein Arbeiten an der Datenbank möglich ist.
- Online Backup: Während die Datenbank geöffnet ist, werden die Betriebssystemdateien kopiert. Dies bedingt, daß die Tablespace einzeln in einen sogenannten Backup Modus gesetzt, kopiert und anschließend wieder in den normalen Modus gesetzt werden müssen, so daß die Konsistenz der Datenbank gewahrt bleibt. Dadurch dauert dieses Verfahren wesentlich länger als bei einem Offline Backup und die gesamte Performance der Datenbank sinkt in dieser Zeit stark ab.

In der Oracle-Infrastruktur des IMW werden beide Methoden verwendet. Die Durchführung des Backup wird jeweils von Skripten durchgeführt, die zu diesem Zweck programmiert worden sind. Diese werden nach einem Zeitplan ausgeführt, so daß kein Eingreifen von außen mehr erforderlich ist. Das Offline Backup wird jeden ersten eines Monats um 01:00 Uhr durchgeführt, das Online Backup jeden Samstag um 22:00 Uhr, somit also zu den Zeiten an denen die wenigsten Zugriffe auf die Datenbank zu verzeichnen sind. Die Betriebssystemdateien, welche die Datenbank repräsentieren, werden auf dem logischen Laufwerk E gesichert.

Die so gesicherten Backupdateien werden anschließend auf den zentralen Fileserver des IMW gespeichert, so daß zwei voneinander unabhängige Kopien existieren. Diese werden innerhalb der Nacht vom zentralen Backup des Rechenzentrums erfaßt und gesichert, so daß immer ein dezentrales Backup vorhanden ist. Dies bedeutet, daß bei dem schlimmsten der anzunehmenden Fälle, dem totalen Zusammenbruch des Oracle-Servers und des Fileservers immer noch eine Kopie außerhalb des Institutes vorliegt, welche bei Bedarf zurückgewonnen werden kann.

Das Backup und Recovery des IMW wurde bis zur endgültigen Fassung der Strategie mehrmals getestet und verifiziert. Bei dem heutigen Stand ist es nur noch nach Veränderungen der Datenbankstruktur nötig, die Strategie entsprechend anzupassen und wieder zu testen.

Das bestehende Konzept entspricht nun allen in Kapitel 3 aufgezählten geschäftlichen, operationalen und technischen Anforderungen des IMW. Größere Veränderungen der Strategie sind nur noch bei beträchtlichen Modifikationen des Servers oder der Datenbank z. B. infolge stark erhöhter Transaktionslast nötig.

6 Zusammenfassung

Am Beispiel der bestehenden Oracle Infrastruktur des IMW konnte die Planung, Entwurf und Aufbau einer Backup und Recovery Strategie für das Datenbankmanagementsystem Oracle aufgezeigt werden. Ein solches Backup ist für jedes Unternehmen, das produktiv mit einem solchen System arbeitet, unerlässlich. Eine entsprechende Strategie muß den speziellen Strukturen eines Unternehmens, basierend auf den Kenntnissen über die geschäftlichen, operationalen und technischen Anforderungen, angepaßt werden. Der Aufbau und Test

einer den speziellen Erwartungen entsprechenden Strategie ist zumeist ein langwieriger, iterativer Prozeß. Selbst nach der Fertigstellung und Inbetriebnahme ist in der Regel noch eine regelmäßige Wartung und Validierung nötig.

7 Literatur

- /1/ Goltz, M.; Schmitt, R.: SIMNET – Workflow Management for Simultaneous Engineering Networks; IMW Institutsmitteilung Nr. 23; Clausthal 1998
- /2/ Heimannsfeld, K.; Judith, M.: KARE – Knowledge Acquisition and Sharing for Requirement Engineering; IMW Institutsmitteilung Nr. 23; Clausthal 1998
- /3/ Oracle Education; Oracle 8 Datenbankadministration: Backup & Recovery; Oracle Press, München, 1999
- /4/ Velpuri, V.; Adkoli, A.: Oracle 8 Backup & Recovery Handbook; Osborne/McGraw-Hill; Berkeley; 1998
- /5/ Gurry, M.; Corrigan, P.: Oracle Performance Tuning; O'Reilly and Associates; Cambridge; 1996

Exkursionen des IMW nach Hamburg und München

Judith, M. ; Klemp, E.

In Ergänzung zum Lehrangebot bietet das IMW jedes Jahr den Studenten die Möglichkeit, an Industrieexkursionen teilzunehmen und damit Einblicke in die Praxis zu erlangen. In diesem Jahr wurden aufgrund der großen Attraktivität, der hohen Nachfrage der Studenten und der Bereitschaft der Industrie zwei Exkursionen durchgeführt - im Frühjahr nach Hamburg und im Herbst nach München. Bei den besichtigten Firmen handelte es sich nicht nur um große namhafte wie DASA und MTU auch kleinere Unternehmen verstanden es, den Besuchern einen interessanten Einblick in ihre Arbeit zu geben.

Visits of industrial companies are important for students in order to gain knowledge about industrial requirements and practical work. In order to follow these demands, 2 excursions have been organised by IMW in 1999 – one to Hamburg in spring and another one to Munich in autumn. The companies being visited were as well known as DASA and MTU, but also small companies were able to give an interesting view of their business.

1 Einleitung

Für Studenten und angehende Ingenieure ist es sehr wichtig - neben den Lehrveranstaltungen an der Universität, die in erster Linie auf die Vermittlung von Fachwissen ausgerichtet sind - einen umfangreichen Einblick in die spätere Arbeitswelt zu gewinnen. Dazu bieten Exkursionen eine geeignete Möglichkeit hinter die Fabrikttore zu blicken und mit unterschiedlichen Personen aus den verschiedenen Bereichen Management, Technik und Personalwesen zu diskutieren. In Rahmen der vom IMW organisierten Exkursionen (Vielen Dank an Herrn Grünendick!), konnte durch ein straff organisiertes Programm dieses Ziel erreicht und eine große Anzahl von Firmen besichtigt werden.

2 Exkursion nach Hamburg im März

Das Werk in Hamburg- Finkenwerder der Daimler-Chrysler Aerospace Airbus ist die erste Station der Besichtigungsreihe. Mit etwa 5.800 Mitarbeitern stellt Hamburg den größten deutschen Standort, an

dem Verkehrsflugtechnik betrieben wird, dar. Neben dem Sitz der Geschäftsführung der Daimler-Chrysler Aerospace Airbus GmbH befindet sich dort auch ein Teil der Fertigung und der Endmontage für die Single-Aisle-Flugzeuge (Flugzeuge mit nur einem Gang in der Mitte) A319 und A321. Auch die Rumpfmontage aller Flugzeuge des Airbus Industrie Konsortiums und deren Ausrüstung mit sämtlichen flugwichtigen Systemen wie Elektrik, Elektronik, Hydraulik, Klimaanlage und Wasserversorgung ist Arbeitsschwerpunkt in Hamburg. Desweiteren ist hier Sitz des Entwicklungs- und Konstruktionsbereichs des Airbus- Konsortiums, zusätzlich sind an diesem Unternehmensstandort aber auch umfangreiche Testeinrichtungen installiert, mit denen unter anderem statische und dynamische Versuche vorgenommen werden können.

Seit 1992 werden in Hamburg Airbus- Flugzeuge vom Typ A321 gefertigt und montiert – so daß schon über 200 Stück an Kunden in der ganzen Welt ausgeliefert worden sind. Ergänzend zu den großen Maschinen, wird seit 1995 außerdem das kleinste Mitglied der Airbus- Familie, der A319, in Hamburg hergestellt. Dieses Flugzeug ist hat eine besondere Bedeutung, denn mit ihm werden erstmals nach der Beschränkung durch die Alliierten des 2. Weltkriegs wieder Passagierflugzeuge in Deutschland komplett zusammengebaut und an die Kunden ausgeliefert.

Neuentwicklungen werden in den eigenen Versuchshallen der DASA getestet. Zur Zeit ist hier und im dazugehörenden Virtual-Reality-Labor das Engineering Mock-Up (EMU, 1:1-Modell) des geplanten A3XX (Megaliners) zu sehen. Im Versuch am EMU des Megaliners werden Studien zu verschiedenen Möglichkeiten der Bestuhlung, zu Gepäckablagen, Aufzügen, Kücheneinrichtungen (insbesondere Speisenerwärmung und Müllentsorgung), Erste Hilfe Bereiche, Unterbringung von Behinderten und Rettungsmöglichkeiten (Notrutschen o. ä.) durchgeführt. Für heutige Verhältnisse eindrucksvoll sind die technischen Daten des Megaliners, denn das Großraumverkehrsflugzeug A3XX soll mit mehr als 500 Sitzen ausgestattet sein, wobei die Länge und Spannweite jeweils etwa 80

Meter betragen. Das Flugzeug hat eine geplante Reisefluggeschwindigkeit von 0,85 Mach.

Zur Unterstützung ist ein VR-Labor (Virtual Reality) eingerichtet, in dem dem Besucher schon sehr früh ein plastischer und realitätsnaher Eindruck vom Flugzeug und vom Passagierraum dargestellt werden kann, ohne daß das Flugzeug bereits als reales Modell zur Verfügung steht.

Im Axel Springer Druckzentrum in Ahrensburg werden eine Reihe bekannter Printmedien wie Die Welt, Bild, Auto Bild, Computer Bild, etc., sowie Auftragsdrucke, z.B. Versandhauskataloge und Werbebroschüren, hergestellt. Dazu werden im wesentlichen die beiden Verfahren Tiefdruck und Offsetdruck verwendet.

Für den Produktionsbereich von Tageszeitungen (sie werden im Offsetverfahren hergestellt) ist Aktualität die wichtigste Vorgabe. Dazu werden die druckfertig aufbereiten Zeitungsseiten per Standleitung oder Richtfunkstrecke aus der City in Hamburg, dem Sitz der Redaktion, die für Inhalt und Layout zuständig ist, an das Druckzentrum Ahrensburg übertragen. Im Druckzentrum werden dann die für den Offsetdruck verwendeten Platten in einer Gelblicht-Dunkelkammer belichtet, wobei für jede der drei Grundfarben sowie für Schwarz eine eigene Platte erstellt wird. Diese Farbtrennung, die eine Anordnung von verschiedenen Druckwalzen mit sich bringt, sowie die hohe Durchlaufgeschwindigkeit des Papiers, stellen hohe regelungstechnische Ansprüche an die Druckstraßen. Dies zeigte sich u.a. beim automatischen Wechsel der Papierrolle, bei dem ohne Verringerung der Geschwindigkeit der Anfang der nachfolgenden Rolle mittels eines Klebestreifens auf die laufende Papierbahn aufgebracht wird, wobei gleichzeitig die alte Papierbahn abgeschlagen wird.

Zum reibungslosen Ablauf wird die Belieferung der Druckstraßen mit Papierrollen weitgehend von automatischen Flurförderfahrzeugen übernommen, lediglich das Einlegen der Rolle selbst ist Handarbeit.

Nach dem Verlassen der Druckstraße wird das bedruckte Papier geschnitten, gefaltet und anschließend automatisch in der entsprechenden Reihenfolge zusammengestellt. Hier werden auch die Werbebeilagen und andere Seiten, die bereits zu einem frühen Zeitpunkt gedruckt wurden zugeführt. Die fertiggestellten Zeitungen werden dann gestapelt und in Folie zu Paketen verschweißt. Die Pakete laufen direkt über eine Fördereinrichtung zur

Verladerampe und werden von dort mit Lieferfahrzeugen abtransportiert.

Mit dem Tiefdruckverfahren kann eine so hohe Aktualität, wie sie der Offsetdruck ermöglicht, nicht erreicht werden, denn der Aufwand bei der Erstellung der Druckzylinder ist deutlich höher. Auch aufgrund der höheren Rüstkosten eignet sich dieses Verfahren nur für Produkte mit geringerer Aktualität und ist nur bei hohen Auflagen wirtschaftlich. Bezeichnend für dieses Verfahren sind die hohe Standzeiten der Druckzylinder und eine wesentlich höhere Druckqualität, besonders beim Farbdruck. Daher kommt das Tiefdruckverfahren vor allem bei der Herstellung von Katalogen, Wochenmagazinen, Werbebeilagen etc. zum Einsatz. Beim Tiefdruckverfahren werden Stahlzylinder mit Kupfermantel verwendet, die poliert, graviert sowie verchromt und nach Erreichen der Druckauflage aufbereitet und wiederverwendet werden.

Der Gabelstaplerhersteller STILL, ein Tochterunternehmen des LINDE-Konzerns beschäftigt rund 1200 Mitarbeiter, die Gabelstapler verschiedener Bauarten und -größen, mit Hubgewichten von 1,5 bis maximal 8 Tonnen herstellen.

Sämtliche Teile der Baugruppe Hebehydraulik werden hier gefertigt, Bleche werden mit Hilfe modernster und hochgenauer Lasertechnik geschnitten, gebogen, tiefgezogen und zu Rahmen und Hubgerüsten verschweißt. Auch die erforderlichen Gegengewichte werden in der hauseigenen Gießerei produziert. Elektrische Steuerungen sind ein weiterer Bereich, auf dem STILL unabhängig von Zulieferern ist.

Im Rahmen des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses und der Mitarbeitermotivation hat STILL ein leistungsfähiges Ideenmanagement verwirklicht, das sich der regen Beteiligung der Belegschaft erfreut und das im Gabelstaplerbau bestehende großes Entwicklungspotential erschließen hilft. Beispielsweise höhenverstellbare Fahrer cabinen und ein in die Frontscheibe projizierter Blick nach hinten sorgen für Überblick bei jeder Traglast und in jeder Fahrtrichtung. Mit derartigen Innovationen in Funktion und Ergonomie will STILL die internationale Marktführerschaft sichern und ausbauen.

Die Firma Seca Meß- und Wägetechnik GmbH & Co., die sich unscheinbar in mitten eines Hamburger Wohngebiets befindet, zählt etwa 110 Mitarbeiter, die einen Jahresumsatz von etwa 30 Millionen Mark erwirtschaften. Der Betrieb ist 160 Jahre alt und unterhält Niederlassungen in Europa und in

Amerika. Das Werk hat in den letzten Jahren einen Wandel durchgemacht. So werden Tiefziehteile, die bis vor wenigen Jahren auf einer eigenen Tiefziehpressen hergestellt wurden, von Zulieferbetrieben bezogen. Ebenso wurden Galvanik, Verzinkerei, Pulverei und Lackiererei geschlossen. Neben Rentabilitätsgründen war insbesondere die Verschärfung der Umweltschutzaufgaben für Industriebetriebe in Wohngebieten ausschlaggebend. Den Kern des Unternehmens bildet der Fertigungs- und Montagebereich, wo Teile der Eigenfertigung hergestellt werden sowie die Waagen manuell endmontiert und anschließend verpackt werden. Die Produktpalette teilt sich im Wesentlichen auf rein mechanische Waagen, die über Ausgleichsgewichte funktionieren, und Waagen mit Elektronik. Bei diesen wird die Gewichtskraft über einen Hebelmechanismus in eine Blechverformung umgesetzt. Auf dem Blech ist ein Dehnungsmeßstreifen angebracht, welcher die Verformung in ein elektrisches Signal wandelt. Die Anzeige des Gewichts erfolgt dann über eine LCD-Anzeige. Bei den modernsten Waagen wird das Meßergebnis des Dehnungsmeßstreifens nochmals elektronisch weiterverarbeitet. Da die Elektronik inzwischen auf SMD Technik umgestellt wurde und diese Bauteile aus Kostengründen Zukaufteile sind, müssen sie nach der Montage nur noch abgeglichen werden. Durch den relativ geringen Automatisierungsgrad kann bei der Montage flexibel und kurzfristig auf Bestellungen und Sonderwünsche seitens der Kunden reagiert werden.

3 Exkursion nach München im Oktober

Von der Firma Eurocopter in Donauwörth werden hauptsächlich Helikopter sowohl für zivile als auch für militärische Anwendungen hergestellt. Unter den Teilen, die von Eurocopter selbst gefertigt werden, haben die Rotorblätter einen besonderen Stellenwert, da es sich hierbei um Hochsicherheitsbauteile handelt. Sie werden in Compositbauweise, bei der einzelne Lagen übereinander geklebt werden, gefertigt. Die Rotorblätter besitzen dadurch eine hohe Zugfestigkeit in Längsrichtung aber auch eine hohe Biegsamkeit in Querrichtung. Neben der Produktion neuer Hubschrauber wird von Eurocopter auch die Überholung und Wartung von Militärhelikoptern durchgeführt.

Ein weiteres Geschäftsfeld des Unternehmens ist die Fertigung von Flugzeugkabinentüren für die verschiedenen Flugzeugtypen der Airbusreihe in Zusammenarbeit mit dem Mutterkonzern DASA und dem übrigen Airbus-Konsortium. Bei diesen tech-

nisch sehr anspruchsvollen und hochpräzisen Bauteilen kommen eigens entwickelte Fertigungs- und Montageverfahren, die ein Teil des Know-hows von Eurocopter darstellen, zum Einsatz.

Die Motor- und Turbinen-Union (MTU), die ihr Hauptwerk in München hat, gehört ebenfalls zur DASA. Am Standort arbeiten etwa 6600 Mitarbeiter, die sich mit der Entwicklung, Fertigung, Vermarktung und Betreuung von Triebwerken für zivile und militärische Anwendungen befassen. Die Kernkompetenzen des Unternehmens liegen auf der Systementwicklung von Nieder- und Hochdruckverdichtern, der Unterstützung bei Schulung und Logistik sowie der Erstellung und Umsetzung von Wartungskonzepten. Besonderes Know-how besitzt MTU bei der Fertigung von Turbinenschaufel. Diese sind sehr hohen thermischen Belastungen ausgesetzt, die mit den zunehmenden Leistungsanforderungen an die Triebwerke in den letzten Jahren gestiegen sind. So wird zum einen eine hochtemperaturbeständige Titanlegierung verwendet zum anderen müssen die Schaufeln zusätzlich gekühlt werden. Um einen Kühlluftstrom zu gewährleisten werden Bohrungen in die Schaufel eingebracht, die wegen der Härte des Materials und der geforderten Präzision durch Erodieren gefertigt werden.

Neben Prüfung von Turbinen und Turbinenteilen auf Prüfständen werden bei MTU in weiten Bereichen Berechnungsverfahren eingesetzt. So kann kostengünstig am Rechner simuliert werden, welche Auswirkungen und Beschädigungen ein Vogeleinschlag in ein Triebwerk verursacht.

Das Traditionsunternehmen Knorr-Bremse in München wurde 1905 gegründet und setzt seitdem technologische Standards beim Bau von Druckluftbremsen für Schienen- und Nutzfahrzeuge. In den letzten zehn Jahren entwickelte sich Knorr-Bremse durch grundlegende Umstrukturierung und Globalisierung des Unternehmens zu einem weltweit führenden Unternehmen der Bremstechnologie. So war Knorr-Bremse zum Beispiel maßgeblich an der grundlegenden Entwicklung von Scheibenbremsen in Nutzfahrzeugen beteiligt.

In den Werkshallen werden hauptsächlich Bremssysteme zusammengesetzt, da die Einzelteilerfertigung vornehmlich an anderen Standorten oder durch Zulieferfirmen geschieht. Die Forschung und Entwicklung von Knorr-Bremse ist auf Schlüsselkomponenten ausgerichtet. So werden neuartige Entwicklungen in der Bremstechnologie, wie neue Sintermetallbeläge und Bremscheiben aus Kohlenstoffwerkstoffen vorangetrieben. Auf speziellen

Prüfständen für Schienenbremsen können Bremsverhalten unter verschiedenen Bedingungen erprobt werden.

Bei der IABG (Industrieanlagenbetriebsgesellschaft) in Ottobrunn handelt es sich um ein technisches Dienstleistungsunternehmen, das in den 60er Jahren vom Bund als Erprobungsstelle für die Luft- und Raumfahrt gegründet wurde. Inzwischen beschäftigt sich die IABG aber mit der Beratung von Unternehmen in allen Industriezweigen.

Die IABG selbst stellt keine Produkte her, sondern ist ein reiner Dienstleister, der im Auftrag anderer Firmen Tests durchführt. In den Laboren der mechatronischen Abteilung stehen Resonanzprüfstände für Fahrzeugfedern, ein Prüfstand für ein adaptives Geländewagenfahrwerk und Prüfstände für die Beanspruchungssimulation von kompletten Flugzeugen. Herausragend ist der Prüfstand für ein Tornado-Kampfflugzeug, auf dem die Belastungskollektive eines gesamten Flugzeugslebens simuliert werden können. In einer anderen Abteilung befinden sich Testkammern zum Test der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von elektronischen Bauteilen. Hier können Voruntersuchungen entsprechend der Richtlinie für das CE Zeichen durchgeführt werden. Im Raumfahrttestzentrum werden im Reinraum unter simulierten Weltraumbedingungen Satelliten und Raketenbauteile auf ihre mechanische Festigkeit getestet.

Das Deutsche Patent- und Markenamt ist zum einen für die Patentprüfung zuständig, zum anderen bietet es für jedermann die Möglichkeit, Patente zu recherchieren. Dazu steht die Auslegehalle zur Verfügung, in der die meisten deutschen und internationalen Patente in Papierform vorhanden sind. In Zukunft wird die Patentrecherche mittels Rechner möglich sein. Dazu wird das neu entwickelte DEPATIS - Patentinformationssystem genutzt, das momentan noch in der Testphase ist. Mit diesem wird ein einfacher, schneller und strukturierter Zugriff auf alle seit den 70er Jahren veröffentlichten nationalen und internationalen Patentschriften möglich sein.

Auf dem seit 1936 bestehenden Fliegerhorst Erding ist das Luftwaffenversorgungsregiment 1 mit zur Zeit 650 Soldaten und 850 zivilen Mitarbeitern stationiert. Diese Einheit ist zuständig für Depot- und Bedarfsinstandsetzung von Bundeswehrkampfflugzeugen. Jedes Kampfflugzeug kommt planmäßig nach 10 Jahren oder 2500 Flugstunden zur großen Depotinspektion in die Luftwaffenwerft 13. Dies beinhaltet eine komplette Demontage des Flug-

zeugs, eine Entfernung des Lacks und eine Korrosionsschutzbehandlung der Einzelteile. Nach dem Zusammenbau erfolgt eine Nachrüstung der Elektronik sowie der Auftrag einer neuen Lackierung. Vor der Rückführung in die Einheit müssen zum Wiedererhalt der Luftverkehrszulassung abschließend Probeflüge absolviert werden. In der Triebwerksinstandsetzungshalle werden Düsentriebwerke sowohl planmäßig instandgesetzt als auch Schadensfälle wie Titanbrand oder zerstörte Schaufeln, zum Beispiel durch Vogelschlag, behoben. Eine Modulbauweise der neueren Triebwerke ermöglicht dabei eine Verkürzung der Verweilzeit in der Instandsetzung. Zu dieser Einheit gehören daneben auch zwei Prüfstände, auf denen die instandgesetzten Triebwerke vor dem Einbau in die Jets abschließend getestet werden. Bei voller Triebwerksleistung hat beispielsweise ein J 79 Triebwerk der F4 Phantom einen Kraftstoffverbrauch von 5,5 Litern pro Sekunde.

Die Brauerei Erdinger Weissbräu erzielt eine Jahresproduktion von 1,4 Mio. Hektoliter Bier und zählt damit zu den großen Brauereien in Deutschland. Aus einem werkseigenen 157 Meter tiefen Brunnen wird bei einer stündlichen Förderleistung von 360 Kubikmeter, das Brauwasser geschöpft. Das damit gebraute Bier wird in einer hochmodernen Anlage in 170.000 Flaschen und 120 Fässer pro Stunde gefüllt, die dann in einem rechnergesteuerten, vollautomatischen Hochregallager zur Nachreifung lagern.

4 Zusammenfassung

Während der beiden Exkursionen, die das IMW 1999 durchgeführt hat, konnten den Teilnehmern detaillierte Einblicke in verschiedenste Industriebereiche vermittelt werden. Dabei reichte das Spektrum der besichtigten Firmen von kleinen und mittelständischen Unternehmen bis hin zu großen multinationalen Konzernen und Unternehmensverbänden des klassischen Maschinenbaus und der Luft- und Raumfahrttechnik. Es hat sich gezeigt, daß in allen Firmen spezielles Know-how vorhanden ist, das gepflegt und weiterentwickelt werden muß. Um dies zu realisieren besteht ein großer Bedarf an hochqualifizierten Nachwuchskräften insbesondere aus dem Bereich der Ingenieurwissenschaften. Aus Gesprächen mit den Personalleitern der verschiedenen Unternehmen hat sich herausgestellt, daß die Absolventen der TU Clausthal in bester Weise für den Einstieg ins Berufsleben ausgebildet und vorbereitet sind.

Innovative Ingenieurausbildung

Wächter, M.

Die zunehmende Globalisierung, der Trend zum lebenslangen Lernen und die unterschiedlichen berufsqualifizierenden Abschlüssen machen eine Überarbeitung der Lehr- und Ausbildungsangebote der Hochschulen notwendig. Die gegenwärtig an der TU Clausthal angestrebten Veränderungen in der Ingenieurausbildung werden am Beispiel des Studiengangs Maschinenbau aufgezeigt.

The increasing globalization, the lifelong learning and the different qualification make a revision of the teaching and formation supplies of the universities necessarily. By the example of the course of studies mechanical engineering the future modifications in the engineering education in the Technical University of Clausthal are shown.

1 Einleitung

Industrievertreter, Ingenieurverbände und Kultusministerkonferenz, um nur einige zu nennen, befassen sich mit der Thematik der notwendigen Veränderungen in der Ingenieurausbildung. Die wachsende Globalisierung und die sich entwickelnde Wissensgesellschaft erfordern Ingenieure, die neben dem technischen know-how, Problemlösungs- und Systemkompetenz und fachübergreifendes Wissen aufweisen. Die Technische Universität Clausthal hat bereits in der Vergangenheit auf die Forderungen durch Einführung der "Bindestrichstudiengänge" reagiert, wie z.B. Chemieingenieurwesen, Energiesystemtechnik und Wirtschaftsingenieurwesen

2 Anforderungen an Ingenieure

Die Qualifikationen der Berufseinsteiger sind abhängig von dem Einsatzfeld und der Arbeitssituation. In der Großindustrie mit ihren differenzierten internen Arbeitsteilungen werden nach wie vor spezialisierte Experten für Konstruktion und Entwicklung oder mit wissenschaftlich-theoretischen Kennt-

nissen gesucht.

Die kleineren und mittleren Unternehmen dagegen suchen sofort einsetzbare Allround-Techniker, die in der Lage sind ohne lange Einarbeitung flexibel und eigenständig verschiedene Rollen und Funktionen im Betrieb zu übernehmen.

Eine Kombination aus technischen Kenntnissen, unternehmerischen Qualifikationen und Führungsfähigkeiten fordern die Start-up Unternehmen. Für sie ist eine Integration von Management- und Marketingkenntnissen in die ingenieurwissenschaftliche Ausbildung unerlässlich./1/

Die Anforderungen an die Ingenieurausbildung lässt sich in drei Themengebiete einteilen:

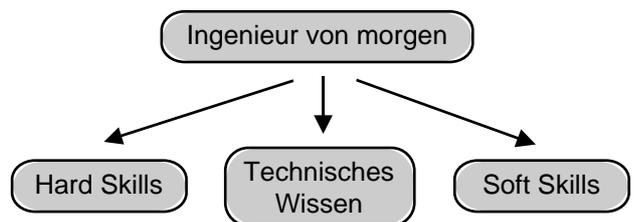


Bild 1: Forderungen an die Qualifikation der Ingenieure

Folgende Fähigkeiten werden den Hard Skills zugeordnet:

- System- und problemlösungsorientiertes Denken
- Verständnis für gesamten Wertschöpfungsprozess
- Betriebswirtschaftliches Denken
- Methoden des Projektmanagements und der Entscheidungsfindung
- Marketingfähigkeiten
- Gute Fremdsprachenkenntnisse
- Wissen um die sozialökologische Einbettung und Folgen von Technikanwendungen

Unter den Soft Skills werden folgende Eigenschaften

ten verstanden:

- Kommunikations- und Teamfähigkeit
- Präsentationstechniken und sachliche Überzeugungskraft
- Fähigkeit, technische Zusammenhänge und Lösungen Laien verständlich zu machen
- Führungstechniken und -verhalten
- Interkulturelles Verständnis und kulturelle Empathie
- Fähigkeit, sich schnell neue technische und nicht-technische Sachverhalte anzueignen
- Bereitschaft zum "life-long learning"

3 Innovationen in der Ingenieurausbildung

Im Studiengang Maschinenbau der TU Clausthal galt schon in der Vergangenheit die Auffassung, Studierende auszubilden, die Problemlösungs- und Methodenkenntnisse aufweisen. Diese Einstellung liegt unter anderem in der Größe der Hochschule begründet. Bedingt durch die geringe Anzahl an Maschinenbauprofessuren ist es nicht möglich, Spezialisten für z.B. Flugzeugantriebe oder Hochleistungsbearbeitungszentren auszubilden.

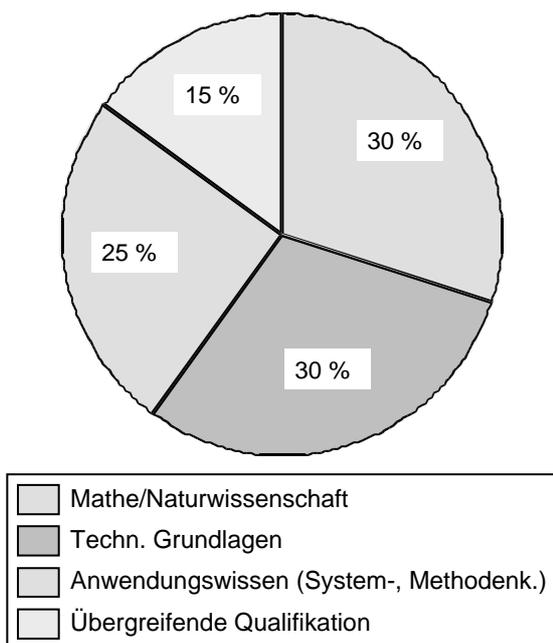


Bild 2: Inhalte eines berufsbefähigenden Ingenieurstudienganges

Die Industrie erwartet von einem berufsfähigen Ingenieur ein ausgewogenes Grundlagen- und Anwendungswissen (**Bild 2**)/2/.

Ordnet man die Lehrveranstaltungen im Studiengang Maschinenbau diesen Wissensgebieten zu, so stellt sich heraus, dass das Studium an der TU Clausthal diesen Forderungen weitestgehend entspricht.

Die Hochschule ist zur Zeit an einem Verbundprojekt der Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung (BLK) zur Modularisierung von Studiengängen beteiligt. Im Rahmen dieses Projektes sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, die geforderten Veränderungen in der Ingenieurausbildung, ohne Verlängerung der Studienzeiten, zu realisieren. Ein modular aufgebauter Studiengang ermöglicht eine höhere fachliche sowie globalere Flexibilität der Studierenden.

Die acht Partnerhochschulen im BLK-Projekt haben sich auf folgende Definition für ein Modul geeinigt:

- Ein Modul ist eine abgeschlossene Lehrveranstaltung oder Lerneinheit.
- Ein Modul ist quantitativ durch Kreditpunkte und qualitativ durch den dokumentierten Inhalt vergleichbar.
- Ein Modul erstreckt sich in der Regel über ein Semester, maximal über ein Studienjahr.
- Ein Modul schließt mit einer benoteten Prüfungsleistung ab.

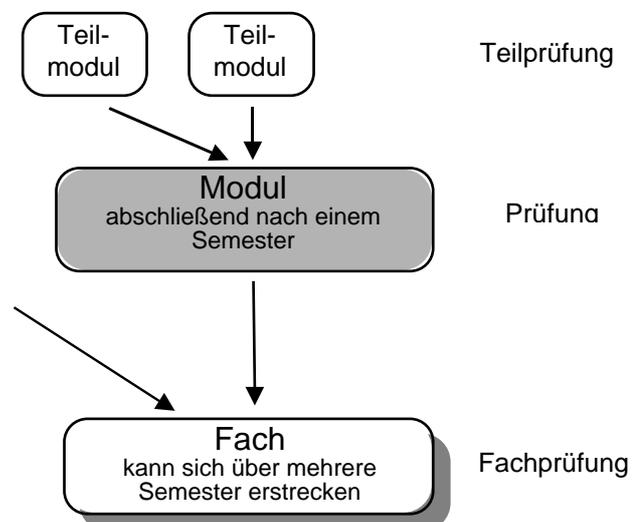


Bild 3: Modulaufbau

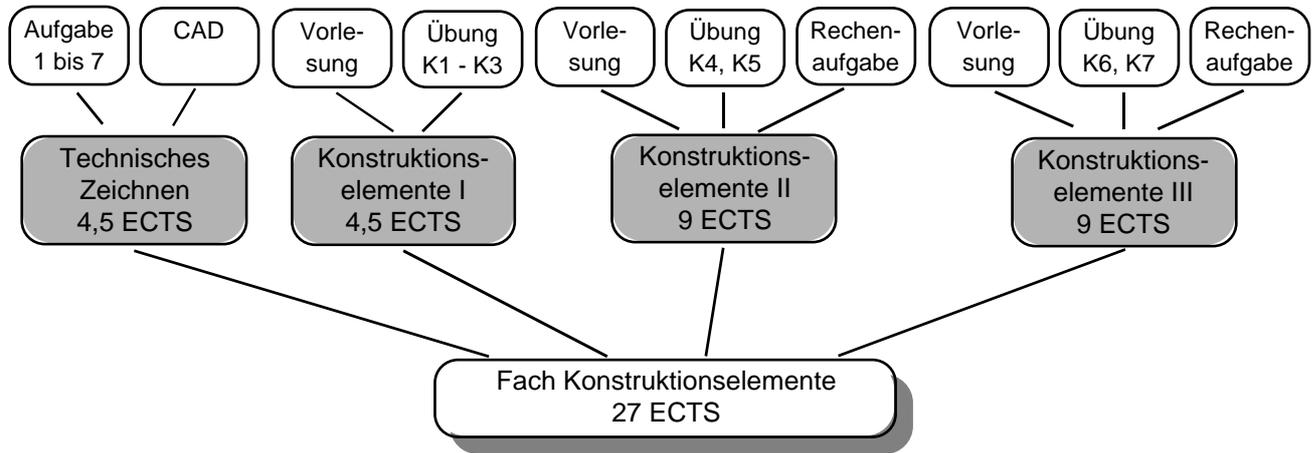


Bild 4: Module im Fach Konstruktionselemente

Das Fach Konstruktionselemente würde sich nach diesen Vorstellungen aus vier Modulen zusammensetzen. (**Bild 4**)

Der modulare Aufbau des Studiums ist für die ausländischen Studierenden, die im Rahmen des ERASMUS/SOKRATES Programms oder anderer Kooperationen die Hochschule besuchen, vorteilhaft. Die Studierenden bekommen zum Semesterende eine Auflistung über den Inhalt der erfolgreich abgeschlossenen Lehrveranstaltung und deren zugehörigen Kreditpunkte. Die Kreditpunkte sind ein Maß für den Arbeitsaufwand, der für eine Lehrveranstaltung pro Semester geleistet werden muß. Im ERASMUS/SOKRATES Programm sind 30 Credits pro Semester vorgegeben.

Die erfolgreiche Teilnahme an einer Lehrveranstaltung kann durch eine Prüfung oder durch eine bewertete Konstruktionsaufgabe oder Hausarbeit nachgewiesen werden.

Gegenwärtig besteht das Problem, dass ein ausländischer Bachelor-Absolventen zu Studiengängen an deutschen Hochschulen keinen definierten Zugang hat. Die mit dem Bachelor erworbenen Studienleistungen werden für jeden Bewerber einzeln auf Anrechenbarkeit geprüft. Die inhaltliche Inkompatibilität der unterschiedlichen Studienmodelle Bachelor/Master und Diplom bereitet bei einem Wechsel in ein anderes System Probleme (**Bild 5**).

Das Bachelor-Studium ist meist auf das Qualifikationsniveau eines "ersten berufsbefähigenden Abschlusses" unterhalb des Masters ausgerichtet. Der ausländische Bewerber mit dem Bachelor-Grad

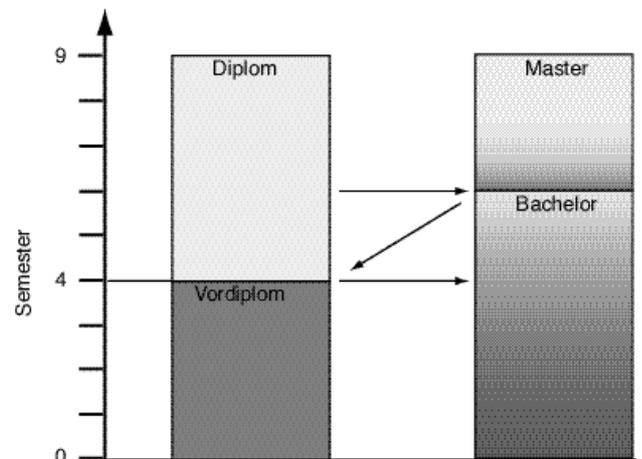


Bild 5: Schnittstellenproblematik der Hochschulabschlüsse

wird deshalb Defizite im Bereich der vertieften mathematisch-naturwissenschaftlichen und technischen Grundlagen haben, die in einem universitären Diplomstudiengang im Grundstudium vermittelt werden.

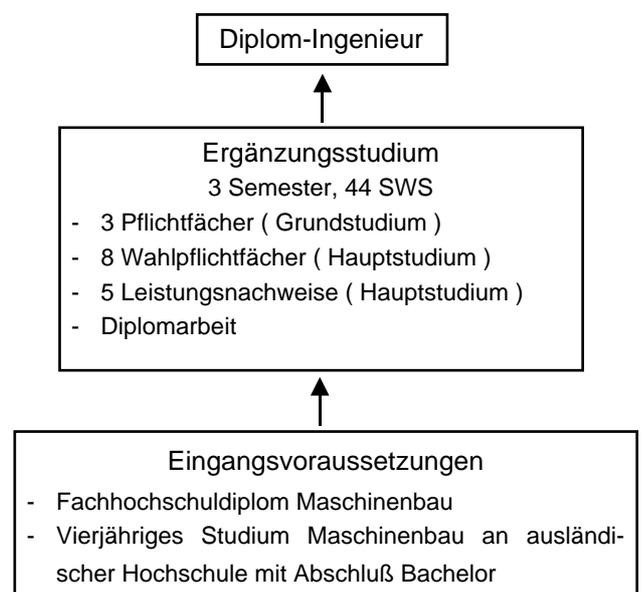


Bild 6: Ergänzungsstudiengang Maschinenbau

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist an der TU Clausthal für Fachhochschulabsolventen und ausländische Studierende ein Ergänzungsstudium z. B. im Maschinenbau (**Bild 6**) möglich. Ähnlich aufgebaute Ergänzungsstudiengänge werden für die Studienrichtungen Umweltschutztechnik, Energiesystemtechnik und Chemieingenieurwesen/Verfahrenstechnik an der Hochschule angeboten.

Der Bachelor-Absolvent wählt Module aus dem Angebot der Hochschule aus, die auf sein bisheriges Studium an der Heimatuniversität abgestimmt sind und erwirbt durch die zusätzlichen Befähigungen den Diplomabschluss. Es ist auch die Variante denkbar, dass sich ein Student die für den Bachelor-Abschluss notwendigen Module an einer deutschen Hochschule auswählt und anschließend an einer ausländischen Hochschule das Studium bis zum Master-Abschluss fortsetzt.

Die verschiedenen Wissensvoraussetzungen durch unterschiedliche Schul- und Studienzeiten im In- und Ausland (**Bild 7**) können durch einen modularen Studiengang sowohl zu Studienbeginn als auch bei Hochschulwechsel berücksichtigt werden.

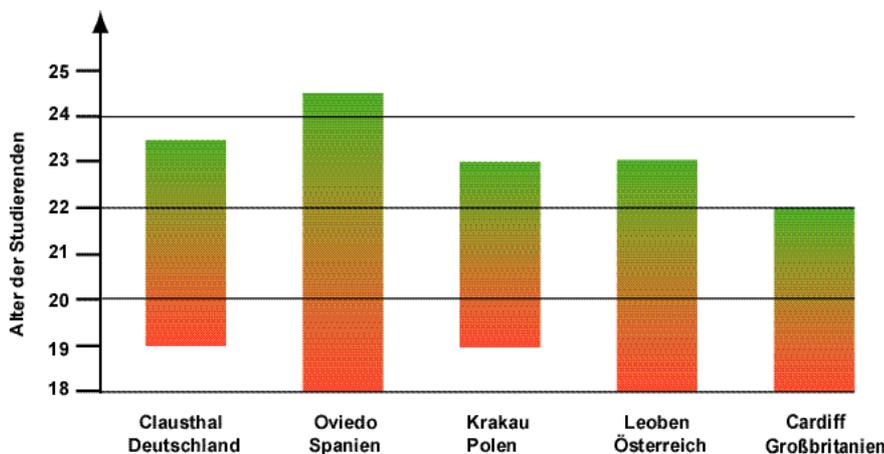


Bild 7: Lebensalter der Studierenden im In- und Ausland

Die zunehmende Globalisierung macht es erforderlich, dass durch die Einbindung eines Auslandsaufenthaltes während des Studiums die Fremdsprachenkenntnisse und das interkulturelle Verständnis erweitert werden. Im Maschinenbau weist die Hochschule einen recht hohen Anteil an Studierenden auf, die sich für einen Auslandsaufenthalt entscheiden. Dabei werden aus den geplanten sechs Monaten leicht auch ein oder eineinhalb Jahre. Für diese Studierenden würde die Möglichkeit, ein Doppeldi-

plom zu erwerben, einen weiteren Anreiz darstellen.

Gegenwärtig werden mit der University Cardiff vorbereitende Gespräche für einen integrierten binationalen Studiengang Maschinenbau mit den Abschlüssen Master of Science und Diplomingenieur geführt.

Zum Erwerb des Doppeldiploms wird ein einjähriger Auslandsaufenthalt an der University Cardiff oder an der TU Clausthal mit erfolgreicher Teilnahme an einer festgelegten Anzahl an Lehrveranstaltungen obligatorisch sein. Daneben müssen ausreichende Englisch- bzw. Deutschkenntnisse nachgewiesen werden. Die Diplomarbeit ist in der Landessprache der Gastuniversität anzufertigen und wird voraussichtlich von Professoren beider Hochschulen betreut.

Die TU Clausthal hat recht gute Erfahrungen mit der Vergabe eines Doppeldiploms in dem Studiengang Werkstoffwissenschaften mit der Partneruniversität Metz in Frankreich.

4 Zusammenfassung

Die Modularisierung von Studiengängen ermöglicht eine flexiblere Gestaltung der Ingenieurausbildung. Den Anforderungen aus der zunehmenden Globalisierung und der sich entwickelnden Wissensgesellschaft gerecht zu werden, heißt das technische Grundwissen durch Hard Skills und Soft Skills zu ergänzen.

5 Literatur

- /1/ BMBF: Neue Ansätze für die Ausbildung und Qualifikation von Ingenieuren, Bonn 1999
- /2/ ZVEI, VDMA: Internationalisierung der Ingenieurausbildung - Die neue Herausforderung für Hochschulen in Deutschland, Frankfurt 1997

COPES - Ein weiterer Schritt zur Internationalisierung der TU Clausthal Projekte am IMW

Grethe, V.

Seit April 1996 besteht für europäische Wissenschaftler die Möglichkeit, im Rahmen der Großforschungsanlage COPES einen von der Europäischen Union finanzierten Forschungsaufenthalt in Clausthal durchzuführen. Innerhalb dieses Programms waren auch einige Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am IMW, um die besondere Ausstattung der Konstruktionsarbeitsplätze für ihre Forschungsaktivitäten zu nutzen

Since April 1996 european researchers can apply for a research grant funded by the European Union within the framework of the Large Scale Facility COPES in Clausthal. Under this programme several researchers visited the IMW, using the Design Workstation for their research activities.

1 Bedeutung der Großforschungsanlage COPES für die TU-Clausthal

Die Europäische Kommission finanzierte innerhalb des vierten Rahmenprogramms spezielle Programme zur Ausbildung und Mobilität von Wissenschaftlern. Institutionen der Spitzenforschung wurden als sogenannte Large Scale Facilities anerkannt, und es wurden von der Europäischen Union Mittel zur Verfügung gestellt, um europäischen Wissenschaftlern aus Hochschule und Industrie den Zugang zu diesen Forschungseinrichtungen zu ermöglichen.

Unter der Leitung von Herrn Professor Dietz haben sich in Clausthal 18 Institute, das Clausthaler Umweltforschungsinstitut CUTEC GmbH, das Institut für Erdölforschung IfE, sowie das Institut für Materialprüfung Dr. Dölling und Dr. Neubert zu der Großforschungsanlage COPES, Clausthal Centre of Process Engineering Systems, zusammengeschlossen. Insgesamt stehen interessierten Wissenschaftlern ca. 100 Anlagen, Maschinen und Analyselabore sowie eine Anzahl von Computerarbeitsplätzen zur Berechnung von Anlagenkomponenten bzw. zur Simulation ihrer Einsatzbedingungen zur Verfügung.

Das einzigartige an der Großforschungsanlage COPES ist neben der Vielfältigkeit der einzelnen

Anlagen, Maschinen und Laboratorien deren technische Ausstattung und der besondere Service der innerhalb von COPES angeboten wird. Jeder Gastwissenschaftler kann während seines Aufenthalts alle für seine Forschungszwecke relevanten Geräte benutzen, unabhängig davon, ob sich die benötigten Anlagen in einem oder an mehreren verschiedenen Instituten befinden. Durch eine intensive Planung im Vorfeld der Aufenthalte kann auch bei kurzen Besuchsdauern ein Maximum an wissenschaftlicher Arbeit geleistet werden.

In den vergangenen dreieinhalb Jahren sind 51 Gastwissenschaftler aus 10 europäischen und zwei assoziierten Ländern (vgl. **Tabelle 1**) an die TU-Clausthal gekommen.

Land	Anzahl der Wissenschaftler
Frankreich	13
Spanien	10
Griechenland	6
Großbritannien	5
Italien	4
Österreich	3
Schweden	2
Finnland	2
Norwegen	2
Israel	2
Niederlande	1
Belgien	1

Tab. 1: Anzahl der Wissenschaftler nach Herkunftsländern

Die meisten Wissenschaftler kamen aus Frankreich und Spanien. Ein Grund hierfür ist sicherlich die schon seit vielen Jahren bestehende enge wissenschaftliche Zusammenarbeit zwischen Clausthal und verschiedenen Hochschulen in diesen beiden Ländern. Da sowohl die Reise- und Aufenthaltskosten für die Gastwissenschaftler als auch die Kosten für die Nutzung der Anlagen und Geräte aus Brüssel finanziert werden, zeigten sich die Gast-

wissenschaftler sehr angetan von dem TMR-Programm, das im laufenden 5. Rahmenprogramm als IHP- Programm (Improving Human Potential) weitergeführt wird.

Für die TU-Clausthal hat sich durch die aktive Teilnahme an dem Austauschprogramm eine einzigartige Chance geboten, einem breiten Spektrum europäischer Wissenschaftler sein technologisch hochentwickeltes Potential an Forschungsanlagen zu präsentieren, und das Netzwerk seiner ausländischen Kontakte zu vergrößern. Der Erfolg der im Rahmen von COPES durchgeführten Projekte wird durch derzeit 30 wissenschaftliche Veröffentlichungen dokumentiert, die zu einem großen Teil als gemeinsame Publikationen mit den Clausthaler Wissenschaftlern erschienen sind bzw. erscheinen werden. Desweiteren sind durch die COPES-Aufenthalte auch Grundlagen für zukünftige Kooperationen gelegt worden. Beispiele sind gemeinsame EU-Projekte, interdisziplinäre Zusammenarbeiten bei der Entwicklung von Geräten und Simulationsprogrammen sowie der Ausbau persönlicher Kontakte. Von besonderer Bedeutung sind die persönlichen Kontakte unter den Wissenschaftlern auch für die Studenten, da sich durch die Zusammenarbeit auch Möglichkeiten im Hinblick auf die Vergabe von Studien- und Diplomarbeiten ergeben, die in Zusammenarbeit mit den europäischen Wissenschaftlern bzw. an deren Instituten durchgeführt werden können.

2 COPES-Projekte am IMW

Am Institut für Maschinenwesen bestehen schon seit einigen Jahren sehr gute Kontakte zu spanischen Universitäten. Dies zeigt sich auch bei den COPES-Projekten, die am IMW durchgeführt worden sind. Während der Projektlaufzeit konnten für jeweils vier Monate vier Gäste aus Spanien die Ausstattung der Konstruktionsarbeitsplätze für Ihre Forschungsaktivitäten nutzen.

Frau Dolores Rubio Eire und Herr Carlos Crespo Minana von der Universität Zaragoza arbeiteten im Sommer 1997 mit dem am IMW entwickelten KERB-Programm, einem statistischen Subprozessor, mit dem eine wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtung der Ausfallwahrscheinlichkeit von keramischen Bauteilen durchgeführt werden kann. In diesem Jahr konnte Frau Rubio Eire während eines zweiten von COPES geförderten Aufenthalts weiterführende Untersuchungen durchführen, wobei eine zusätzliche statistische Auswertung von cha-

rakteristischen Materialdaten in die Berechnungen mit einbezogen wird /1/.

Ebenfalls von der Universität in Zaragoza kam Herr Alberto Martinez, der im März 1999 für vier Monate am IMW war und FEM-Simulationen zur Drehmomentübertragungsfähigkeit innenhochdruckgefügter Preßverbindungen durchgeführt hat /2/.

Aus der Forschungs- und Entwicklungsabteilung der Firma IPS - Ingenieria de Productos, Procesos y Sistemas Integrados, S.L. aus Valencia kam ebenfalls im Frühjahr diesen Jahres Frau Almudena Robert Flors ans IMW. Frau Robert Flors arbeitet auf dem Gebiet der Fernüberwachung und -regelung mechanischer Systeme. Sie nutzte Ihren Aufenthalt am IMW, um auf der Grundlage der vorhandenen 3D-CAD/CAE-Werkzeuge fundamentale Kenntnisse im Bereich der Konstruktion und Analyse mechanischer Komponenten und Baugruppen zu erwerben. Diese Kenntnisse sollen dazu dienen, das Betriebsverhalten mechanischer Systeme besser zu verstehen und somit die Qualität von Lösungen zur Überwachung und Regelung dieser Systeme deutlich zu steigern.

3 Zusammenfassung

Innerhalb der Großforschungsanlage COPES konnten in den vergangenen dreieinhalb Jahren 51 Wissenschaftler aus 12 Ländern arbeiten. Durch die erfolgreiche Zusammenarbeit mit Clausthaler Wissenschaftlern konnte das Netz internationaler Kontakte für die TU Clausthal und für das IMW erweitert und eine Basis für zukünftige Kooperationen geschaffen werden.

4 Literatur

- /1/ Rubio Eire, M. D.:
Probability for Probabilistic criteria - Design with brittle materials, Institutsmitteilung Nr. 24 (47-52), IMW Clausthal 1999
- /2/ Dietz, P.; Garzke, M.; Grünendick, T.:
Innenhochdruck sorgt für festen Fügeseitz – Leichtbau-Machinenelemente durch plastische Verformung herstellen Institutsmitteilung Nr. 24 (17-24), IMW Clausthal 1999

Über eine Dienstreise in das Land der zwei Kulturen

Otto, St.; Schäfer, G.

Die Technische Universität Clausthal arbeitet im Rahmen unterschiedlicher Förderprogramme mit zahlreichen Hochschulen im Ausland zusammen. Sie zählt diesbezüglich zu den aktivsten Universitäten in der deutschen Hochschullandschaft und bietet damit ihren Studenten ausgezeichnete Möglichkeiten, während des Studiums durch einen Auslandsaufenthalt „über den eigenen Tellerrand“ zu blicken, Professoren und wissenschaftlichen Mitarbeitern offeriert sich die Chance zum Erfahrungsaustausch mit Forscherkollegen.

Die Autoren dieses Artikels besuchten im September diesen Jahres die Universität von Guadalajara in Mexiko. Hintergrund, Inhalte, Ziele und Eindrücke dieser Reise werden kurz beschrieben.

Financed by different support programmes, the Technical University of Clausthal maintains close relationships to foreign universities. Regarding that, Clausthal University is one of the most active universities in Germany and therefore students from Clausthal have best chances to „look beyond one's own nose“ by going abroad, professors and re-

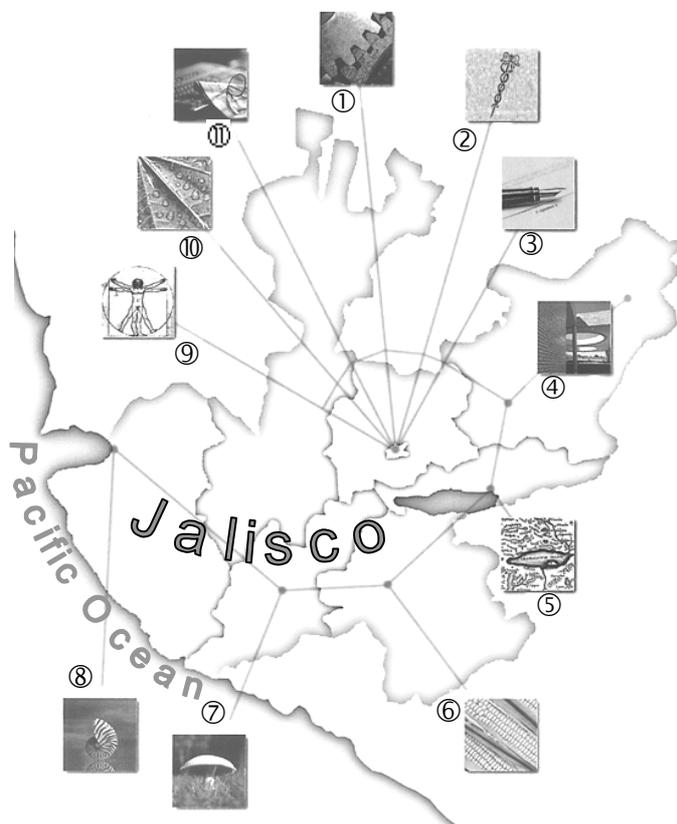
search fellows have the opportunity for the exchange of experiences.

In September this year the authors of this article visited the University of Guadalajara in Mexico. Reason, content, aims and impressions of this stay will be briefly described.

1 Die Universität von Guadalajara

Die Universität von Guadalajara blickt auf eine mehr als zweihundertjährige Geschichte zurück. Gegründet als Königliche Universität für Literatur im Jahre 1792 durchlief sie insbesondere im 19. Jahrhundert, seit der Unabhängigkeit Mexikos im Jahre 1821, zahlreiche Umstrukturierungsprozesse.

Heute steht die Bezeichnung Universität von Guadalajara für ein umfassendes Netzwerk aus Bildungseinrichtungen. Dieses besteht aus 11 Hochschulzentren und 44 Oberschulen, welche im gesamten Bundesstaat Jalisco verteilt sind (**Bild 1**) und von einer gemeinsamen Verwaltung betreut werden (**Bild 2**). Einige der Hochschulstandorte,



- ① **Guadalajara**; Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías
- ② **Guadalajara**; Centro Universitario de Ciencias de la Salud
- ③ **Guadalajara**; Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades
- ④ **Tepatitlán de Morelos**; Centro Universitario de Los Altos
- ⑤ **Ocotlán**; Centro Universitario de la Ciéne-ga
- ⑥ **Ciudad Guzmán**; Centro Universitario de la Sur
- ⑦ **Autlán**; Centro Universitario de la Costa Sur
- ⑧ **Puerto Vallarta**; Centro Universitario de la Costa
- ⑨ **Guadalajara**; Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño
- ⑩ **Guadalajara**; Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias
- ⑪ **Guadalajara**; Centro Universitario de Ciencias Económico y Administrativas

Bild 1: Universitätsstandorte im Bundesstaat Jalisco

z.B. Puerto Vallarta und Ocotlán, sind schon aufgrund ihrer geographischen Lage besonders attraktiv, als Student hätte man gerne einen Aufenthalt dort verbracht.

Die Gesamtzahl der Studierenden (160.000 Studenten, außerdem 15.000 Angestellte) ist mit Clausthaler Größenordnungen nicht zu vergleichen. Die Universität von Guadalajara ist damit nur noch kleiner als die Universität von Mexiko City.

Das Universitätszentrum für Natur- und Ingenieurwissenschaften (CUCEI, vgl. **Bild 1**), dessen angebotene Studienrichtungen mit denen aus Clausthal vergleichbar sind, besitzt 9.750 Studenten, ca. die dreifache Studentenzahl der TU Clausthal.



Bild 2: Altes Hauptgebäude der Technischen Universität von Guadalajara

2 Hintergrund und Inhalte der Reise

Zwischen der Universität von Guadalajara und der TU Clausthal existiert seit 1997 ein Kooperationsvertrag, der durch den Deutschen Akademischen Austauschdienst gefördert wird. Koordinator für die Zusammenarbeit seitens der TU Clausthal ist Prof. Dietz.

Im Rahmen der wissenschaftlichen Zusammenarbeit beider Hochschulen konzentrieren sich die Aktivitäten auf die Fachgebiete Maschinen- und Verfahrenstechnik sowie Umweltschutztechnik einschließlich der zugehörigen Systeme und Methoden für:

- die Entwicklung, Konstruktion, Simulation und Fertigung von Maschinen und Anlagen,

- den Versuchs- und Prototypenbau,
- das Management von Produktions- und Prozessindustrien,
- die Durchführung und Analyse von Messungen an Versuchsständen oder in Feldversuchen

sowie auf die Fachgebiete Informatik und Informationstechnik.

Weitere Schwerpunkte der Kooperation, die in jährlich auszuarbeitenden Verträgen spezifiziert werden (finanzieller und zeitlicher Rahmen) sind:

- der Austausch von Professoren und Wissenschaftlern,
- der Austausch von Studierenden,
- die Kooperation in Forschung und Lehre,
- der Transfer von Forschungsergebnissen in die vor Ort ansässige Industrie.

Im Zusammenhang mit dem Austausch von Professoren und Wissenschaftlern zur Beteiligung an Lehre und Forschung führten die beiden Mitarbeiter des Instituts für Maschinenwesen Vortrags- und Seminarveranstaltungen durch. Kerninhalte dieser Vortragsreihe waren:

- das methodische Konstruieren, welches in Übungen mit den Kursteilnehmern an verschiedenen Beispielen praktiziert wurde sowie
- Vorträge über die aktuellsten Methoden zur Dimensionierung von Welle-Nabe-Verbindungen unter Berücksichtigung des plastischen Materialverhaltens.

Weiterhin erfolgte ein Erfahrungsaustausch auf dem Gebiet des Rapid Prototyping.

Wie so oft bei derartigen Veranstaltungen ergaben sich auch diesmal in den Kaffeepausen interessante Gespräche über wichtige Themen abseits der Vortragsinhalte. Als Beispiel sei die ausführliche Erläuterung der Tequila-Herstellung seitens der mexikanischen Teilnehmer erwähnt. In diesem Zusammenhang ist es interessant, daß die Universität von Guadalajara eine Studienrichtung zur Tequila-Herstellung anbietet – vergleichbar dem bundesdeutschen Studium des Brauereiwesens.

Die Veranstaltungen, welche durch Betriebsbesichtigungen ortsansässiger Firmen abgerundet wurden, waren neben Industrieteilnehmern und Hochschullehrern auch von Studenten besucht. Zwei Clausthaler Studenten weilen derzeit in Guadalajara, sie fertigen während des 6-monatigen Aufenthaltes ihre Diplomarbeit an.

Ein wichtiges Ziel der Dienstreise war der Abschluß eines Kooperationsvertrages für das kommende Jahr. In Gesprächen mit der Hochschulleitung wurden Themenschwerpunkte für eine weitere Zusammenarbeit eruiert.

Besonders intensiv diskutiert wurden Fragen bezüglich der Planung, des Aufbaus und der Einrichtung eines gemeinsamen Forschungslabors für globale Konstruktion. Die Idee dieses Projektes, das gleichzeitig von der Europäischen Union gefördert wird, ist eine kontinente- und länderübergreifende gemeinsame CAD-gestützte Konstruktion für verfahrens- und umwelttechnische Anlagen und Maschinen. Die Forschungsergebnisse sollen zeigen, daß aufgrund der Zeitverschiebung zwischen Europa und Mittelamerika je Arbeitstag zeitlich wesentlich länger und dadurch – projektbezogen – wesentlich schneller und effektiver konstruiert werden kann. Das heißt beispielsweise, daß ein Konstrukteur in Deutschland am Ende des Arbeitstages seine Ergebnisse (3D-CAD-Modell, technische Zeichnungen u.a.) auf elektronischem Weg nach Mexiko sendet. Der dort angestellte Konstrukteur, dessen Arbeitstag aufgrund der Zeitverschiebung 7 Stunden später beginnt, kann auf Basis dieser Daten weiterarbeiten. Voraussetzungen für ein solches Labor sind:

- die Bereitstellung ausreichender Rechnerkapazitäten,
- die Abstimmung der verwendeten CAD-Systeme und
- der Aufbau einer schnellen Datenverbindung nach Europa.

Diese Punkte gilt es in den nächsten Jahren zu erfüllen.

Für eine stärkere internationale Ausrichtung des Studiums werden gegenwärtig mehrere Wege an den deutschen Hochschulen beschritten. Zum einen werden immer mehr Bachelor- und Master-Studiengänge angeboten, zum anderen wird der Prozeß der Modularisierung des Studiums forciert. Letzteres gibt den Studierenden die Möglichkeit, ihren Studienplan – unter Beachtung eines Basiscurriculums – nach eigenen Wünschen auch unter Einbeziehung der Vorlesungen anderer deutscher oder sogar ausländischer Universitäten zu gestalten. Grundlage für die gegenseitige Anerkennung der Prüfungsleistungen ist ein CREDIT-System, in dem jede Vorlesung, Übung etc. entsprechend den Inhalten mit Punkten bewertet ist. Dieses System gibt den Studierenden die größtmögliche Flexibilität bei

der inhaltlichen Zusammenstellung ihrer Studienswerpunkte.

Ein derartiges CREDIT-System besteht bereits auf europäischer Ebene. Neben der Technischen Universität Clausthal arbeiten beispielsweise die Universitäten von Cardiff, Nottingham, Valencia, Zaragoza u.a. in einem solchen System zusammen.

3 Impressionen

Der Artikel wäre unvollständig, würde er ausschließlich die dienstlichen Inhalte der Reise beleuchten. Der letzte Abschnitt soll deshalb ein wenig von den Erlebnissen „am Rande“ berichten.



Bild 3: Architektonische Kontraste in der Innenstadt von Guadalajara

Guadalajara ist mit 5,5 Mio. Einwohnern die zweitgrößte Stadt Mexikos und Hauptstadt des Bundesstaates Jalisco. Aufgrund der langen Geschichte, Guadalajara wurde 1542 gegründet, ist das Stadtbild durch eine Mischung aus traditioneller, spanischer Bauarchitektur und Stahlbetonkonstruktionen aus der heutigen Zeit gekennzeichnet (**Bild 3**). Der spanische Einfluß zeigt sich ebenfalls in der Religion, denn das gewaltsam von den spanischen Konquistadoren ins Land gebrachte Christentum hat sich mehr oder weniger stark mit dem Glauben der Mayas und Azteken vermischt. Deshalb bezeichnen die Mexikaner ihr Land gerne als „México eterno“ – das „Land der zwei Kulturen“.

Das Foto (**Bild 3**) zeigt auch eines der beliebtesten Fortbewegungsmittel der Mexikaner, den VW Sedan – sicherlich besser bekannt unter der Bezeichnung VW Käfer. Für interessierte Oldtimerfans sei hinzugefügt, daß der Käfer mit einem Preis von US\$ 7000 kein Schnäppchen ist, das sich für einen Import lohnen würde.

Das ganzjährig gemäßigte Klima macht die Region um Guadalajara zu einem idealen Anbaugebiet für Mais, Bohnen, Getreide und Agaven, wobei über die letztgenannte Anbaupflanze noch weiteres zu berichten ist. Während eines Ausflugs in das Umland von Guadalajara war es interessant, in 2500 m Höhe Landarbeiter bei der Bestellung ihrer Felder anzutreffen (**Bild 4**), bedenkt man, daß in Europa Regionen dieser Höhenlage ideale Wintersportgebiete und weniger landwirtschaftliche Anbaugebiete sind.



Bild 4: Landwirtschaft in 2500 m Höhe; Landarbeiter beim Bestellen der Felder

Das gemäßigte Klima fördert nicht nur die Landwirtschaft der Region sondern auch den Tourismus. So ist der nahegelegene Chapala-See – größter Binnensee Mexikos – ein beliebtes Erholungsgebiet. Dies hat allerdings auch zur Folge, daß die einheimische Bevölkerung mehr und mehr durch zahlungskräftige Amerikaner verdrängt wird. In einigen Gebieten beträgt deshalb der Anteil amerikanischer Pensionäre, die ihren Lebensabend dort genießen, bereits 60%.

Eines der schönsten Erlebnisse „am Rande“ war ein Ausflug nach Tequila. Nein lieber Leser, dies ist kein grammatikalischer Fehler, sondern Tequila bezeichnet hier die Stadt, die dem bekannten mexikanischen Nationalgetränk den Namen gab.

Auf dieser Tagestour in das 60 km nordwestlich von Guadalajara gelegene Dörfchen Tequila erlebt der Mexiko-Reisende in sehr komprimierter Form alle



Bild 5: Mariachi-Musiker

die Seiten, für die Mexiko berühmt ist: Mariachi-Musik, sehr schmackhaftes (manchmal schweißtreibendes) Essen und natürlich Tequila.

So begann auch die zweistündige Zugfahrt mit dem sogenannten „Tequila-Express“ unter der Begleitmusik der Mariachi (**Bild 5**). Jene Mariachi-Musik, die inbrünstig und mit schrillen Violinen-, Gitarren- und Blechklängen u. a. die Schönheit des Landes besingt, soll ihren Ursprung in Guadalajara haben.

„Schwerpunkt“ dieses Tagesausflugs war jedoch die Tequilaherstellung und -verkostung.

Mexiko produziert heute über 15 Mio. Gallonen Tequila im Jahr. Hauptexportländer sind USA, Deutschland und Großbritannien.

Dieser Agaven-Schnaps, wird aus dem Ananas-ähnlichen Kern der gleichnamigen Pflanze (**Bild 6**) hergestellt, der bis zu 150 kg wiegen kann. Die Agaven müssen hierzu teilweise 15 Jahre reifen. Der aus

der Frucht herausgepreßte, honigartige Saft wird zweifach destilliert. Entsprechend der Lagerzeiten unterscheidet man zwischen verschiedenen Tequilasorten, von denen der „Reposado“ der edelste Tropfen ist.



Bild 6: Arbeiter bei der Agavenernte

Analyse der Arbeitsverhältnisse einer Förderanlage während einer Notbremsung

Siemieniec, A.; Wolny, S.

Bremsdynamischen Problemen wird bei der Konstruktion von Bergbauförderanlagen oftmals nicht die notwendige Aufmerksamkeit gewidmet, Dimensionierungsvorschriften sind diesbezüglich kaum vorhanden. Der Artikel stellt Grundlagen vor, die Ausgangspunkt für weitere Arbeiten sein können.

Dynamical problems concerning the deceleration process of mining conveyors are often neglected in the design stage, rules and guides aren't available. The paper covers basics for advanced calculations.

1 Einleitung

Das Anwachsen der Tragfähigkeit und der Geschwindigkeit der Fördermaschinen in Gewinnungsanlagen im Bergbau verursachte den Wunsch nach größeren Bremsmomenten, sowohl der Rangierbremse als auch der Notbremse. Damit ist eine größere Belastung der Bremsanlagenelemente selber, sowie deren Umgebungskonstruktionen verbunden. Gleichzeitig führt dies zum Anwachsen der Belastung der Seile, des Schachtturmes und des Fördergefäßes selbst. Es besteht die Notwendigkeit, die Richtlinien festzusetzen, die zum Entwurf einer Bremsanlage benutzt werden, die auf den sogenannten „freien Wegen“ gebaut ist und die die Betriebserfordernisse dem Bremsgefäß gegenüber erfüllt /2/. In diesem Zusammenhang hat man in der Akademie für Bergbau und Hüttenwesen Kraków (Polen) in den letzten Jahren umfangreiche Untersuchungen /3, 4/ durchgeführt, deren Ergebnisse in der folgenden Arbeit dargestellt werden.

2 Verzögerung des notgebremsten Fördergefäßes

Die Fördergefäßbremsanlage soll so konstruiert sein, daß die Verzögerung des gebremsten Gefäßes $2g$ bei Materialtransport oder $1g$ bei Menschenfahrt nicht überschreitet, unabhängig von der Art und Weise der Bremsprozeßrealisierung. Mit Hilfe der Überlegungen in /1, 2/ kann man die Verzö-

gerung des gebremsten Fördergefäßes in der Zeitspanne $0 \leq t \leq l_N/a_N$ mit der folgenden Abhängigkeit beschreiben:

Formel (1) im Anhang

Mit den Größen:

M_1 – Masse von Gefäß und Fördergut

M_0 – reduzierte Massen, die im Schachtturm rotieren

l_1 – Länge der Tragseile zwischen dem gebremsten Fördergefäß im Turm und der Treibscheibe

$A_N E_N$ – Steifheit der Tragseile bei Zugbelastung

$A_W E_W$ – Steifheit der Ausgleichsseile bei Zugbelastung

v_0 – Einfahrtgeschwindigkeit des Fördergefäßes in die Bremsschaltung

a_N, a_W – Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle der elastischen Verformung in den Trag- und Ausgleichsseilen

Für die meisten Förderanlagenkonstruktionen (besonders im Falle des Materialtransportes) ergibt sich der Maximalwert der Verzögerung nach der aus $t = l_N/a_N$ /4/ kürzeren Zeit, das heißt vor Rückkehr der elastischen Verformungswelle in den Seilen. Formel (1) nimmt ein Extremum für die durch die folgende Abhängigkeit bestimmte Zeit an (ohne kleine Glieder):

$$t_m = \frac{\left(\frac{3\pi a}{4} + b\right)^2 - b}{a} \quad (2)$$

Indem man als Kriterium die Nichtüberschreitung der Verzögerung $2g$ durch das Fördergefäß annimmt, können die Parameter der Bremsschaltung als Funktion der Bewegungsparameter der Förderanlage wie folgt beschrieben beschrieben werden:

Formel (3) im Anhang

In den **Bildern 1 bis 3** wurde die Abhängigkeit zwischen dem Wert des Anwachsens der Bremskraft im Schachtturm k geteilt durch die Masse M_1 und der Steifheit des Tragseiles bei Zug $A_N E_N$ geteilt durch M_1 für verschiedene Abhängigkeiten der Massen M_0/M_1 , der Geschwindigkeit des Ziehens v_0 und der Länge des Tragseiles zwischen dem gebremsten Gefäß im Schachtturm und der Treibscheibe l_1 dargestellt. Diese Geschwindigkeit garantiert eine Verzögerung nicht größer als $2g$ des gebremsten Gefäßes. Man beschränkte sich auf die Parameter der Förderanlagen, die im polnischen Bergbau am häufigsten anzutreffen sind, also auf die Geschwindigkeit $v_0=16\text{...}20$ m/s, auf Massenverhältnisse $M_0/M_1=0,8\text{...}1$ und auf die Länge der Tragseile $l_1=30\text{...}40$ m. Diese Parameter gelten hauptsächlich für die Förderanlagen, die für den Materialtransport bestimmt sind. Die Vergrößerung der Steifheit der Tragseilstrecke zwischen dem gebremsten Fördergefäß im Schachtturm und der Treibscheibe um $1/3$ (durch Verkleinerung ihrer Länge von 40 m auf 30 m) ermöglicht die Benutzung einer Bremsschaltung mit einem größeren Wert für den Bremskraftanstieg ($\approx 50\%$). Eine kleinere Geschwindigkeit beim Einfahren des Fördergefäßes in die freie Fahrwegezone ergibt günstigere Bremsverhältnisse. Dadurch wird die Benutzung der Anlage mit größeren Werten für den Anstieg der Bremskraft ermöglicht, ohne die Verzögerung von $2g$ zu überschreiten. Die besten Bremsverhältnisse erreicht man, wenn das Verhältnis der Massen $M_0/M_1=1$ ist. Wesentlich ist, daß die oben beschriebenen Überlegungen die Parameter der Bremsschaltung betreffen, die das Bremsen des Fördergefäßes mit einer Verzögerung gleich $2g$ ermöglichen. Für andere Bewegungsverhältnisse werden diese Parameter viel niedriger sein. Das Verhältnis $(A_N E_N)/M_1$ für die im polnischen Bergbau arbeitenden Förderanlagen schwankt in den Grenzen $0,6 \cdot 10^4$ N/kg bis $1,0 \cdot 10^4$ N/kg und ist hauptsächlich eine Funktion der Tiefe des Materialtransportes. Dagegen ist die Entfernung zwischen dem Zonenanfang der freien Fahrwege und der Treibscheibe mit $l_1=40$ m der maximal in den Schachtturmförderanlagen auftretende Wert.

Aus den eben genannten Überlegungen können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

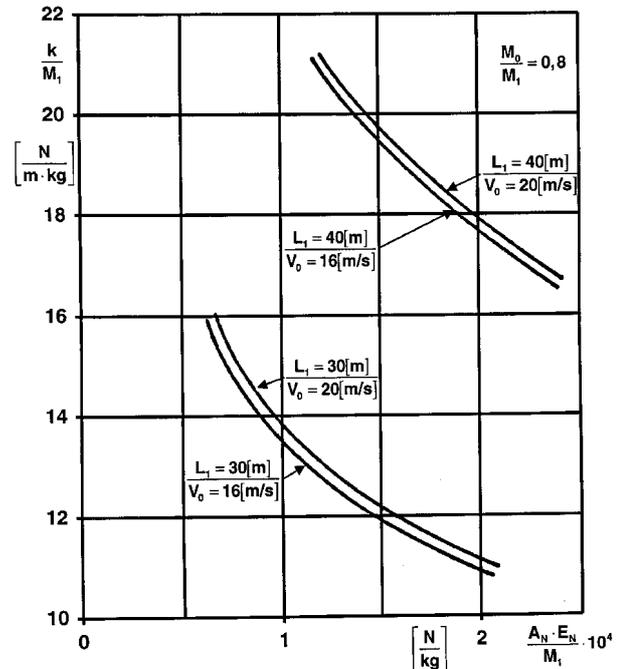


Bild 1: Bezogener Bremskraftanstiegsfaktor in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Tragseile (für $M_0/M_1=0,8$)

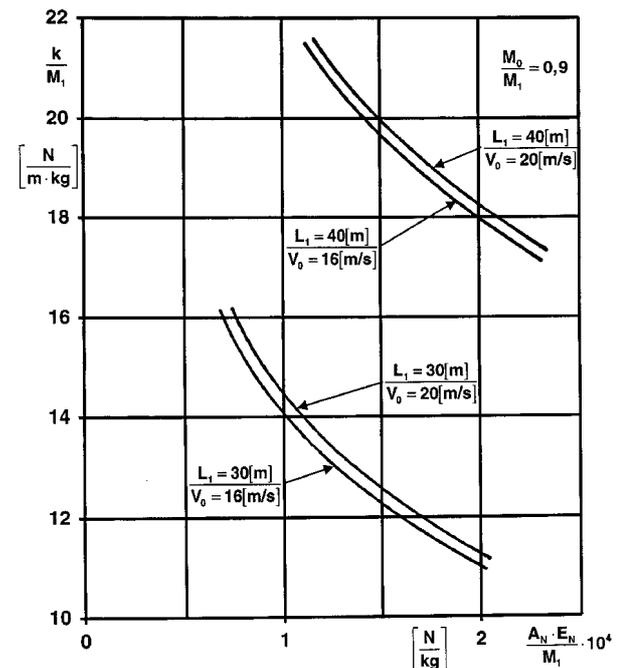


Bild 2: Bezogener Bremskraftanstiegsfaktor in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Tragseile (für $M_0/M_1=0,9$)

Damit die Verzögerung des gebremsten Gefäßes $2g$ nicht überschreitet - für eine Förderanlage, die das Fördergut aus einer Tiefe von 1500 m transportiert, entspricht das: $(A_N E_N)/M_1=1,0 \cdot 10^4$ N/kg bei $M_0/M_1=0,8$ und einer Einfahrtsgeschwindigkeit des Gefäßes von $v_0=20$ m/s und einer Entfernung des Zonenanfangs der freien Fahrwege von der Treibscheibe von $l_1=40$ m. Dann kann man die Brems-

schaltung mit dem Bremskraftanstiegsfaktor $k=14 \cdot M_1$ [N/m] (die Masse M_1 [kg]) benutzen.

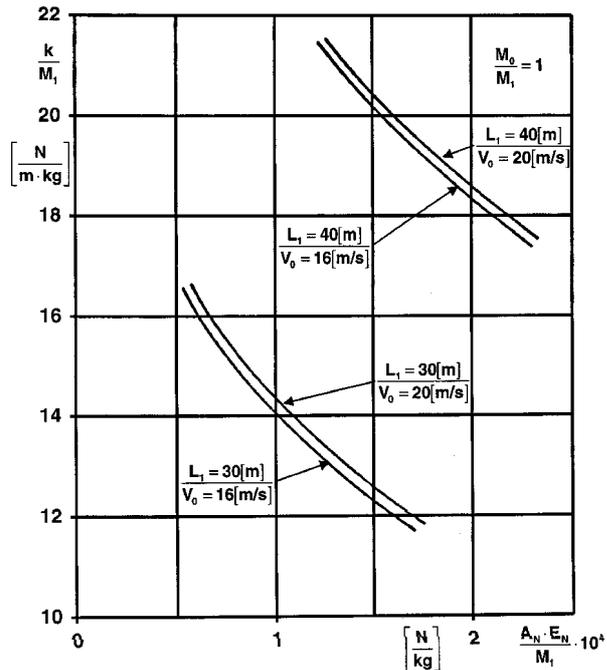


Bild 3: Bezogener Bremskraftanstiegsfaktor in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Tragseile (für $M_0/M_1=1,0$)

Die oben genannten Parameter der Förderanlage gehören zu den maximalen im Betrieb von Förderanlagen. Bei Anlagen mit niedrigeren Bewegungsparametern kann man die Bremsschaltung benutzen, die einen höheren Bremskraftanstiegsfaktor besitzt (mit Hilfe der Parameter aus den Bilder 1-3). In individuellen Fällen können mit Formel (3) die Parameter für Förderanlagen berechnet werden, die nicht in den betrachteten enthalten sind.

3 Belastung der Tragseilstrecke zwischen dem gebremsten Fördergefäß im Schachturm und der Treibscheibe

Die Belastung der Treibseilstrecke zwischen dem gebremsten Fördergefäß im Schachturm und der Treibscheibe kann mit der folgenden Gleichung /3, 4/ beschrieben werden:

$$S_{LN} = \frac{A_N E_N}{l_1 - v_0 t - v(y=0, t)} \Delta l_1 \quad (4)$$

Mit der asymptotischen Annäherungen der Lösungen $u(x,t)$ und $v(y,t)$ (Formeln (2.10 a) und (2.10 b) /4/) ergibt sich:

Formel (5) im Anhang

Der Ausdruck (5) nimmt das Extremum (ohne kleine Glieder) für die durch die Gleichung (3) bestimmte Zeit an. Da der Gegenstand der Analyse Förderanlagen sind, die fast ausschließlich für den Materialtransport bestimmt sind, sind für einen Projektierenden die Werte der maximalen Verzögerungen, denen die Fördergefäße während des Bremsens unterliegen, weniger wesentlich, als eine möglichst geringe Bewegungsstrecke der Gefäße bis zum Moment, wo die Null-Geschwindigkeit erreicht wird, also der sogenannte Bremsweg. Der größere Bremskraftangriff bei den Fördergefäßen verursacht das Anwachsen der Tragseilstrecke zwischen dem gebremsten Gefäß im Schachturm und der Treibscheibe, und damit das Anwachsen seiner Belastung. Um das Abreißen dieses Seiles zu verhindern, muß der Kraftwert in dieser Tragseilstrecke kleiner als die Kraft des Abreißen sein:

$$S_{LN} \leq n \cdot S_{Zr} \quad (6)$$

mit S_{Zr} – Abreißkraft der Tragseile

n – zulässiger Belastungsanteil gegenüber der Abreißkraft

Das Beschränken der Belastung dieser Tragseilstrecke ist eine der Voraussetzungen zur richtigen Wahl der Bremsschaltung. Nachdem die Abhängigkeiten (3) und (5) benutzt worden sind, nimmt der Ausdruck (6) folgende Form an:

Formel (7) im Anhang

Aufgrund der verschiedenen Werte der Abreißkräfte je nach Konstruktion der Tragseile muß die Voraussetzung (7) individuell für jede Förderanlage betrachtet werden.

4 Zusammenfassung

Die Lösungen, die in dieser Arbeit enthalten sind, bilden den Ausgangspunkt für den Entwurf einer Notbremsanlage für Schachtförderanlagen zum Materialtransport. Damit wird die zulässige Verzögerung der Fördergefäße und die Belastung der Seile nicht überschritten.

5 Literatur

- /1/ Siemieniec A., Wolny S.: Dynamische Probleme beim Betrieb der Förderanlagen im Bergbau. Institutsmittellung Nr.16, 1991.
- /2/ Detaillierte Vorschriften für die Verkehrsführung und die Leitung der Lagerstättenwirtschaft in Braun- und Steinkohlebergwerken (in polnisch). Katowice 1984.
- /3/ Wolny S.: Ausgewählte Probleme der Dynamik der Gefahrenbremsung von Schachtfördergefäßen (in polnisch). Wiss. Zeitschrift der AGH Kraków Nr 995. Mechanika z. 7, Kraków 1985.
- /4/ Wolny S.: Theoretische Betrachtungen zum Bremsvorgang von Schachtförderanlagen in Bergbauförderanlagen (in polnisch). Wiss. Zeitschrift der ZN AGH Kraków Nr 112. Mechanika z. 11, Kraków 1987.

$$\frac{\partial^2 u(x=0, t)}{\partial t^2} = e^{-h_2 t} \frac{\frac{k}{M_1} h_2 l_1}{\frac{A_N E_N}{M_1 l_1} \cdot \frac{M_0 + M_1}{M_0}} \left\{ h_2^2 \frac{t + \frac{1}{a}}{t + \frac{b}{a}} \cdot t - 2h_2 + 2h_2 \left(1 + \frac{a}{b} t\right)^{\frac{1}{4}} \right.$$

$$\left. \cos \left[\frac{2}{3a} (at + b)^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3a} b^{\frac{3}{2}} \right] + b^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{a}{b} t\right)^{\frac{3}{4}} \sin \left[\frac{2}{3a} (at + b)^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3a} b^{\frac{3}{2}} \right] \right\} \quad (1)$$

$$a = \frac{A_N E_N}{M_1 l_1} \left(\frac{M_0 + M_1}{M_0} \right) \cdot \frac{v_0}{l_1} \quad b = \frac{A_W E_W}{M_1 l_1} \left(\frac{M_0 + M_1}{M_0} \right) + \frac{k}{M_1} - h_2^2 \quad h_2 = \frac{A_W E_W}{2 \cdot M_1 a_W}$$

$$e^{-h_2 t_m} \frac{\frac{k}{M_1} h_2 l_1}{\frac{A_N E_N}{M_1 l_1} \cdot \frac{M_0 + M_1}{M_0}} \left\{ h_2^2 \frac{t_m + \frac{1}{a}}{t_m + \frac{b}{a}} \cdot t_m - 2h_2 + 2h_2 \left(1 + \frac{a}{b} t_m\right)^{\frac{1}{4}} \right.$$

$$\left. \cos \left[\frac{2}{3a} (at_m + b)^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3a} b^{\frac{3}{2}} \right] + b^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{a}{b} t_m\right)^{\frac{3}{4}} \sin \left[\frac{2}{3a} (at_m + b)^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3a} b^{\frac{3}{2}} \right] \right\} \leq 2g \quad (3)$$

$$\cos \left[\frac{2}{3a} (at_m + b)^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3a} b^{\frac{3}{2}} \right] + b^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{a}{b} t_m\right)^{\frac{3}{4}} \sin \left[\frac{2}{3a} (at_m + b)^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3a} b^{\frac{3}{2}} \right] \leq 2g$$

$$S_{LN(t)} = e^{-\frac{A_W E_W}{2M_1 a_W} t} \frac{\frac{k}{M_1} l_1}{\frac{1 - v_0 t}{M_1 l_1} \cdot \frac{M_0 + M_1}{M_0}} \left\{ \frac{\frac{A_W E_W}{2 \cdot M_1 a_W}}{\left((ab)^{\frac{1}{4}} \left(t + \frac{b}{a} \right)^{\frac{1}{4}} \right)} \sin \left[\frac{2}{3} a^{\frac{1}{2}} \left(t + \frac{b}{a} \right)^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3a} b^{\frac{3}{2}} \right] - t \frac{\frac{A_W E_W}{2 \cdot M_1 a_W} t + 1}{\frac{b}{a} + t} \right\} \quad (5)$$

$$e^{-\frac{A_W E_W}{2M_1 a_W} t_m} \frac{\frac{k}{M_1} l_1}{\frac{A_W E_W}{M_1 l_1} \cdot \frac{M_0 + M_1}{M_0}} \frac{A_N E_N}{l_1 - v_0 t_m} \left\{ \frac{\frac{A_W E_W}{2 \cdot M_1 a_W}}{\left((ab)^{\frac{1}{4}} \left(t_m + \frac{b}{a} \right)^{\frac{1}{4}} \right)} \sin \left[\frac{2}{3} a^{\frac{1}{2}} \left(t_m + \frac{b}{a} \right)^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{3a} b^{\frac{3}{2}} \right] - t_m \frac{\frac{A_W E_W}{2 \cdot M_1 a_W} t_m + 1}{\frac{b}{a} + t_m} \right\} \leq n \cdot S_z \quad (7)$$

Auswertungsmethoden und Analyse der Zuverlässigkeit von Mess- und Informationsanlagen

Khurodze, R.

Die Entwicklung der modernen Mittel für die Sammlung, Umwandlung, Verarbeitung und Übertragung von Daten bietet auf Grund der billigen, kompakten, schnellen und energiesparenden Integralmikroschaltungen die Möglichkeit sehr komplizierte automatisierte Systeme zur Steuerung von Betriebsvorgängen (ASS BV) praktisch zu verwirklichen. Das Problem der ausreichenden Zuverlässigkeit von angebotenen ASS BV ist jedoch bisher noch nicht endgültig gelöst. Deshalb ist die Auswertung und Analyse der Zuverlässigkeit von Mess- und Informationssystemen eine sehr wichtige Aufgabe.

1 Einleitung

Man kann die Steuerungssysteme in drei Klassen je nach Nutzungsbedingungen, vor allem nach der Möglichkeit der Wiederherstellung am Betriebsort, einteilen.

- a) Die Steuerungssysteme (SS), die man in bestimmten Zeiträumen nicht stoppen und im Laufe des Betriebs nicht wiederherstellen darf.
- b) Die Steuerungssysteme, bei denen die Unterbrechung des Betriebs für die Wiederherstellung zulässig ist.
- c) Die Steuerungssysteme, bei denen Reparaturarbeiten ohne Unterbrechung des üblichen Betriebs zulässig sind.

Das quantitative Maß für die Zuverlässigkeit der Analoganlagen ist die Wahrscheinlichkeit des Betriebs ohne zu versagen und mit den Fehlern in zulässigen Grenzen zu bleiben[8].

In diesem Beitrag werden die Aufgaben der Analyse der Gesamtzuverlässigkeit von technischen Komponenten in ASS BV erörtert. Insbesondere werden zwei Modelle zur Gestaltung, Sammlung, Umwandlung und Verarbeitung von Analog-Messdaten in ASS BV betrachtet mit Verwendung: 1) der EDV ohne Strukturreserven; 2) der Analog-EDV mit Reserven.

*

2 Das I. Modell

In einer Anlage zur Messung, Umwandlung und Verarbeitung von Meßdaten in Digitalform gibt es eine eingebaute Kontrollapparatur, die ein Versagen jeder Art mit einer Wahrscheinlichkeit kleiner als 1 erkennen kann. In dieser Anlage können unterschiedliche Ausfälle auftreten: 1) die unvermuteten Ausfälle, die durch das System der Kontrollapparatur im Zeitpunkt der Entstehung erkannt werden können; 2) die von der Kontrollapparatur nicht erkennbaren unvermuteten Ausfälle; 3) erkennbare parametrische (sukzessive) Ausfälle; die Laplace-Transformation der Verteilungsdichte von Zeiträumen zwischen aufeinanderfolgenden sukzessiven Versagen $a_{(s)}$ kann durch parallel-sukzessive Phasen (Schritte) dargestellt werden* [1,3,4]:

Formel (1) im Anhang

hierin ist n - die Anzahl der parallelen Zweige; jeder Zweig besteht aus l_i ($i=1, n$) sukzessiven Phasen; a_{ij} (i - die Zweignummer, j - die Nummer des Schrittes im i -ten Zweig) - die Intensität des entstehenden Versagens; P_i - die Wahrscheinlichkeit des Zutreffens eines Versagens der ersten Phase des i -ten Zweiges nach der Wiederherstellung der aus-

* Zur Erzielung einer erforderlichen Sicherheit des mathematischen Modells ist es erwünscht und manchmal sogar auch nötig, die parametrischen Ausfälle nicht durch ein bestimmtes, sondern durch ein frei ausgewähltes Verteilungsgesetz zu beschreiben. Aber in diesen Fällen entstehen mathematische Schwierigkeiten. Deshalb ist es meist zweckmäßiger eine bekannte effektive Methode zur Approximation der verschiedenen Verteilungsgesetze (darunter auch des Gaußgesetzes) mit parallel-sukzessiven Phasen zu verwenden. Diese Methode gewährleistet die Berechnung von erforderlichen Werten des Variationskoeffizienten mit beliebiger Präzision.

gefallenen Anlage; $\eta(t) = (i, j)$ - der Anlagenzustand nach dem Versagen.

Für die Erkennung von Ausfällen, die durch die Kontrollapparatur nicht erkennbar sind, ist eine periodische sichere Testkontrolle vorgesehen [5-7,9]. Sofort nach dem Erkennen des Versagens setzt die Wiederherstellung der Anlage ein, um ihre Anfangszuverlässigkeit wiederherzustellen. Im Laufe der Wiederherstellung entstehen keine neuen Versagen.

Wir beschreiben den Arbeitsvorgang des Systems als Zufallsprozess $v(t)$. Wenn im Zeitpunkt t das System arbeitsfähig und im Betriebszustand ist, so ist $v(t)=1$. Wenn das System sich im Betriebszustand befindet, aber nicht arbeitsfähig ist, so ist $v(t)=2$. $v(t)=3$ - das System ist arbeitsfähig und wird der periodischen Prüfung unterworfen; $v(t)=4$ - das System ist nicht arbeitsfähig und befindet sich im Zustand der Wiederherstellung. Wir definieren den Zufallsprozess wie folgend: $\varepsilon(t)$ - der Zeitraum vom letzten 0-Zeitpunkt bis zum t -Zeitpunkt. Der 0-Zeitpunkt ist ein Zeitpunkt des Wertwechsels der Funktion $v(t)$; $\eta(t) = (i, j)$ - der Zustand des Systems im t -Zeitpunkt nach dem entstehenden parametrischen Versagen.

Die Bezeichnungen werden wie folgt benutzt:

γ - die Intensität unvermuteter Versagen, die durch laufende Gerätekontrolle erkennbar sind; β - die Intensität unvermuteter Versagen, die durch periodische Kontrolle oder im Laufe der Wiederherstellung erkennbar sind; ν - die Pauschalintensität von Versagen, die im Laufe der periodischen Kontrolle entstehen und bis zum Ende dieser Kontrolle erkannt werden; $G(u)$ - die Verteilungsfunktion (VF) der Wiederherstellungszeit;

$$m(u) = G'(u)/\bar{G}(u), \bar{G}(u) = 1 - G(u);$$

$\Gamma(u)$ - die VF von Zeiträumen der periodischen Kontrolle $b(u)=\Gamma(u)/\Gamma(u), \Gamma(u)=1-\Gamma(u)$; $F(u)$ - die VF von Zeiträumen, wenn sich das System im Zustand $v(t)=1$ befindet und es bis zum Anfang der periodischen Kontrolle nicht versagt;

$$c(u) = F'(u)/\bar{F}(u), \bar{F}(u) = 1 - F(u).$$

Es ist offensichtlich, daß einige der statistischen Ausgangswerte sich je nach dem Systemzustand unterscheiden können. Z.B. α_{ij} - im Betriebszustand vom $\alpha_{i'j'}$ - im Zustand der periodischen Kontrolle.

Für die Beschreibung des Betriebsvorganges eines Systems werden folgende Wahrscheinlichkeiten benutzt:

$$t_{ij}(t, u) du = P\{v(t) = 1, h(t) = (ij), u < e(t) < u + du\}$$

$$t_{ij}(t, u) du = P\{v(t) = 2, h(t) = (ij), u < e(t) < u + du\}$$

$$q_{ij}(t, u) du = P\{v(t) = 3, h(t) = (ij), u < e(t) < u + du\};$$

$$q_{ij}^*(t, u) du = P\{v(t) = 4, h(t) = (ij), u < e(t) < u + du\};$$

$$r(t, u) du = P\{v(t) = 5, u < e(t) < u + du\}.$$

Wenn im Anfangszeitpunkt das System im arbeitsfähigen Zustand und nach dem parametrischen Versagen im (i, j) -Zustand ist, so ist

$$t_{ij}(0, 0) = \delta_{ij} \delta(t)$$

Hierbei ist $\delta(t)$ - die Impulsfunktion; δ_{ij} - das Kroneckerzeichen.

Für die Grenzbedingungen ($u=0$) kann man in bezug auf die eingeführten Wahrscheinlichkeiten folgende Verhältnisse ableiten:

Formeln (2-6) im Anhang

Ausgehend von wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen sind folgende Formeln begründet:

Formeln (7-12) im Anhang

Die Formel (12) stellt die Wahrscheinlichkeit des Übergangs vom System, daß sich im Zeitpunkt $u=0$ nach dem Entstehen des Versagens im (iK) -Zeitpunkt befindet, im $(0, u)$ -Zeitraum in den (ij) -Zustand ($i = 1, n, K = 1, l_i$) dar.

Die Formeln (7)-(11) beschreiben die Unbekannten $\tau_{iK}(t, 0)$, $\tau_{iK}^*(t, 0)$, $q_{iK}(t, 0)$, $q_{iK}^*(t, 0)$ und $r(t, 0)$. Diese Größen werden durch die Gleichungen der Grenzbedingungen bestimmt.

Wenn man die Formeln (7)-(11) in (2)-(6) substituiert und die Laplace-Transformation benutzt, so ergibt sich:

Formeln (13-17) im Anhang

Hier:

$$t_{cd}(s,0) = t_{cd}(t,0); t_{cd}^*(s,0) = t_{cd}^*(t,0); q_{cd}(s,0) = q_{cd}(t,0)$$

$$q_{cd}^*(s,0) = q_{cd}^*(t,0); r_{cd}(s,0) = r_{cd}(t,0);$$

= Zeichen der Laplace-Transformation.

Formeln (18-28) im Anhang

Auf diese Weise entsteht ein System von algebraischen linearen Gleichungen für $t_{ij}(s,0)$ ($i = 1, n, i = 1, l_i$).

Die Anzahl der Gleichungen und Unbekannten beträgt: $\sum_{i=1}^n l_i$.

Die Lösung des Systems (28) unter Berücksichtigung der Formel (27) gibt die Möglichkeit $t_{ij}(s,0)$ ($i = 1, n, i = 1, l_i$) und daraus alle vorher eingeführten Wahrscheinlichkeiten festzustellen.

Das Normierungsverhältnis in Form der Laplace-Transformation:

Formel (29) im Anhang

Die stationären Werte für die betroffenen Wahrscheinlichkeiten werden üblicherweise wie folgt bestimmt:

$$t_{ij}(0) = \lim_{s \rightarrow 0} s t_{ij}(s,0); t_{ij}(u) = \lim_{s \rightarrow 0} s t_{ij}(s,u) = \sum_{K=1}^j t_{iK}(0) \bar{F}(u) |_{iK}^{(ij)}(u) e^{-(b+g)u};$$

$$t_{ij} = \lim_{s \rightarrow 0} s t_{ij}(s) = \sum_{K=1}^j t_{iK}(0) \bar{F}_{iK}^{(ij)}(g+b),$$

analog dazu werden die anderen Wahrscheinlichkeiten berechnet.

Das Gleichungssystem (28) und (29) hat für $t \rightarrow \infty$ die Form:

Formel (30) im Anhang

Es ist leicht zu beweisen, daß.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} t_{ij}(0) = 0$$

Daher ist die Anzahl der unabhängigen Gleichungen eins weniger als die Anzahl von Unbekannten.

Als fehlende Gleichung ist die Normierungsgleichung für den stationären Zustand zu benutzen:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} (t_{ij} + t_{ij}^* + q_{ij} + q_{ij}^*) + r = 1$$

Hier

$$r(0) = \lim_{s \rightarrow 0} sr(s,0); r = \lim_{s \rightarrow 0} sr(s) = \lim_{s \rightarrow 0} r(0) \frac{1-g(s)}{s} = t_b r(0)$$

t_b - die mathematische Wartezeit bis zur Wiederherstellung der versagten Anlage.

Es ist klar, daß der Koeffizient der Betriebsbereitschaft folgende Form hat:

$$K_{\Gamma} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} t_{ij}$$

Ferner betrachten wir die Auswertemethoden zur Zuverlässigkeit der Gesamt-Messanlage (KMA), d.h. mehrere primäre Meßanlagen zur Messung einer Bezugsgröße werden zu einem Komplex, mit dem Ziel der Erhöhung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit zusammengeschlossen.

Es gibt zwei Möglichkeiten zum Aufbau von KMA. Die erste: die Meßdaten werden automatisch nach einem bestimmten Algorithmus mit der Hilfe von EDVA verarbeitet. Bei der zweiten Möglichkeit für die Verarbeitung von Meßdaten wird die Analogtechnik eingesetzt.

In diesem Beitrag werden nur die Verfahren der Verarbeitung von Meßdaten in Analogform und die Reserven zur Sicherung bei unvermutetem Versagen behandelt.

Es gibt mehrere Algorithmen zur Verarbeitung von Meßdaten und Erhöhung ihrer Zuverlässigkeit und Genauigkeit. Die Verarbeitung der Angaben von Bestandteilen der KMA nach dem linearen (ziemlich einfachen) Algorithmus gewährleistet die erforderliche Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Messdaten bei Versagen der einzelnen Meßanlagen nicht. Der nichtlineare Algorithmus kann die erforderliche Zuverlässigkeit und Genauigkeit sichern, aber er erfordert die Verwendung von EDVA oder besonderen technischen Mitteln (die Geräte zur Wiederherstellung der Daten). Die wesentliche Erhöhung der Zuverlässigkeit wird durch die Verwendung (im Rahmen des Algorithmus der Verarbeitung von Messdaten) logischer Operation erreicht, die die Angaben von Meßanlagen vergleichen und die

stark abweichenden Angaben weniger Anlagen ausschliessen.

Dabei ist anzunehmen, daß die ausgeschlossenen Anlagen zu den fehlerhaften Bestandteilen der KMA gehören. Diese Operation gleicht der in der Metrologie bekannten Operation, die grobe Fehler aus den Mengen von statistischen Angaben ausschliessen.

Dies sind die suboptimalen Algorithmen, die durch eine unkomplizierte Apparatur realisiert werden können.

Unter vielen Varianten von suboptimalen Algorithmen hat der Algorithmus der Medianenwahl besondere Bedeutung. Er ist bei Aufgaben zur Erhöhung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit sehr effektiv [2]. Bei einer ungeraden Anzahl (N) von Meßanlagen sind die Medianen dem Mittelwert der Varitionsreihe gleich.

Wenn die Meßanlagen so numeriert werden, daß die Momentanwerte nach ihren Werten eine steigende Varitionsreihe bilden (die Zahl N ist ungerade):

$$y_1 < y_2 < \dots < \frac{y_{N+1}}{2} < \dots < y_{N-1} < y_N,$$

dann ist der Median der Angabe mit laufender Nummer (N+1)/2 gleich:

$$\text{med}(y_1, y_2, \dots, y_N) = \frac{y_{N+1}}{2}$$

Damit verwirklicht der Algorithmus der Medianenwahl das Abstimmungsprinzip. Das ist beim Aufbau von KMA sehr wichtig.

3 Das 2. Modell

Nehmen wir an, daß die KMA aus funktionierenden (m) und stillstehenden (Reserve) (n-m) Messanlagen besteht (m - ungerade Zahl). Funktionierende Anlagen versagen mit der Intensität α_1 , und die Reserveanlagen mit der Intensität α_2 . Die ausgefallenen MA erreichen nach der Wiederherstellung die ursprüngliche Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Die KMA wird von einer Wartungseinheit kontrolliert. Wenn eine funktionierende Anlage versagt, wird eine Reserveanlage an ihre Stelle sofort eingeschaltet. Die Umschalter werden als absolut zuverlässig angenommen. Die Wiederherstellungszeit der ausgefallenen Anlage ist nach beliebigem Gesetz verteilt.

Wenn die Anzahl von ausgefallenen Meßanlagen (MA) mehr als m wird, so versagt die betroffene

KMA (das System) und sie wird nicht arbeitsfähig [8,10].

Zu jedem Zeitpunkt befinden sich m Anlagen im arbeitsfähigen Zustand. Die Anzahl der nichtarbeitsfähigen MA beträgt nicht mehr als $N = n - m$.

Führen wir folgende Bezeichnungen ein: $G(u)$ - die Verteilungsfunktion für die Wahrscheinlichkeit (VFW) der Wiederherstellungszeit; $R_K(t)$ - die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses, daß die Anzahl von nichtarbeitsfähigen Anlagen im Zeitpunkt t in einer KMA K beträgt ($K=0, N$); $r_K(t, u) du$ - die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses, daß die Anzahl von nichtarbeitsfähigen MA im Zeitpunkt t K beträgt. Eine Meßanlage wird im Zeitraum ζ ($u < \zeta < u + du$) wiederhergestellt.

$$g(u) = G'(u); P(u) = G'(u) / [1 - G(u)];$$

$$a_i = m \cdot \gamma_i + (i - m) a_2;$$

$N = n - m + 1$ - die Anzahl von nichtarbeitsfähigen MA, bei der das System versagt. Auf Grund des betrachteten Modells kann man als spezielle Fälle auch folgende Sondermodelle beschreiben:

- 1) belastete Reserve mit Ersetzung ($\alpha_1 = \alpha_2$);
- 2) unbelastete Reserve mit Ersetzung ($\alpha_2 = 0$);
- 3) ständige Reserve ohne Ersetzung ($n = m$);
- 4) die Reserve ohne Wiederherstellung.

Es sind auch andere Möglichkeiten zur Reservierung möglich.

Ausgehend von den üblichen wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen über eventuelle Veränderungen von Zuständen des Systems in kleinen Zeiträumen ($t, t+h$), kann man mit Verwendung von Halb-Markow-Prozessen das folgende System der Differentialgleichungen zusammensetzen:

Formeln (31-35) im Anhang

Hierbei ist $I_i^{(j)}(u)$ - die Wahrscheinlichkeit des Ereignis, daß die KMA zum Zeitpunkt t, i nichtarbeitsfähige Anlagen umfasst und ihre Anzahl im Zeitpunkt t auf j ansteigt ($j \geq i$):

$$I_i^{(j)}(u) = \int_0^u a_i e^{-a_i n} I_{i+1}^{(j)}(u - n) dn$$

Der wahrscheinlichkeitstheoretische Sinn der Formel (35) läßt sich wie folgt erklären. Es handelt sich hierbei um die Wahrscheinlichkeit des folgenden zusammengesetzten Ereignisses: im Zeitpunkt t-u

(der Anfangsmoment der Wiederherstellung der nächstfolgenden nichtarbeitsfähigen MA) beträgt die Gesamtzahl von nichtarbeitsfähigen MA-v ($v=1, K$).

Eine solche MA wird im Zeitraum ζ ($u < \zeta < u + du$) wiederhergestellt. In der Zeit u nahm die Anzahl von nichtarbeitsfähigen MA auf K ($K > v$) zu.

Benutzt man die Laplace-Transformation und leitet die Formeln ab:

Formeln (36-38) im Anhang

Das System der Gleichungen (38) umfaßt N Gleichungen und N Unbekannte: $R_0(s), rK(s,0)$ ($K=1, N-1$). Durch die erste Gleichung des Systems (39) kann man die Formel bilden:

$$r_1(s,0) = \frac{(s + a_n)R_0(s) - 1}{g_{n-1}^{(n-1)}(s)}$$

und dann substituiert man diese in die weiteren Gleichungen (38) und löst sie. Die Gleichungen mit den laufenden Nummern ($N-2$) werden für die Bestimmung $R_0(s)$ benutzt.

Die Lösung des Systems (38) ist einfach und deshalb soll sie hier nicht beschrieben werden. Danach bestimmt man den Mittelwert der Betriebszeit für jedes Versagen oder den durchschnittlichen Zeitraum bis die KMA in nichtarbeitsfähigem Zustand ist. Laut (38)

$$R_N(s) = \frac{a_{n-N+1}R_{N-1}(s)}{s};$$

Da $R_N(s) = \int_0^\infty e^{-st}R_N(t)dt$ gibt es folgendes Verhältnis:

hältnis:

$$sR_N(s) - R_N(0) = \int_0^\infty e^{-st}R'_N(t)dt \quad (R_N(0) = 0)$$

$$\text{oder } sR_N(s) \Big|_{s=0} = - \int_0^\infty tR'_N(t)dt.$$

Damit ist $T_{CHO} = -sR_N(s) \Big|_{s=0}$ - das Zeichen des Differentialquotienten (hier und in der Folge).

Analog kann der zweite Moment und die Dispersion ausgerechnet werden.

Die Zuverlässigkeitsindizes für ein nichtwiederherstellbares System erhält man durch das Substituieren des Wertes τ_b (die Mittelzeit der Wiederherstellung), der der Grenzwert in obengenannte Formeln gleich ist, d.h. $t_b = \int_0^\infty tg(t) = \infty$.

Dieses Verhältnis kann in Form der Laplace-Transformationen dargestellt werden, wie $g(s)=0$. In diesem Fall sieht das System der Gleichungen (38) so aus:

Formeln (39 ff.) im Anhang

Nachfolgend wird ein Beispiel zur Verwendung der Formeln des 2. Modells dargestellt.

Formeln (40 ff.) und Beispiele im Anhang

Diese Ergebnisse bestätigen die Korrektheit der angewendeten Verallgemeinerung von herkömmlichen Modellen zur Berechnung der Zuverlässigkeit und lässt sie selbst für die Berechnung von praktischen Systemen wichtig erscheinen. Zum Schluß soll noch betont werden, daß die Realzeit der Umschaltung von Reserveanlagen und die beschränkte Zuverlässigkeit des umschaltenden Organs die Grundsätze der angegebenen Methode nicht berührt und nur betroffene Formeln und Transformationen kompliziert.

4 Literatur

- /1/ R. Barlow, F. Proschan. Mathematical theory of Reliability. New York, London, Sydney, 1964, 488 p.
- /2/ D.A. Braslawskij, W.W. Petrow. Die Genauigkeit von Meßanlagen. Moskau, Maschinenbau Verlag, 1976, 311 s. (In russischer Sprache).
- /3/ W.W. Gnedenko. Die Fragen der mathematischen Zuverlässigkeitstheorie. Moskau, "Radio und Fernmeldewesen"-Verlag, 1983, 376 S. (In russischer Sprache).
- /4/ D.R. Cox, W.L. Smith. Renewal theory. New York: John Wiley and sons inc, 1961, 299p.

- /5/ I.S. Mikadze. Reliability of a monitored system. Plenum Publishing Corporation New York 1985, pp. 815-820 (Translated from Avtomatika I Telemekhanika, No. 6, pp. 160-166, 1985).
- /6/ I.S. Mikadze. A Queueing System with an Unreliable served and periodic checking. Plenum publishing Corporation, New York, 1988, pp. 68-75 (Translated from "Kybernetika", No. 1, pp. 56-61, 1988).
- /7/ K. Reinschke. Modelle zur Zuverlässigkeits- und Empfindlichkeitsanalyse von Systemen. VEB Technik Verlag, Berlin, 1974, 453 S.
- /8/ R.A. Khurodse. Parametrisches Versagen von Analoggeräten und Strukturmethoden ihrer Verminderung. Hochschule für Technik, Karlsruhe, 1997, 93 S.
- /9/ R.A. Khurodze, I.S. Mikadze, S.S. Natschkebia. Die Analyse der Zuverlässigkeit und Genauigkeit von Mess- und Datenanlagen. Georgian Engineering News, Tbilisi, No. 4, 1997, pp. 59-68. (In russischer Sprache).
- /10/ R.A. Khurodze, I.S. Mikadze, S.S. Natschkebia. Die Methoden zur Auswertung der Zuverlässigkeit von Komplexmeßanlagen. Georgian Engineering News, Tbilisi, No. 4, 1997. (In russischer Sprache).

Anhang – Formeln und Beispiele

$$a(s) = \sum_{i=1}^n P_i \prod_{j=1}^{l_i} a_{ij} / (s + a_{ij}), \quad \sum_{i=1}^n P_i = 1 \quad (1)$$

$$\tau_{ij}(t, 0) = \delta_j P_i \int_0^t r(t, u) \mu(u) du + \int_0^t q_{ij}(t, u) b(u) du + \delta_{ij} \delta(t); \quad (2)$$

$$\tau_{ij}^*(t, 0) = 0; \quad (3)$$

$$q_{ij}(t, 0) = \int_0^t \tau_{ij}(t, u) c(u) du \quad (4)$$

$$q_{ij}^*(t, 0) = \int_0^t \tau_{ij}^*(t, u) c(u) du \quad (5)$$

$$r(t, 0) = \gamma \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} \int_0^t [\tau_{ij}(t, u) + \tau_{ij}^*(t, u)] +$$

$$\sum_{i=1}^n a_{ii} \int_0^t [t_{ii}(t, u) + t_{ii}^*(t, u)] du + \sum_{i=1}^n a_{ii}^0 \int_0^t [q_{ii}(t, u) + q_{ii}^*(t, u)] du +$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} \int_0^t q_{ij}^*(t, u) b(u) du; \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, l_i}. \quad (6)$$

$$\tau_{ij}(t, u) = \sum_{K=1}^j \tau_{iK}(t - u, 0) \bar{F}(u) e^{-(\beta + \gamma)u} I_{iK}^{(ij)}(u) ; \tag{7}$$

$$\tau_{ij}^*(t, u) = \sum_{K=1}^j \tau_{iK}(t - u, 0) \bar{F}(u) e^{-\gamma u} (1 - e^{-\beta u}) I_{iK}^{(ij)}(u) ; \tag{8}$$

$$q_{ij}(t, u) = \sum_{K=1}^j q_{iK}(t - u, 0) \bar{\Gamma}(u) e^{-\nu u} \tilde{I}_{iK}^{(ij)}(u) ; \tag{9}$$

$$q_{ij}^*(t, u) = \sum_{K=1}^j q_{iK}(t - u, 0) \bar{\Gamma}(u) \tilde{I}_{iK}^{(ij)}(u) (1 - e^{-\nu u}) + \sum_{K=1}^j q_{iK}^*(t - u, 0) \Gamma(u) I_{iK}^{(ij)}(u) ; \tag{10}$$

$$r(t, u) = r(t - u, 0) \bar{G}(u) ; i = \overline{1, n}, j = \overline{1, l_i} ; \tag{11}$$

Hier:

$$I_{iK}^{(ij)}(u) = \int_0^u \alpha_{iK} e^{-\alpha_{iK} v} I_{i, K+1}^{(ij)}(u - v) dv ; I_{iK}^{(i)}(u) = \int_0^u \alpha_{iK}^0 e^{-\alpha_{iK}^0 v} \tilde{I}_{i, K+1}^{(ij)}(u - v) dv \tag{12}$$

$$t_{ij}(s, 0) = d_{j1} r(s, 0) P g(s) + \sum_{K=1}^j q_{iK}(s, 0) g_{iK}^{(ij)}(s + n) + d_{i1} d_{jT} ; \tag{13}$$

$$t_{ij}^*(s, 0) = 0 ; \tag{14}$$

$$q_{ij}(s, 0) = \sum_{m=1}^j t_{im}(s, 0) f_{im}^{(ij)}(s + b + g) ; \tag{15}$$

$$q_{ij}^*(s, 0) = \sum_{m=1}^j t_{im}(s, 0) [f_{im}^{(ij)}(s + g) - f_{im}^{(ij)}(s + b + g)] ; \tag{16}$$

$$r(s, 0) = g \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} [t_{ij}(s) + t_{ij}^*(s)] + \sum_{i=1}^n [a_{i l_i}^0 (q_{i l_i}(s) + q_{i l_i}^*(s))] + \sum_{i=1}^n [a_{i l_i} (t_{i l_i}(s) + t_{i l_i}^*(s))] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} \sum_{K=1}^j [q_{iK}(s, 0) (g_{iK}^{(ij)}(s) - g_{iK}^{(ij)}(s + n)) + q_{iK}^*(s, 0) g_{iK}^{(ij)}(s)] ; i = \overline{1, n}, j = \overline{1, l_i} . \tag{17}$$

$$t_{cd}(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} \int_0^t t_{cd}(t,u) du = \int_0^{\infty} e^{-st} dt \int_0^t \sum_{K=1}^d t_{cK}(t-u,0) \bar{F}(u) x \quad (18)$$

$$x e^{-(b+g)u} l_{cK}^{(cd)}(u) = \sum_{K=1}^d t_{cK}(s,0) \bar{F}_{cK}^{(cd)}(s + \mathbf{b} + \mathbf{g}) ;$$

$$t_{cd}^*(s) = \sum_{K=1}^d t_{cK}(s,0) \left[\bar{F}_{cK}^{(cd)}(s + \mathbf{g}) - \bar{F}_{cK}^{(cd)}(s + \mathbf{b} + \mathbf{g}) \right]. \quad (19)$$

Analog:

$$q_{cd}(s) = \sum_{K=1}^d q_{cK}(s,0) \bar{\Gamma}_{cK}^{(cd)}(s + \mathbf{n}) ; \quad (20)$$

$$q_{cd}^*(s) = \sum_{K=1}^d q_{cK}(s,0) \left[\bar{\Gamma}_{cK}^{(cd)}(s) - \bar{\Gamma}_{cK}^{(cd)}(s + \mathbf{n}) \right] + \sum_{K=1}^d q_{cK}^*(s,0) \bar{\Gamma}_{cK}^{(cd)}(s) ; \quad (21)$$

$$r(s) = \frac{[1 - g(s)] r(s,0)}{s}; g(s) = G'(t) ; \quad (22)$$

$$f_{ik}^{(ij)}(s) = l_{ik}^{(ij)}(u) F'(u); g_{ik}^{(ij)}(s) = \tilde{l}_{ik}^{(ij)}(u) \bar{\Gamma}'(u); g(s) = \Gamma'(u) ;$$

$$\bar{\Gamma}(s) = \frac{1 - g(s)}{s}; f(s) = F'(u); \bar{F}(s) = \frac{1 - f(s)}{s} ;$$

$$\bar{F}_{ik}^{(ij)}(s) = \bar{F}(u) l_{ik}^{(ij)}(u); \bar{\Gamma}_{ik}^{(ij)}(s) = \bar{\Gamma}(u) l_{ik}^{(ij)}(u) .$$

Wenn folgende Bezeichnungen eingeführt werden:

$$l_{ik}^{(ij)}(u) = l_{ik}^{(ij)}(s) = \frac{1}{s + \mathbf{a}_{ij}} \prod_{c=K}^{j-1} \frac{\mathbf{a}_{ic}}{s + \mathbf{a}_{ic}}; \tilde{l}_{ik}^{(ij)}(u) = \tilde{l}_{ik}^{(ij)}(s) = \frac{1}{s + \mathbf{a}_{ij}^0} \prod_{c=K}^{j-1} \frac{\mathbf{a}_{ic}^0}{s + \mathbf{a}_{ic}^0} ,$$

dann

$$\bar{F}_{ik}^{(ij)}(s) = \left(\prod_{c=K}^{j-1} \mathbf{a}_{ic} \right) \left\{ \left[\left(\frac{1 - f(s + \mathbf{a}_{ij})}{s + \mathbf{a}_{ij}} \right) \prod_{c=K}^{j-1} \frac{1}{\mathbf{a}_{ic} - \mathbf{a}_{ij}} \right] + \right.$$

$$+ \sum_{p=K}^{j-1} \left[\left(\frac{1-f(s+a_{ip})}{s+a_{ip}} \right) \frac{1}{a_{ij}-a_{ip}} \prod_{c=K}^{j-1} \frac{1}{a_{ic}-a_{ip}} \right] \}; \tag{23}$$

$$f_{iK}^{(ij)}(s) = \left(\prod_{c=K}^{j-1} a_{ic} \right) \left\{ \left[f(s+a_{ij}) \prod_{c=K}^{j-1} \frac{1}{a_{ic}-a_{ij}} \right] + \sum_{p=K}^{j-1} \left[\frac{f(s+a_{ip})}{a_{ij}-a_{ip}} \prod_{\substack{c=K \\ c \neq p}}^{j-1} \frac{1}{a_{ic}-a_{ip}} \right] \right\}; \tag{24}$$

$$\bar{\Gamma}_{iK}^{(ij)}(s) = \left(\prod_{c=K}^{j-1} a_{ic}^0 \right) \left\{ \left[\left(\frac{1-g(s+a_{ij}^0)}{s+a_{ij}^0} \right) \prod_{c=K}^{j-1} \frac{1}{a_{ic}^0-a_{ij}^0} \right] + \sum_{p=K}^{j-1} \left[\left(\frac{1-g(s+a_{ip}^0)}{s+a_{ip}^0} \right) \frac{1}{a_{ij}^0-a_{ip}^0} \prod_{c=K}^{j-1} \frac{1}{a_{ic}^0-a_{ip}^0} \right] \right\}; \tag{25}$$

$$g_{iK}^{(ij)}(s) = \left(\prod_{c=K}^{j-1} a_{ic}^0 \right) \left\{ \left[g(s+a_{ij}^0) \prod_{c=K}^{j-1} \frac{1}{a_{ic}^0-a_{ij}^0} \right] + \sum_{p=K}^{j-1} \left[\frac{g(s+a_{ip}^0)}{a_{ij}^0-a_{ip}^0} \prod_{c=K}^{j-1} \frac{1}{a_{ic}^0-a_{ip}^0} \right] \right\}; \tag{26}$$

Nach der unkomplizierten Transformation der Gleichungen (13) und (14) erhält man:

$$r(s,0) = \sum_{i=1}^n \sum_{K=1}^{l_i} \sum_{m=1}^K \left\{ \left[g \bar{F}_{im}^{(iK)}(s+g) + a_{il_i}^0 \bar{\Gamma}_{iK}^{(il_i)}(s) f_{im}^{(iK)}(s+g) \right] t_{im}(s,0) + \sum_{c=1}^m \left[g_{im}^{(iK)}(s) f_{ic}^{(im)}(s+g) - g_{ic}^{(im)}(s+g) - g_{im}^{(iK)}(s+n) f_{ic}^{(im)}(s+b+g) \right] t_{ic}(s,0) \right\} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^{l_i} \left[a_{il_i} \bar{F}_{im}^{(il_i)}(s+g) t_{im}(s,0) \right]; \tag{27}$$

$$t_{ij}(s,0) = d_{jl} r(s,0) g(s) P_i + \sum_{K=1}^j \left[g_{iK}^{(ij)}(s+n) \sum_{m=1}^K f_{im}^{(iK)}(s+b * g) t_{im}(s,0) + d_{il} d_{jl} \right]; \tag{28}$$

$$i = 1, n, i = 1, l_i$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l [t_{ij}(s) + t_{ij}^*(s) + q_{ij}(s) + q_{ij}^*(s)] + r(s) = \frac{1}{s} \quad (29)$$

$$t_{ij}(0) = d_{j1} r(0) P_i + \sum_{K=1}^j \left[g_{iK}^{(ij)}(\mathbf{n}) \sum_{m=1}^K f_{im}^{(iK)}(\mathbf{b} + \mathbf{g}) t_{im}(0) \right], i = \overline{1, n}, i = \overline{1, l_i} \quad (30)$$

$$R'_0(t) = -a_n R_0(t) + \int_0^t r_1(t, u) \mathbf{m}(u) du ; \quad (31)$$

$$\frac{\partial r_K(t, u)}{\partial t} + \frac{\partial r_K(t, u)}{\partial u} = -(a_{n-K} + \mathbf{m}(u)) r_K(t, u) + (1 - d_{iK}) a_{n-K+1} r_{K-1}(t, u), \quad (32)$$

$$K = \overline{1, N-1} ;$$

$$R'_N(t) = a_{n-N+1} R_{N-1}(t); \quad (33)$$

Das Normierungsverhältnis sieht wie folgt aus:

$$\sum_{K=0}^N R_K(t) = 1 .$$

Hier:

$$R_K(t) = \int_0^t r_K(t, u) du, K = \overline{1, N} ;$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R_K(t) = 0, K = \overline{0, N-1}, \lim_{t \rightarrow \infty} R_N(t) = 1 .$$

Die Grenzbedingungen:

$$r_1(t, 0) = a_n R_0(t) + \int_0^t r_2(t, u) \mathbf{m}(u) du ;$$

$$r_K(t, 0) = \int_0^t r_{K+1}(t, u) \mathbf{m}(u) du, K = \overline{2, N-2} ;$$

$$r_{N-1}(t, 0) = 0; r_N(t, 0) = 0 \quad (34)$$

Es seien im Anfangsmoment sämtliche MA arbeitsfähig, d.h.

$$R_0(0) = 1; R_K(0) = 0, K \neq 0.$$

Die Lösung des Systems (33) sieht folgendermaßen aus:

$$r_k(t, u) = \sum_{n=1}^K r_n(t - u, 0) \bar{G}(u) l_{n-n}^{(n-K)}(u), K = \overline{1, N-1}. \tag{35}$$

$$R_K(s) = \int_0^\infty e^{-st} dt \int_0^t r_K(t, u) du = \sum_{n=1}^K \bar{G}_{n-n}^{(n-K)}(s) r_n(s, 0), K = \overline{1, N-1} \tag{36}$$

$$R_{N-1}(s) = \sum_{n=1}^{N-1} \bar{G}_{n-n}^{(n-N+1)}(s) r_n(s, 0)$$

$$sR_N(s) = a_{n-N+1} R_{N-1}(s) \tag{37}$$

Hier:

$$\bar{G}(s) = \frac{1-g(s)}{s}; l_b^{(c)}(s) = \frac{1}{s+a_c} \prod_{h=c+1}^b \frac{a_h}{s+a_h};$$

$$\begin{aligned} \bar{G}(u) l_b^{(c)}(u) = \bar{G}_b^{(c)}(s) = & \left(\prod_{h=c+1}^b a_h \right) \left\{ \left(\frac{1-g(s+a_c)}{s+a_c} \prod_{h=c+1}^b \frac{1}{a_h - a_c} \right) + \right. \\ & \left. + \sum_{p=c+1}^b \left[\frac{1-g(s+a_p)}{(s+a_p)(a_c - a_p)} \prod_{\substack{h=c+1 \\ h \neq p}}^b \frac{1}{a_h - a_p} \right] \right\}; \end{aligned}$$

$$g(t) = g(s).$$

Das Normierungsverhältnis in Form der Laplace-Transformationen:

$$\sum_{K=0}^N R_K(s) = \frac{1}{s}$$

Wenn man die Formel (35) in (31) und in das System (34) substituiert und die Laplace-Transformationen anwendet, erhält man:

$$\left\{ \begin{array}{l} sR_0(s) - 1 = -a_n R_0(s) + g_{n-1}^{(n-1)}(s) r_1(s, 0); \\ r_1(s, 0) = a_n R_0(s) + \sum_{n=1}^2 g_{n-n}^{(n-2)}(s) r_n(s, 0); \\ \dots \dots \dots \\ r_k(s, 0) = \sum_{n=1}^{K+1} g_{n-n}^{(n-K-1)}(s) r_n(s, 0), K = \overline{2, N-2}; \\ r_{N-1}(s, 0) = 0 \\ R_N(s) = \frac{a_{n-N+1} R_{N-1}(s)}{s} \end{array} \right. \quad (38)$$

Hier

$$G'(u)|_b^{(c)}(u) = g_b^{(c)}(s) = \left(\prod_{h=c+1}^b a_h \right) \left[\frac{g(s+a_c)}{\prod_{h=c+1}^b (a_h - a_c)} + \sum_{p=c+1}^b \frac{g(s+a_p)}{a_c - a_p} \prod_{\substack{h=c+1 \\ h \neq p}}^b \frac{1}{a_h - a_p} \right].$$

$$\left\{ \begin{array}{l} sR_0(s) - 1 = -a_n R_0(s); \\ r_1(s, 0) = a_n (R_0(s)); \\ r_k(s, 0) = 0, K = \overline{(2, N-1)}; \\ R_K(s) = \tilde{G}_{n-1}^{(n-K)}(s) r_1(s, 0), K = \overline{1, N-1}; \\ sR_N(s) = a_{n-N+1} R_{N-1}(s); \end{array} \right. \quad (39)$$

Hier:

$$\tilde{G}_b^{(c)}(s) = \left(\prod_{h=c+1}^b a_h \right) \left\{ \left(\frac{1}{s+a_c} \prod_{h=c+1}^b \frac{1}{a_h - a_c} \right) + \sum_{p=c+1}^b \left[\frac{1}{(s+a_p)(a_c - a_p)} \prod_{\substack{h=c+1 \\ h \neq p}}^b \frac{1}{a_h - a_p} \right] \right\}.$$

Die mittlere Betriebszeit bis zu einem Versagen kann wie folgend ausgerechnet werden:

$$\begin{aligned} T_{\text{CHO}} &= \left| -sR_N(s) \right|_{s=0} = -a_{n-N+1} R'_{N-1}(0); \\ R'_{N-1} &= r'_1(0,0) \tilde{G}_{n-1}^{(n-N+1)}(0) + \left| \tilde{G}_{n-1}^{(n-N+1)}(s) \right|_{s=0} r_1(0,0); \\ r'_1(0,0) &= -1/a_n; r_1(0,0) = 1; \end{aligned}$$

$$\bar{G}_{n-1}^{(n-N+1)}(0) = \left(\prod_{h=n-N+2}^{n-1} a_h \right) \left\{ \left(\frac{1}{a_{n-N+1}} \prod_{h=n-N+2}^{n-1} \frac{1}{a_h - a_{n-N+1}} \right) + \sum_{p=n-N+2}^{n-1} \left[\frac{1}{a_p (a_{n-N+1} - a_p)} \prod_{\substack{h=n-N+2 \\ h \neq p}}^{n-1} \frac{1}{a_h - a_p} \right] \right\}.$$

Es sei $n=3$; $m=2$; $N=n-m+1=2$.

$$\begin{cases} sR_0(s) - 1 = -a_3 R_0(s) + g(s+a_2)r_1(s,0); \\ r_1(s,0) = a_3 R_0(s); \end{cases} \tag{40}$$

$$r_2(t,0) = 0; r_2(t,u) = 0; a_2 = 2a_1; a_3 = 2a_1 + a_2$$

Als Lösung des Systems (41):

$$R_0(s) = \frac{1}{s+a_3(1-g(s+a_2))}; R_1(s) = \frac{1-g(s+a_2)}{s+a_2} \frac{a_3}{s+a_3(1-g(s+a_2))};$$

$$R_2(s) = \frac{a_2 R_1(s)}{s}; R_0(s) + R_1(s) + R_2(s) = \frac{1}{s}$$

Betrachten wir einige spezielle Fälle. a) Es sei die Wiederherstellungszeit der ausgefallenen MA nach dem Exponentialgesetz verteilt, d.h.

$$G(t) = 1 - \exp(-mt), g(s) = \frac{m}{s+m}.$$

Nach der Substitution und einfachen Transformation:

$$R_0(s) = \frac{s+m+a_2}{s^2 + (a_2 + a_3 + m)s + a_2 a_3}; r_1(s,0) = a_3 R_0(s);$$

$$R_1(s) = \frac{a_3}{s^2 + (a_2 + a_3 + m)s + a_2 a_3}; R_2(s) = \frac{a_2 a_3}{s(s^2 + (a_2 + a_3 + m)s + a_2 a_3)}.$$

Nach der Rücktransformation nach Laplace:

$$R_2(t) = 1 + A_2 e^{s_1 t} + A_3 e^{s_2 t}$$

Hier s_1 und s_2 - die Radizes der Gleichung ;

$$s^2 + (a_2 + a_3 + m)s + a_2 a_3 = 0$$

$$A_2 = \frac{a_2 a_3}{s_1^2 - a_2 a_1} ; A_3 = \frac{a_2 a_3}{s_2^2 - a_2 a_3} ; T_{\text{CHO}} = \int_0^{\infty} (1 - R_2(t)) dt = \frac{A_2}{s_1} + \frac{A_3}{s_2} .$$

b) Nichtwiederherstellbare Reserve ($\mu=0$). Dann

$$s_1 = a_3 ; s_2 = -a_2 ; R_0(s) = \frac{1}{s + a_3} ; R_0(t) = \exp(-a_3 t) ; r_1(s, 0) = \frac{a_3}{s + a_3} ;$$

$$r_1(t, 0) = a_3 \exp(-a_3 t) ; R_1(s) = \frac{a_3}{(s + a_2)(s + a_3)} ;$$

$$R_1(t) = \frac{2a_1 + a_2}{a_2} \{ \exp(-2a_1 t) - \exp[-(2a_1 + a_2)t] \} ;$$

$$R_2(s) = \frac{a_2 a_3}{s(s + a_2)(s + a_3)} ;$$

$$R_2(t) = 1 - \frac{2a_1 + a_2}{a_2} \exp(-2a_1 t) + \frac{2a_1}{a_2} \exp[-(2a_1 + a_2)t] .$$

Es sei $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ (belastete Reserve), dann

$$R_0(t) = p^3 ; R_1(t) = 3p^2(1 - p) ; p = \exp(-at) ,$$

wenn $\alpha_2 = 0$ (unbelastene Reserve), so

$$R_0(t) = \exp(-2a_1 t) ; R_1(t) = \lim_{a_2 \rightarrow 0} (2a_1 + a_2) e^{-2a_1 t} \left(\frac{1 - e^{-a_2 t}}{a_2} \right) =$$

$$= 2a_1 t \exp(-2a_1 t) ;$$

$$R_2(t) = 1 - e^{-2a_1 t} \lim_{a_2 \rightarrow 0} \frac{a_2 + 2a_1(1 - e^{-a_2 t})}{a_2} = 1 - (1 + 2a_1 t) e^{-2a_1 t} .$$

Die Wahrscheinlichkeit der Arbeit ohne Versagen beträgt

$$P(t) = R_0(t) + R_1(t) = 1 - R_2(t) ; T_{\text{CHO}} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{4a_1 + a_2}{2a_1(a_2 + 2a_1)}$$

T_{CHO} bei der belasteten Reservierung beträgt $\frac{5}{6a}$, und bei der unbelasteten $\frac{1}{a_1}$

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 Maschinenelementen und Maschinenteilen
- Konstruktionssystematik
- Rechnereinsatz im Maschinenbau
- Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen
- Maschinenakustik
- Experimentelle Beanspruchungsermittlung und Spannungsoptik
- Technische Normung

Das interdisziplinäre Team am IMW besteht aus ca. 20 wissenschaftlichen Mitarbeitern/-innen aus den Bereichen Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Informatik und Geophysik. Weitere 11 Mitarbeiter/-innen und 7 Auszubildende arbeiten in der Verwaltung, mechanischen und elektrotechnischen Werkstatt.

Technische Ausrüstung

Für die entsprechenden Forschungsschwerpunkte verfügt das IMW über gut ausgestattete Labore (Spannungsoptik, Akustik, CIM), verschiedene maschinentechnische Prüfstände und die notwendige Rechnerausstattung.

Die Untersuchung von Maschinenelementen kann auf zwei hydraulischen Verspannprüfständen, einem Torsions-Schwingprüfstand, einem Umlaufbiege- und Torsionsprüfstand sowie einer statischen Verspanneinrichtung durchgeführt werden. Zur Prüfung fördertechnischer Elemente und Anschlagmittel ist eine Zugprüfmaschine mit integriertem Querprüfgerät und ein Seiltrommelprüfstand vorhanden. Eventuelle berührungslose Übertragungen von Meßwerten werden mit einer 64 Kanal Telemetrieinrichtung bewältigt. Ein Schleuderprüfstand für schnell drehende Maschinenteile (z.B. Rotoren, Abweiseradwindsichter), ein Prüfstand für Feinprallmühlen und eine Reaktions-schwingmühle ergänzen die Prüfeinrichtungen des IMW für Untersuchungen an verfahrenstechnischen Maschinen.

Das Labor für statische Spannungsoptik verfügt über Einrichtungen und Werkstattinfrastruktur für spannungsoptische Untersuchungen an Bauteilmodellen von mikroskopischer Größe bis zu einer Größe von ca. 1 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 4 kHz unterworfen werden. Der Einsatz optischer Ganzfeldmeßverfahren ermöglicht darüber hinaus auch die Visualisierung sich einstellender Beanspruchungszustände, wie sie bei Stoßanregungen auftreten.

Das Akustiklabor am IMW ist mit umfangreichem Meßequipment sowie einem schallarmen Raum zur Erfassung und Auswertung des von Maschinenstrukturen abgestrahlten Schalldruck- und Schalleistungspegels ausgestattet. 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 SolidWorks und Pro/Engineer mit Pro/Manufacturing eingesetzt. Maschinenspezifische Postprozessoren erlauben eine durchgängige CAD/NC-Verfahrenskette. SAP R/3 wird als PPS- und PDM-System genutzt. Als weiteres PDM-System wird CADIM/EDB (Fa. Eigner+Partner) ba-

sierend auf dem Datenbankmanagementsystem ORACLE8i genutzt.

Die Rechnerausstattung umfaßt mehrere Server, die die insgesamt ca. 130 Rechner des Institutes vernetzen. Diese umfassen u.a. verschiedene Internetserver (WWW/FTP), einen Windows NT Server, einen Server für Datenbankdienste und einen Abteilungsserver SUN Enterprise 450 zum Betrieb der 60 SUN Workstations. Als Standardsoftware stehen eine Vielzahl von Programmen zur Verfügung, u. a. die CAD-Pakete ProEngineer und SolidWorks sowie die FEM-Programme MARC/MENTAT und ProMechanica. Zur rechnerintegrierten Produktentwicklung steht ein Intergraphcomputer auf Intel-Architektur mit zugehöriger VR-Software zur Verfügung.

Kooperationsangebote

Das IMW arbeitet in einer Vielzahl von Projekten in enger Kooperation mit namenhaften Industrieunternehmen in allen Tätigkeitsbereichen zusammen:

Entwicklung, Konstruktion und Fertigung

- Entwicklung neuer Konstruktionen (z.B. Prüfstände und Mühlen),
- Gestaltung von Maschinenelementen und Maschinenteilen,
- Fertigungsmöglichkeiten für Prüfkörper und Nullserien,
- Softwareentwicklung zur Simulation und Optimierung von Fertigungsverfahren und zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses.

Versuche, Messungen und Berechnungen

- Durchführung von komplexen Festigkeitsberechnungen und -nachweisen mit Hilfe der FEM (2D/3D),
- Erarbeitung von Berechnungsansätzen für Maschinenelemente
- Schadensfallanalysen
- 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, Untersuchung und Gutachten zur Konstruktion lärmarmen Maschinen,
- Beratung zu Konstruktions- und Patentfragen,
- 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 Fördermaßnahmen 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 folgende Bereiche:

Konstruktion und Berechnung von Maschinenteilen

Neben allgemeinen Fragen der Grundlagen des Maschinenwesens wie Beanspruchungsermittlung, Reibung, Verschleiß und Tragfähigkeit stehen folgende Maschinenelemente besonders im Vordergrund:

- Zahn- und Keilwellen-Verbindungen,
- Spielbehaftete Längsstift-Verbindungen,
- Innenhochdruckgefügte und konventionelle Preßverbindungen mit geometrischen Schwächungen (z.B. Axial- oder Radialbohrungen in Welle und/oder Nabe),
- Torsionssteife Doppelmembrankupplungen mit Ausgleichsfunktion in radialer und axialer Richtung,
- Seiltrommeln (ein- und mehrlagig bewickelt),
- Stahldrahtseile,
- 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 Schnittstellen 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),
- Fehlermöglichkeitseinfluß- und Störfallanalysen,
- 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 Reaktionsmühlen,
- Untersuchung der Zusammenhänge beim Prallmahlen,
- Gestaltung schnell laufender Rotoren (Windsichter/Prallmühlen),
- 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. Für experimentelle Untersuchungen und Entwicklungen zu Körperschall, Schallemission und Körperschallimpedanz- und Dämpfungselementen steht entsprechende Meßwerterfassungs- und Verarbeitungshard- und -software zur Verfügung. Ein weiterer Schwerpunkt bildet die Entwicklung von Konstruktionssystematiken und von Beratungssystemen zur Konstruktion lärmarmen Maschinen.

Veröffentlichungen des Institutes seit dem 1.1.1995

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.; Tan, L.: Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit geschwächter Welle-Nabe-Preßverbindungen. Antriebstechnik 35 (1996), Heft 4 (Teil I) und 5 (Teil II)

Dietz, P.; Ort, A.: Verwendung von Wiederholteil- und Normteilkatalogen nach ISO 13584 "Parts Library" unter Berücksichtigung der Anforderungen in der Konstruktion. VDI Berichte 1289

Dietz, P.: Concurrent Engineering - Implications for Training. 4th Symposium DESIGN 96, 16.-17.5.96 Opatija, Volume I

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

Dietz, P.; Schäfer, G.; Wesolowski, K.: Involute Splines - Load and Wear Behaviour. 4th Symposium DESIGN 96, 16.-17.5.96 Opatija, Volume II

Schmitt, R.; Prengemann, U.: Manufacturing Information System for the Designer. 4th Symposium DESIGN 96, 16.-17.5.96 Opatija, Volume I

Haje, D.: Knowledge Based Systems for the Development of Low-Noise Products. 4th Symposium DESIGN 96, 16.-17.5.96 Opatija, Volume I

Dietz, P.; Klemp, 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

Prengemann, U.; Schmitt, R.: Fertigungserfahrung zur Entscheidungsunterstützung in der Konstruktion

tion, Industrie Management 1/96, Berlin, 1996 (GI-TO)

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

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.; Klemp, 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 envi-

ronment: Initial Concepts, current and future development. Conference PROLAMAT, September 1998, Trento/Italien.

Veröffentlichungen 1999

Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. Peter Dietz. Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, Mai 1999.

Dietz, P.; Haje, D.: Entwicklung lärmarmere Produkte – Rechnergestützte Beratungshilfen für den Konstrukteur. Konstruktion 51 (1999), Heft 7/8.

Schmidt, A.: Untersuchungen zur konstruktiven Einflußnahme auf die Körperschalleitung in ebenen Strukturen. Konstruktion 51 (1999), Heft 7/8.

Dietz, P.: Tragfähigkeitssteigerungen von Maschinenelementen durch teilplastische Verformungen. Konstruktion 51 (1999), Heft 10.

Dietz P.; Grünendick T.: Reaktives Mahlen mit Hochleistungs-Schwingmühlen. Workshop Tribochemie/Reaktives Mahlen, 26.6.1999, DECHEMA e.V., Frankfurt

Dietz, P.; Käferstein, B.; Schmidt, A.: Optische Ganzfeldmeßmethoden und Analogiebildung zur Simulation der Körperschallausbreitung. VDI-Tagung "Maschinenakustik", 9./10.9.1999 Wiesloch, VDI Berichte 1491

Dietz, P.; Gummersbach, F.; Haje, D.: Entwicklung lärmarmere Produkte - Rechnergestützte Beratungshilfen für den Konstrukteur. VDI-Tagung "Maschinenakustik", 9./10.9.1999 Wiesloch, VDI Berichte 1491

Klemp, E.; Hickmann, T.: Rapid Tooling für Serienwerkzeuge? - Ein Test im Vergleich zu herkömmlichem Stahl. Der Stahlformenbauer 16 (1999), Heft 5.

Dignum, V.; Heimannsfeld, K.: Knowledge Management for requirements engineering. 12th Banff Knowledge Acquisition Workshop for knowledge-based systems, Volume 1, Banff, Canada, 1999

Autoren

Beisheim, Nikolai: Jahrgang 1969, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, vom 1.1.1998 bis zum 31.12.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Reibungstechnik und Maschinenkinetik der TU Clausthal, seit 1.1.1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
beisheim@imw.tu-clausthal.de.

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.

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

Düsing, Carsten: Jahrgang 1972, studierte Geophysik an der TU Clausthal, seit 1.2.1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
duesing@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 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 Bundeswehr 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 an der TU Clausthal, seit 1.6.1993 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
gummer@imw.tu-clausthal.de

Heimannsfeld, Klaus: Jahrgang 1968, studierte Informatik an Universität Fridericiana (TH) in Karlsruhe, seit 1.5.1995 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. heimann@imw.tu-clausthal.de

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

Jach-Reinke, Hans-Joachim: Jahrgang 1958, studierte Elektrotechnik/Informationstechnik an der FH Braunschweig/Wolfenbüttel, seit 1.11.1988 technischer Angestellter am IMW.
jachy@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

Klemp, Eric: Jahrgang 1966, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.7.1995 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.
klemp@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 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

Rubio Eire, M. Dolores: Jahrgang 1971, studierte Maschinenbau an der TU Zaragoza/Spanien, seit 1996 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Zaragoza, im Rahmen der Kooperation seit 1993 mehrfacher Gast am IMW. rubio@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

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, 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

Wilke, Kathrin: Jahrgang 1970, studierte Chemieingenieurwesen an der TU Clausthal, seit 1.4.1999 wiss. Mitarbeiterin im Rahmen eines Wiedereinstiegsstipendium am IMW.

wilke@imw.tu-clausthal.de