

Mitteilungen aus dem
Institut für Maschinenwesen
der
Technischen Universität Clausthal
Nr. 32
(Dezember 2007)

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel und Prof. Dr.-Ing. Norbert Müller

Redaktion und Layout:

Dr.-Ing. Günter Schäfer und Dipl.-Math. Bianca Sambale

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

<http://www.imw.tu-clausthal.de>

ISSN 0947-2274

Titelbild:

Institut für Maschinenwesen

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen	
<i>Lau, P.; Schäfer, G.:</i> Der Längenausgleich in Gelenkwellen.....	5
<i>Dietz, P.; Korte, T.:</i> Dynamische Untersuchung von Längsstiftverbindungen	13
<i>Hilgermann, J. L.; Lütkepohl, A.:</i> Gestaltung und Dimensionierung innen-hochdruckgefügter Pressverbindungen	21
<i>Lau, P.; Schäfer, G.:</i> Grundlegende Untersuchungen an Zahnwellen zur Kerbwirkungsermittlung	27
<i>Dietz, P.; Schwarzer, T.:</i> Die Eigenschaften neuer Seilkonstruktionen zur Realisierung von Leichtbauseiltrieben	35
<i>Lütkepohl, A.; Schwarzer, T.; Thoden, D.:</i> Aktuelle Entwicklungen in der Druckkamberechnung.....	45
<i>Dietz, P.; Wächter, M.:</i> Leistungssteigerung von Zahnwellenverbindungen durch Neugestaltung des Zahnprofils	53
Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produkt- entwicklung	
<i>Siemann, E.:</i> Selektives Lasersintern von porösen Entlüftungsstrukturen am Beispiel des Formenbaus	65
<i>Hilgermann, J. L.:</i> Validierung einer FE-Simulation	71
<i>Lohrengel, A.; Ostertag, W.; Sprick, R.:</i> Getriebetechnik, Mechatronik? Ein Vergleich aus der Medizin und Hygieneindustrie.....	77
<i>Schäfer, G.:</i> Vom Multi Material Design zum Finite Elemente Design	91
<i>Bormann, E.; Kramer, W.:</i> Innovation mit Normen und Standards.....	101
<i>Miehe, A.:</i> Produktdatenmanagement (PDM) in der Lehre.....	107

Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik

<i>Dietz, P.; Rolshofen, W.; Schäfer, G.:</i> Grundlast aus Windstrom	115
<i>Seitz, T.:</i> Universelle Schneidengeometrien zur Hausmüllzerkleinerung	121
<i>Kruk, R.; Thoden, D.:</i> Modellierung und Messung des Übertragungsverhaltens von Wälzlagern	127
<i>Korte, T.; Lau, P.; Schäfer, G.; Schwarzer, T.:</i> Erweiterte Prüfstandskapazitäten im IMW	137
<i>Korte, T.; Kruk, R.; Rolshofen, W.:</i> Messung an Lüfterrädern	147
<i>Dietz, P.; Rolshofen, W.; Schäfer, G.:</i> Betrachtungen zum Schwingungsverhalten von Rechteckplatten	153

Lehre und Institutsbetrieb

<i>Schäfer, G.:</i> eLearning am IMW.....	167
<i>Sambale, B.:</i> Duales modularisiertes Masterstudienangebot Maschinenbau / Mechatronik.....	171

Hochschule und Kontakte

<i>Labastida, C.:</i> Fertigung von Zahnrädern in metallischen Ringen durch Walzkaltumformung	185
<i>Wieczorek, A.:</i> Untersuchungen dynamischen Verhaltens von Getrieben mit Standard- und Hochverzahnungen	195
<i>Batko, W.; Felis, J.; Kamisiski, T.; Wierzbicki, J.:</i> Automation of acoustic measurements in an anechoic chamber	202
<i>Sko, A., Wieczorek, A.:</i> Einflussuntersuchung der Aufkohlschichtdicke auf den Abriebverschleiß eines Werkstoffs für Zahnradgetriebe	210
<i>Bormann, E.; Kramer, W.:</i> Präsentation der INS-Basisuntersuchungen auf der 35. Konferenz Normenpraxis in Berlin.....	217

<i>Sambale, B.; Dietz, P.:</i> second year of IMPROVENG	219
<i>Bormann, E.; Kramer, W.; Müller, N.:</i> Strategieworkshop des Ausschuss Normenpraxis im IMW	225

Ausstattung etc.

Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes	229
Veröffentlichungen des Institutes seit dem 1.1.2004	235
Studien- und Diplomarbeiten am Institut im Jahr 2007	241
Autoren.....	243
Anfahrt.....	246

Vorwort

Liebe Freunde und Geschäftspartner des Instituts für Maschinenwesen,

seit Februar ist der „Neue“ im „Dienst“. Herzlich und mit offenen Armen hat man mich empfangen. Ich bin gerne hier im IMW, wo ich vor rund 20 Jahren als Student anfang. So viel über mich. Mein Kollege, Prof. Müller, und ich möchten Sie im Folgenden über aktuelle Entwicklungen an der TU und insbesondere am IMW informieren.

Die Exzellenzinitiative und Sparmaßnahmen wie das HOK haben die Hochschullandschaft verändert. Die TU Clausthal und damit auch das IMW werden sich diesen veränderten Bedingungen anpassen müssen. Fokussierung ist das Stichwort. Konzentrieren wir uns auf drei Chancen, die dieser Wandel bietet.

1. Ausstattung und Erfahrung des IMW auf dem Gebiet der Akustik und Schwingungstechnik sowie die enge Kooperation zwischen Instituten der TU ergeben eine gute Startbasis, um die Integration von Mechanik und Elektronik weiter voranzutreiben. Stichworte wie Mechatronik und Condition Monitoring sind hier zu nennen.

2. Mit der Gründung des EFZN, dem Energieforschungszentrum Niedersachsen in Goslar, ist die TU Clausthal auf dem besten Weg eine Energiehochschule zu werden. Das IMW wird sich im Bereich der Maschinentechnik positionieren können.

3. Durch die Globalisierung gewinnen die weltweite Durchsetzung von Normen und Standards eine zunehmende strategische Bedeutung für den wirtschaftlichen Unternehmenserfolg. Das IMW besitzt hier, durch entsprechende Vorarbeiten, eine sehr gute Ausgangsbasis.

Im Laufe des Jahres wurden mehrere Aktivitäten auf den o. g. Gebieten gestartet und wir sind zuversichtlich, Ihnen in der nächsten Ausgabe einige positive Berichte dazu liefern zu können.

Natürlich wird auch der forcierte Ausbau der klassischen Kernkompetenzen des IMW, die Maschinenelemente, insbesondere die Welle Nabe Verbindungen, Seiltrommeln u. a., dafür sorgen, dass das Institut auch weiterhin als solches erkennbar sein wird. Hier gilt es, die vorhandenen Kompetenzen auf dem Gebiet der Simulation deutlich zu erweitern.

Auch die TU Clausthal steht vor einer großen Herausforderung. Im nächsten Jahr wird sich die NTH gründen. Die NTH, das ist die Niedersächsische Technische Hochschule, ein Zusammenschluss der TU Braunschweig, der TU Clausthal und der Uni Hannover. Die drei Standorte bleiben dabei erhalten.

Darüber hinaus ist der Umbruch von Diplomstudiengängen im Bolognaprozess auf Bachelor- und Masterstrukturen in der Realisierung. Der Studiengang Maschinenbau wird seinen Diplomstudiengang in Clausthal zum WS 09/10 umstellen.

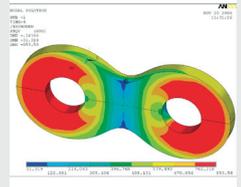
Erfreulich ist die Entwicklung bei den Studienanfängern in den Ingenieurwissenschaften. So hat die TU Clausthal zum WS07/08 bei den Studienanfängern im Studiengang Maschinenbau einen Zuwachs von 25% aufzuweisen. Ein Problem liegt zurzeit in den Absolventenzahlen, die aufgrund der geringeren Anfängerzahlen der letzten Jahre nicht annähernd die Nachfrage aus Industrie und Hochschule decken können.

Der Institutsmitteilung haben wir ein neues Layout gegeben, handlicher und bunter. Wir hoffen, es gefällt Ihnen, viel Spaß bei der Lektüre.

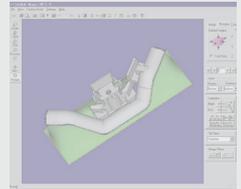
Wir wünschen Ihnen, auch im Namen aller Mitarbeiter, ein gesegnetes Weihnachtsfest und ein gesundes und erfolgreiches Jahr 2008.



Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen



Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung



Systementwicklung, Versuchstechnik und Maschinenakustik



Lehre und Institutsbetrieb



Hochschule und Kontakte



Der Längenausgleich in Gelenkwellen

Lau, P.; Schäfer, G.

Gelenkwellen werden entsprechend ihren mannigfaltigen Einbausituationen durch unterschiedlichste Lastkombinationen beansprucht. Neben den winkelbeweglichen Gelenkenden sind die verzahnten Längenausgleiche besonders zu betrachten. Hier überlagern sich die Beanspruchungen aus Drehmomentübertragung und Biegebelastung. Dieser verschleißkritische Fall soll in umfangreichen Untersuchungen quantifiziert werden.



Cardan shafts are used in many different applications with varying loads. The two cardan joints and especially the splined length compensation are critical elements under both, torsional and bending loads. To determine the life time of such a splined length compensation, the IMW makes experimental and numerical investigations.

1 Wissenschaftliche Problemstellung

Für den axialen Längenausgleich beim Betrieb von Gelenkwellen kann in der Zwischenwelle ein Ausgleichselement in Form einer Zahnwellen-Verbindung /1/ verwendet werden. Der häufigste Grund von Ausfällen bei Gelenkwellen ist der Verschleiß im Längenausgleich durch Reibkorrosion und weitere Formen von Abrasivverschleiß.

Verschleiß an einer Zahnwellen-Verbindung, stellt sich als Folge davon ein Spiel in der Verbindung ein. Im verzahnten Längenausgleich treten dadurch beim umlaufenden Betrieb der Gelenkwelle Knickspiel oder Vibrationen auf. Es kommt zu erhöhten Unwuchten durch Massenverlagerungen, die zum Versagen der Gelenkwelle führen können.

2 Zielsetzung des Vorhabens

Die Hauptziele des Vorhabens bestehen in:

- der experimentellen Bestimmung der Tragfähigkeit und Überprüfung des Betriebsverhaltens von Längenausgleichen in Gelenkwellen unter betriebsüblicher Drehmomentbelastung mit besonderer Berücksichtigung des Beugewinkels, des Längshubes, der Dreh-

frequenz, auftretender Querkräfte und des Knickspiels sowie der axialen Rückstellkräfte bei unterschiedlichen Werkstoffkombinationen.

- der Adaption der bestehenden theoretischen Grundlagen für das Teilsystem Zahnwellen-Verbindung /2/ des Längenausgleichs. Zur Gewährleistung einer Übertragbarkeit der experimentellen Untersuchungsergebnisse auf andere Baugrößen und Betriebslasten sind numerische Untersuchungen vorgesehen.
- der Entwicklung einer Auslegungsrichtlinie für Längenausgleichsprofile von Gelenkwellen unter variablen Werkstoff- und Konstruktionsvarianten. Die Richtlinie soll eine gezielte Bestimmung des Überdeckungsgrades im Längenausgleich bezüglich Drehmomentübertragung, Wuchtverhalten und Verschleißfestigkeit erlauben /3/.

3 Versuchstechnik

Das Hauptaugenmerk liegt bei den Untersuchungen auf den im Betrieb auftretenden Belastungen der Prüfkörper durch eingeleitete Torsion und Querkraft. Da eine praxisnahe Belastung der Gelenkwelle gewünscht ist, wird eine Belastung im Umlaufbetrieb realisiert. Mit der Aufnahme von zwei Prüflingen je Versuchslauf bietet sich ein Prüfstand an, der mit einem geschlossenen Verspannkreis arbeitet.

Zur kontinuierlichen messtechnischen Überwachung des Prüfstands wurde eine Software zur Messwerterfassung und -auswertung erstellt. Der in **Bild 1** dargestellte Screenshot vermittelt einen Eindruck, welche Messwerte das Programm an welcher Stelle abgreift.

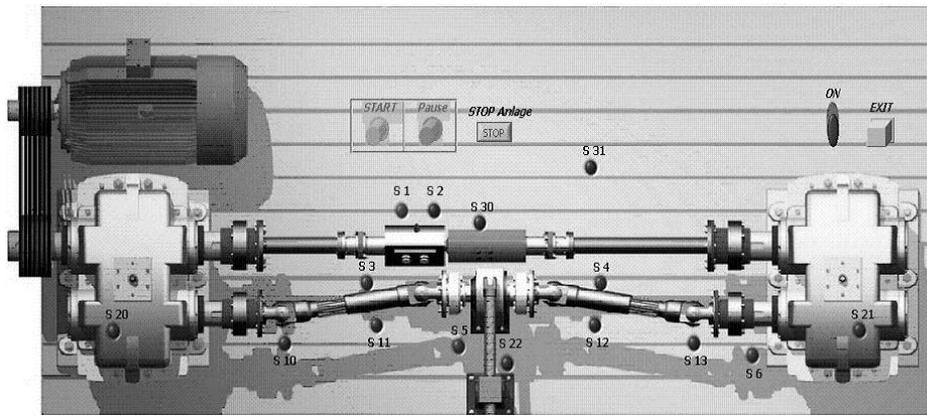


Bild 1: Screenshot des Messwerterfassungs- und Auswertungsprogramms

Jeder einzelne der in **Bild 1** mit „S xx“ beschrifteten kleinen Kreise steht für eine Messstelle, an der entweder die Temperatur (u. a. der Gelenke der Gelenkwellen, der Längenausgleiche, der Umgebung und der Getriebe), der Druck (der Hydraulikversorgung des Verspannmotors), die Drehzahl oder die DMS-Spannungen erfasst werden.

Für die Durchführung der aktuellen Versuche mit Axialverschiebung wurde die bestehende starre Mitteltischlagerung auf einen Schwenktisch umgerüstet. Zur Inbetriebnahme der Schwenktischkonstruktion fanden zwei Messungen statt um die während der Verschiebung in den Längenausgleich auftretenden Kräfte in der Exzenterstange des Schwenktischantriebs und in den Gelenkwellen zu ermitteln. Während der Messungen waren jeweils Gelenkwellen mit leichten Verschleißspuren aus bereits abgeschlossenen Versuchsläufen eingebaut. **Bild 2** gibt einen Überblick über den Messaufbau.

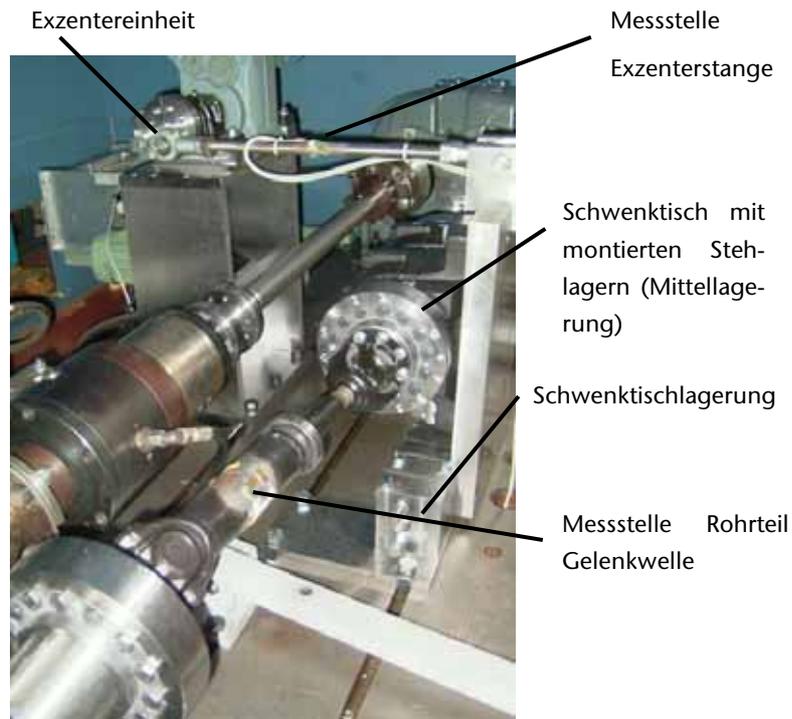


Bild 2: Einbausituation der Längskraftmessstellen

Gegenstand der ersten Messung (I) waren die Axialkräfte in der Exzenterstange bei laufendem Hauptantrieb (die Gelenkwellen rotieren

mit Nenndrehzahl). In einer zweiten Messung (II) wurden die Axialkräfte in der Exzenterstange und in einer der eingebauten Gelenkwellen gemessen. Diese zweite Messung fand wegen des kabelgebundenen Messstellenanschlusses bei ausgeschaltetem Hauptantrieb statt (die Gelenkwellen rotierten nicht). In einer später durchgeführten Messung (III) wurden dann noch die Axialkräfte in den Gelenkwellen telemetrisch und in der Exzenterstange über Kabel bei rotierenden Gelenkwellen gemessen.

Messung I zeigt in **Bild 3**, dass die Axialkräfte in der Exzenterstange bei kaltem Prüfstand und statischer Drehmoment-Verspannung direkt nach dem Zuschalten des Exzenters sinusförmig schwanken (zu Beginn der Phase 1). Im weiteren Betrieb stieg die Amplitude der Schwingung kontinuierlich an, bis nach wenigen Minuten Maximalkräfte erreicht wurden (Ende Phase 1). Mit dem zwischenzeitlichen Lösen der Drehmoment-Verspannung (zu Beginn der Phase 2) fielen die erreichten Amplituden deutlich ab, nahmen nach erneutem Zuschalten der Verspannung (im weiteren Verlauf der Phase 2) analog zum ersten Anstieg aber auch wieder kontinuierlich zu.

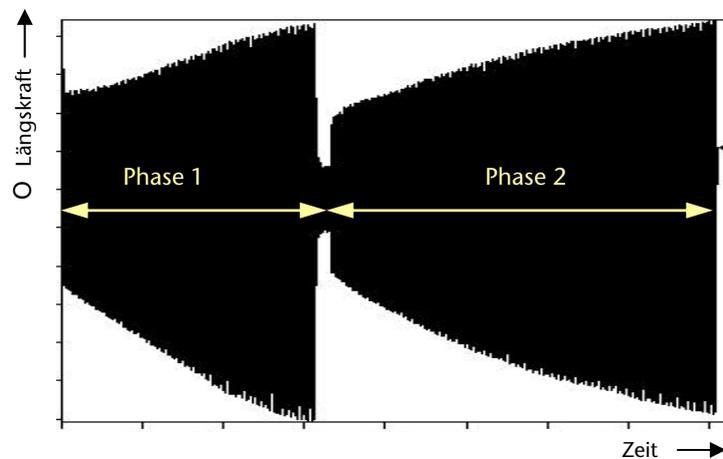


Bild 3: Graphische Darstellung der Axialkräfte in der Exzenterstange über zwei Lastzyklen

Diese ersten Messungen haben gezeigt, dass die Amplituden der Axialkraft in der Exzenterstange bei laufendem Prüfstand und Drehmoment-Verspannung mit dem Zuschalten des Exzenters kontinuierlich ansteigen. Ursächlich hierfür sind die stark ansteigenden, erforderlichen Kräfte für die Verschiebungen in den Längenausgleichen. Dafür spricht auch, dass in den bisherigen Versuchsläufen mit Axialverschiebung jeweils regelmäßig nach wenigen Minuten in einer der

beiden gleichzeitig im Prüfstand laufenden Gelenkwellen der Längenausgleich zu klemmen begann. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse und im Hinblick darauf, dass eine möglichst realitätsnahe Beanspruchung der Versuchsteile anzustreben ist, wurde die generell geplante Prüfstrategie eines konstanten Verspannmoments bei gleichzeitigem permanentem Exzenterbetrieb über die gesamte Versuchslaufzeit nochmals überdacht. Als Ergebnis der Diskussion wurde beschlossen, bei Überschreitung einer bestimmten Axialkraft die Drehmomentverspannung im laufenden Betrieb kurz zu lösen und dann wieder aufzubringen. Damit kann die Beweglichkeit in den Längenausgleichern sichergestellt werden, ohne den Versuchsbetrieb wesentlich zu verzögern. Die mit dieser Vorgehensweise ermittelten Verschleißkennwerte erlauben aufgrund der stark standardisierten Versuchsdurchführung eine aussagekräftige Übertragung auf betriebsübliche Einsatzfälle.

4 Betriebslasten

Der Versuchsplan sieht neben den grundlegenden Versuchen unter statischen bzw. dynamischen Lasten mit konstanten Amplituden auch Betriebslastenversuche vor. Die bei Fahrzeuganwendungen auftretenden Querbeschleunigungen haben einen erheblichen Einfluss auf das Verschleißverhalten des Längenausgleichs. Den härtesten Anwendungsfall stellen dabei die Anwendungen im Schienenverkehr aufgrund der hohen Steifigkeiten im Rad-Schiene-Kontakt und die daraus folgenden hohen Beschleunigungen dar. Als Referenzkollektiv sollte dazu eine Rainflow klassierte Schienenfahrzeugmessung herangezogen werden. Da bei der klassischen Rainflow-Klassierung nur nach einer Variablen klassiert wird, im vorliegenden Fall jedoch x- und y-Beschleunigungswerte (Quer- und Horizontalbeschleunigungen) zusammen betrachtet werden sollten, wurde eine Verbundklassierung durchgeführt. Bei einer Verbundklassierung werden zwei Signale zeitsynchron klassiert und die Häufigkeiten in einer Matrix gezählt. Die sich ergebende 32x32-Matrix ist in **Bild 4** dargestellt (y-Beschleunigungswerte horizontal; x-Werte vertikal). Bereiche mit gleicher farblicher Unterlegung kennzeichnen Einträge / Häufigkeiten in der gleichen Größenordnung.

Bezüglich des auf dem Prüfstand zu fahrenden Betriebslastenkollektivs sind 30g als obere Lastgrenze angestrebt. Die darunter liegenden Bereiche werden in drei Klassen (entsprechend den ähnlichen Farben in der Darstellung) abgestuft gefahren.

-0.48	0	0	0	0	2	1	3	0	3	4	7	5	7	13	14	10	11	6	7	5	5	2	1	5	1	0	1	0	0	0.48				
-0.45	0	1	0	1	0	0	0	2	5	3	6	8	16	15	10	23	17	11	14	11	10	3	7	3	1	2	1	0	0	0.45				
-0.42	0	0	0	1	0	1	2	3	4	1	7	6	7	14	24	18	21	25	21	7	13	6	2	2	2	0	1	0	0	0.42				
-0.39	1	2	1	0	3	1	0	6	6	9	18	22	33	32	44	54	48	36	25	23	20	7	5	7	2	3	1	0	1	0.39				
-0.36	1	2	2	5	5	1	2	3	4	7	11	18	23	43	55	61	60	61	57	22	19	14	10	4	3	3	2	2	0	1	0.36			
-0.33	2	1	2	2	0	2	5	2	6	14	13	22	44	64	81	100	108	93	77	55	41	24	16	10	5	6	3	3	2	1	0.33			
-0.30	2	2	4	8	1	3	6	8	24	15	26	55	51	134	134	219	228	181	167	78	67	33	36	17	18	12	4	4	2	1	0.30			
-0.27	3	2	6	9	4	9	10	21	17	25	71	78	185	201	335	356	249	226	119	110	64	34	29	6	7	5	3	3	4	2	0.27			
-0.23	5	8	7	15	6	7	16	22	42	51	119	181	310	431	655	715	537	436	245	155	108	62	25	17	20	14	9	4	7	6	4	0.23		
-0.20	5	7	13	14	13	18	23	39	56	60	160	271	471	681	963	909	763	583	308	208	139	70	53	25	25	15	8	16	10	9	3	0.20		
-0.17	19	14	10	19	13	21	37	50	79	108	239	373	666	1026	1748	1742	1281	970	483	311	193	87	77	38	43	22	22	17	6	10	13	0.17		
-0.14	17	24	29	26	30	44	60	65	109	153	210	442	712	1499	2127	3515	3722	2492	1800	900	547	344	167	115	71	45	30	21	30	21	12	20	0.14	
-0.11	22	21	27	43	29	48	64	69	142	172	284	458	859	1496	2462	4363	4710	3476	1833	893	492	174	139	77	54	43	34	21	21	21	16	0.11		
-0.08	30	37	52	58	61	70	119	117	192	272	429	628	1402	3340	5584	10392	12554	7092	4303	1977	1017	609	351	219	134	101	75	61	55	36	59	23	0.08	
-0.05	42	43	45	66	92	96	145	152	235	353	495	1049	1719	4074	7482	18926	24175	10548	5407	2160	1178	551	351	263	165	116	75	65	72	47	40	36	0.05	
-0.02	106	118	147	184	269	449	739	1026	1752	2597	4395	7507	13040	27765	52003	90660	142573	240256	194459	124092	61622	31955	1866	1046	574	352	280	233	154	159	110	90	97	0.02
0.02	152	162	135	218	250	416	664	931	1540	2297	4133	7207	12784	22528	40352	70091	107663	170255	289571	196631	107490	55124	28309	1586	814	483	302	287	253	188	121	114	137	0.00
0.05	43	56	48	75	86	102	143	176	263	363	559	1156	1906	3369	6356	11112	20588	11974	5763	2219	1213	794	437	291	174	158	110	60	78	52	49	35	0.00	
0.08	43	47	38	59	74	66	135	133	211	291	444	661	1517	3389	5778	11920	14722	8136	4425	1911	995	873	337	211	125	116	79	58	65	38	37	29	0.00	
0.11	18	19	28	31	35	61	79	94	125	184	262	374	542	1978	3194	5475	6406	3947	2633	1206	638	374	197	142	86	56	41	31	32	27	20	14	0.00	
0.14	14	22	19	30	25	52	54	73	121	116	193	456	613	1430	2097	3363	3898	2500	1804	849	617	307	159	107	52	50	35	26	21	20	27	14	0.00	
0.17	14	16	17	27	23	27	41	43	64	104	152	310	401	839	1330	2133	2331	1590	1171	818	368	218	117	92	54	40	17	15	13	15	9	11	0.00	
0.20	10	7	6	19	16	16	25	22	56	66	96	177	280	541	626	1060	1170	859	670	469	202	152	71	52	24	21	13	12	10	5	10	7	0.00	
0.23	7	6	5	7	12	13	17	27	40	59	79	141	200	482	475	651	311	336	488	267	165	98	50	35	24	12	9	13	4	10	3	0.00		
0.27	2	2	3	4	3	7	12	10	19	25	49	81	105	229	232	343	382	260	235	140	83	50	26	22	12	11	7	9	2	6	1	0	0.00	
0.30	2	4	5	2	2	4	6	7	14	25	35	55	69	120	150	232	229	180	137	95	63	34	22	22	5	4	5	4	1	3	3	2	0.00	
0.33	2	3	3	1	2	0	9	4	5	14	32	50	51	82	100	140	124	97	102	54	37	26	24	12	8	5	2	0	5	3	1	1	0.00	
0.36	0	2	1	2	1	2	1	2	8	7	13	13	35	25	52	43	79	71	57	48	39	32	12	14	7	0	2	1	1	1	0	0	0.00	
0.38	0	0	1	1	0	1	4	3	7	13	16	20	29	37	36	35	43	43	38	19	21	14	11	6	2	3	2	0	3	1	1	0	0.00	
0.42	0	1	0	1	1	3	2	3	5	5	12	11	18	14	30	39	22	24	11	4	6	5	4	1	2	0	3	1	1	0	1	0	0.00	
0.45	0	1	0	2	1	2	1	2	1	5	7	5	12	9	6	12	23	18	6	9	11	11	7	5	3	5	3	1	0	0	1	0	0.00	
0.48	0	1	0	0	1	0	1	0	1	4	5	5	7	6	6	10	15	10	11	14	8	4	6	2	2	0	3	0	2	0	0	0	0	0.00

Bild 4: Häufigkeits-Matrix der Verbundklassierung (erzeugt aus Daten einer Schienenfahrzeugmessung)

5 Numerische Untersuchungen

Neben den experimentellen Untersuchungen werden für eine erweiterte Anwendung der Forschungsergebnisse numerische Simulationen zu verschiedenen geometrischen Ausführungen angestellt. Randbedingungen für die Simulationen bilden dabei die in den Versuchen aufgebrachten Lasten.

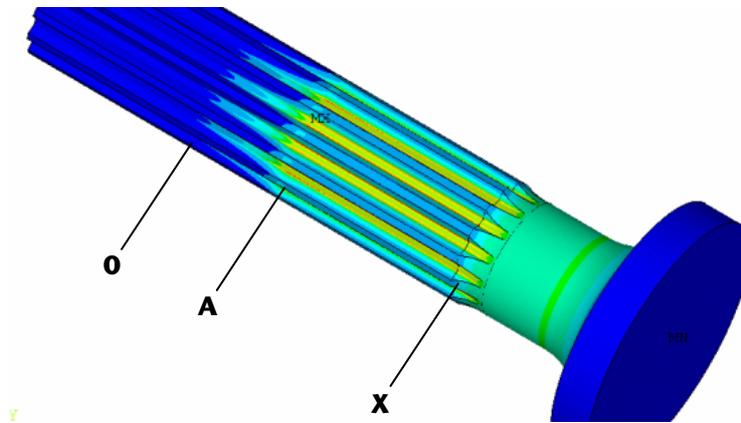


Bild 5: Graphische Darstellung der Vergleichsspannungen in der Gelenkwelle bei einer Überdeckung von $0,8 \cdot d_b$ (Reibpaarung Stahl/Stahl)

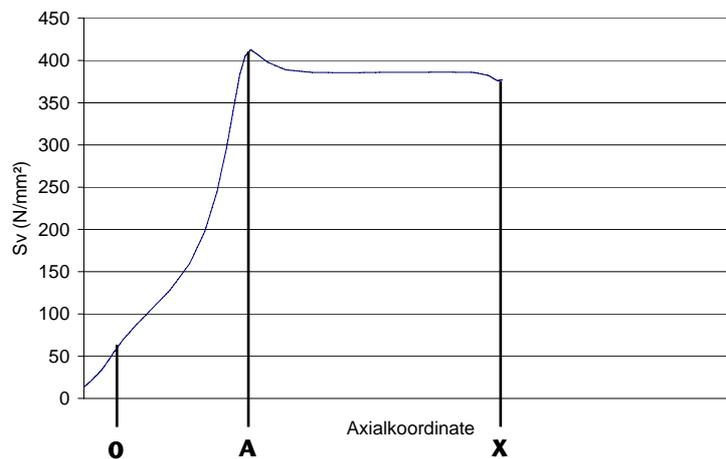


Bild 6: Vergleichsspannungen im Zahnfuß der Welle bei einer Überdeckung von $0,8 \cdot d_b$ (Reibpaarung Stahl/Stahl)

Auf Grundlage der Berechnungsergebnisse wurde z. B. die Lastverteilung über der Länge in Form von Vergleichsspannungen und Kontaktdrücken ausgewertet. Die **Bilder 5** und **6** zeigen die entsprechenden Verläufe. Vom Flansch aus kommend wird das Drehmoment durch den verzahnten Wellenbereich von X bis A geleitet und dann zwischen A und O auf die Nabe übertragen. Das hohe Vergleichsspannungsniveau zwischen X und A ist durch die Verzahnungskerben verursacht und steigt kurz vor der Nabenkante nochmals, bedingt durch den Steifigkeitssprung der Nabe, auf seinen Maximalwert an.

6 Zusammenfassung

Die experimentelle Untersuchung der Gelenkwellen hat im verzahnten Längenausgleich, abhängig von der Verzahnungslänge, bei Axialbewegung teilweise erhebliche Verschiebekräfte erkennen lassen. Zusätzlich zu den Querbelastungen aus Eigengewicht werden auch Querkräfte aus dynamischen Anregungen experimentell untersucht. Die numerischen Simulationen bilden die im Versuch ermittelten kritischen Stellen zutreffend ab und zeigen Optimierungspotentiale auf.

7 Weitere Informationen

Interessierte können sich für weitere Ergebnisse auch an Herrn Hagemann bei der FVA in Frankfurt wenden.

(bernhard.hagemann@vdma.org)

Die Förderung dieses Forschungsvorhabens erfolgt mit Mitteln der Stiftung Industrieforschung unter der Projekt-Nr. S 747.

(<http://www.stiftung-industrieforschung.de/>)

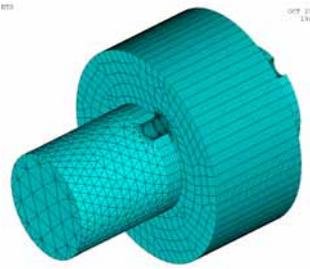
8 Literatur

- /1/ DIN 5480: Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser. Beuth, Berlin, 2006
- /2/ DIN 5466E: Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen. Beuth, Berlin, 2002
- /3/ Schäfer, G.: Zahnwellen-Verbindungen als Längenausgleich in Gelenkwellen; Institutsmitteilung Nr. 31, IMW Clausthal, 2006

Dynamische Untersuchung von Längsstiftverbindungen

Dietz, P.; Korte, T.

Längsstiftverbindungen zur Drehmomentübertragung als Alternative zur Passfeder finden in der Praxis noch wenig Verbreitung. Am Institut für Maschinenwesen wurden umfangreiche Untersuchungen zum Beanspruchungsverhalten bei dynamischen Lasten durchgeführt.



Longitudinal pin connections for transmission of torque as an alternative to feather key connections are little applied in industrial practise. At the Institute of Mechanical Engineering investigations of the dynamic loading are executed.

1 Spielbehaftete Längsstiftverbindungen

Längsstiftverbindungen sind formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen. Das Drehmoment wird durch axial am Umfang der Welle angeordnete Stifte übertragen. Die spielbehafteten Längsstifte werden in eine vor der Montage der Bauteile gefertigte Nut eingelegt. Die Stifte selbst sind mit hoher Maß- und Oberflächenqualität und mit geringen Kosten zum Beispiel durch Ziehen herstellbar. Längsstiftverbindungen zeichnen sich aufgrund Ihres halbkreisförmigen Nutquerschnittes durch geringe Spannungsüberhöhungen in der Kerbe aus /1/. **Bild 1** zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Längsstiftverbindung.

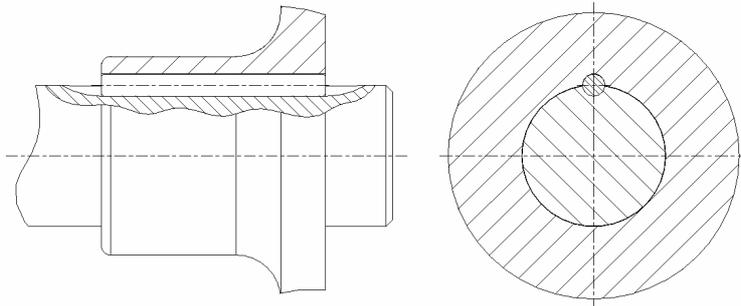


Bild 1: Prinzip der Längsstiftverbindung /1/

2 Dynamische Untersuchungen

Am Institut für Maschinenwesen wurden Versuche an Längsstiftverbindungen unter dynamischer Torsion durchgeführt. Dabei wurden verschiedene geometrische Parameter der Verbindung verändert, um Aussagen über die Einflüsse auf die Lebensdauer treffen zu können.

2.1 Material und Geometrie der Proben

Für die Prüfbauteile der Längsstiftverbindungen wurden folgende Werkstoffe verwendet:

- Welle: 42CrMo4
- Nabe: CK45
- Stifte: Silberstahl 115CrV5

Für die Werkstoffe wurden folgende Werkstoffdaten ermittelt (Tabelle 1).

Element	Welle	Nabe	Stift
Werkstoff	42CrMo4	C45	115CrV5
Zugfestigkeit [N/mm²]	930	650	690
Streckgrenze [N/mm²]	708	405	500
Bruchdehnung [%]	12	14	25
Brucheinschnürung [%]	40	35	45
Elastizitätsmodul [N/mm²]	210000	210000	210000
Poissonzahl	0,3	0,3	0,3

Tabelle 1: Werkstoffdaten

Für den Wellenwerkstoff 42CrMo4 und Torsionsbeanspruchung kann ein Smith-Diagramm (**Bild 2**) erstellt werden, das die Dauerfestigkeitswerte für eine gewählte Torsionsmittelspannung des ungekerbten Bauteils zeigt. Exemplarisch ist hier eine Mittelspannung von $\tau_{tm} = 110 \text{ N/mm}^2$ dargestellt.

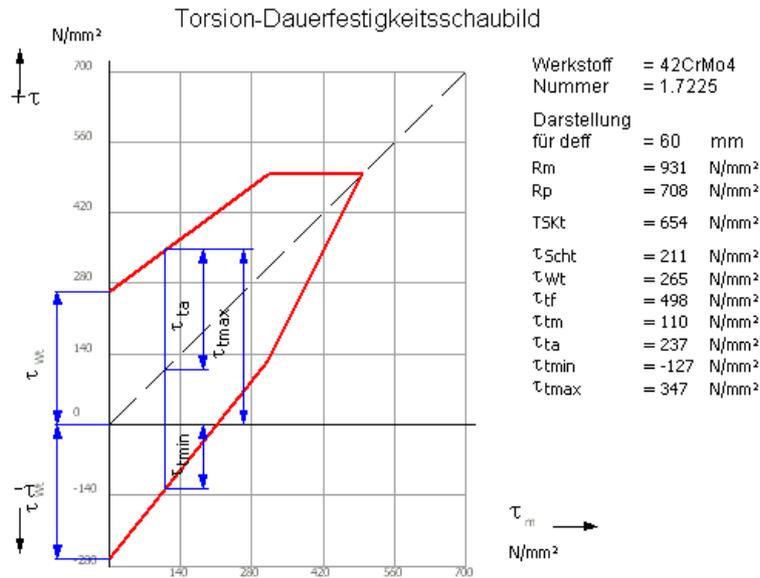


Bild 2: Dauerfestigkeitsschaubild Torsion für 42 CrMo4

Für die Versuche wurde eine Grundgeometrie verwendet, wie sie in **Bild 3** zu sehen ist. Der Fügedurchmesser der Welle beträgt bei allen Proben $D_{al} = 32$ mm, die Gesamtlänge der Probe 150 mm. Nicht variiert wurde die Passung zwischen Stiftbohrung und Stift. Es handelt sich hier grundsätzlich um eine Spielpassung H7/h8.

Variiert wurden folgende Parameter:

- Anzahl der Stifte: $n_s = 1$
 $n_s = 3$
- Durchmesser der Stifte: $d_s = 4$ mm ($Q_s = 0,125$)
 $d_s = 6$ mm ($Q_s = 0,1875$)
- Verbindungslänge: $l_f = 32$ mm ($l_f/D_{al} = 1$)
 $l_f = 45$ mm ($l_f/D_{al} = 1,4$)
- Durchmesser der Nabe: $D_{aA} = 64$ mm ($Q_A = 0,5$)
 $D_{aA} = 45$ mm ($Q_A = 0,71$)
- Passung Welle/Nabe: H7/k6 Übergangspassung
H7/r6 Presspassung

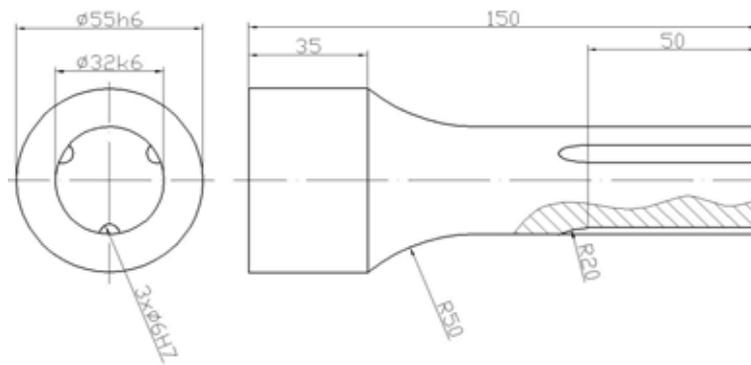


Bild 3: Welle 3-Stift-Verbindung, $n_s = 3$, $d_s = 6$ mm

2.2 Versuchsbedingungen

Die dynamischen Torsionsversuche wurden auf den Torsionsschwingprüfständen (siehe Seite 137 dieser Institutsmittellung) durchgeführt. Dabei wurde die Welle mit einer Schrumpfscheibe am schwingenden Antriebstrang des Prüfstandes kraftschlüssig verbunden. Die Nabe wurde ebenfalls kraftschlüssig axial in einer Zentrierbohrung der feststehenden Drehmomentstütze stirnseitig eingespannt. **Bild 4** zeigt die Einspannsituation im Prüfstand.



Bild 4: Einspannsituation im Torsionsschwingprüfstand

Die gewählte Einspannung bedingt die Annahme einer sehr steifen Nabe, was auch in den zugehörigen FE-Berechnungen berücksichtigt wurde. Um geringe axiale Kräfte und Biegebeanspruchungen in der Welle-Nabe-Verbindung ausschließen zu können, sind im Antriebsstrang zwei Membrankupplungen BHS Twintors eingebaut. Dadurch ist sichergestellt, dass ausschließlich eine reine Torsionsbeanspruchung in die Verbindung eingebracht wird.

Die Prüffrequenz liegt für die Untersuchungen zwischen 33 Hz und 37 Hz. Das Frequenzspektrum wird bedingt durch das Unwuchtprinzip des Prüfstandes. Für hohe Momente wird die Drehzahl der Fliehkörper erhöht, was zu einer Steigerung der Prüffrequenz führt.

Die einzelnen Versuche wurden nach Erreichen von $1,5 \times 10^7$ Schwingungen abgebrochen. Da insbesondere bei Bauteiluntersuchungen mit Verschleißbeanspruchung, wie sie hier vorliegen, eine klassische Dauerfestigkeit nicht vorausgesetzt werden kann, wurden zudem Stichversuche bis zu $3,0 \times 10^7$ Schwingungen durchgeführt. Ein Abfall der Dauerfestigkeitsgeraden war bis dahin nicht messbar.

Es wurden je Versuchsreihe sieben Proben verwendet; die Versuche wurden abgebrochen, wenn zu einem Lasthorizont zwei Durchläufer ermittelt werden konnten.

Alle Versuche wurden mit einem konstanten Mittelspannungsverhältnis von $R = 0,1$ (schwellende Belastung) gefahren. Es wurden zudem zwei als Wechseltorsionsversuche mit einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ durchgeführt.

3 Ergebnisse der Untersuchungen

Da sämtliche Versuche mit dem gleichen Füge- beziehungsweise Welledurchmesser durchgeführt werden, können die Ergebnisse sehr gut verglichen werden.

Dargestellt sind jeweils die Belastungen, die von der Probe mindestens $1,5 \times 10^7$ Schwingungen ertragen wurden. Zur besseren Einordnung der Versuchsergebnisse werden die sich aus der Torsionsbelastung ergebenden Schubspannungen auf den kreisrunden ungestörten Querschnitt der Welle mit dem Nenndurchmesser $D_{al} = 32$ mm bezogen. Dabei gilt:

$$\tau = \frac{M_t}{W_p} \quad \text{mit} \quad W_p = \frac{\pi}{16} \cdot D_{al}^3$$

Die Ergebnisse werden als Tabelle mit den wesentlichen Probenparametern dargestellt.

Reihe	$M_{t,m}$ [Nm]	$M_{t,o}$ [Nm]	$M_{t,u}$ [Nm]	$\tau_{t,m}$ [N/mm ²]	$\tau_{t,o}$ [N/mm ²]	$\tau_{t,u}$ [N/mm ²]	R
1	715	1300	130	111	202	20,2	0,1
2	825	1500	150	128	233	23,3	0,1
3	965	1750	180	150	272	28	0,1
4	990	1800	180	154	280	28	0,1
4	0	800	-800	0	124	124	-1
5	635	1150	120	99	179	18	0,1
6	0	800	-800	0	124	124	-1
6	990	1800	180	154	280	28	0,1
7	880	1600	160	137	249	25	0,1

Tabelle 2: Belastungen und Nennbeanspruchungen für durchgelaufene Proben

Reihe Geometrieparameter

- 1 $n_s = 1, d_s = 4 \text{ mm}, l_f = 45 \text{ mm}, D_{aA} = 64 \text{ mm}, H7/k6$
- 2 $n_s = 1, d_s = 6 \text{ mm}, l_f = 45 \text{ mm}, D_{aA} = 64 \text{ mm}, H7/k6$
- 3 $n_s = 3, d_s = 4 \text{ mm}, l_f = 32 \text{ mm}, D_{aA} = 64 \text{ mm}, H7/k6$
- 4 $n_s = 3, d_s = 6 \text{ mm}, l_f = 32 \text{ mm}, D_{aA} = 64 \text{ mm}, H7/k6$
- 5 $n_s = 3, d_s = 4 \text{ mm}, l_f = 32 \text{ mm}, D_{aA} = 45 \text{ mm}, H7/k6$
- 6 $n_s = 3, d_s = 6 \text{ mm}, l_f = 32 \text{ mm}, D_{aA} = 64 \text{ mm}, H7/r6$
- 7 $n_s = 3, d_s = 6 \text{ mm}, l_f = 32 \text{ mm}, D_{aA} = 64 \text{ mm}, H7/k6, \text{Nabe GJL}$

3.1 Versagen der Längsstiftverbindungen

Die Proben mit dem Nabenaußendurchmesser Verhältnis $Q_{aA} = 0,5$ ($D_{aA} = 64 \text{ mm}$) zeigten als Versagensursache grundsätzlich ein Versagen der Welle. Es kam zu Torsionsdauerbrüchen, wie sie in **Bild 5** und **Bild 6** zu sehen sind. Rissausgangspunkt ist der Bereich der größten Flächenpressung zwischen Welle und Stift (siehe auch Institutsmitteilung Nr. 31).



Bild 5: Torsionsbruch an Probe Geometrie 4

In **Bild 6** ist zudem sehr gut zu erkennen, dass im Bereich der größten Druckspannungen in der Welle Ausbrüche in der Stiftnut vorhanden sind.

Des Weiteren kann man anhand des Bildes sehen, dass es auch bei der Längsstiftverbindung mit drei Stiften zu Reibkorrosionsbeanspruchungen zwischen Welle und Nabe kommt.



Bild 6: Torsionsbruch an Probe Geometrie 4

3.2 Erkenntnisse aus den Versuchen

Aus den Versuchsergebnissen lassen sich Schlüsse zur Gestaltfestigkeit von Längsstiftverbindungen unter schwingender Torsionsbelastung ableiten:

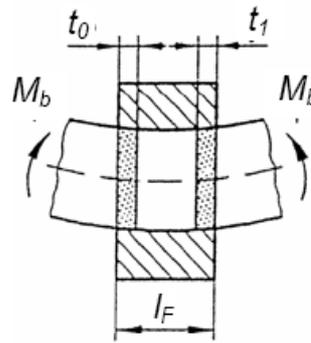
- Die Dreistiftverbindung mit $Q_S = 0,1875$ erträgt die größten dynamischen Torsionsbelastungen.
- Auch bei Dreistiftverbindungen kommt es zu Reibbeanspruchungen, was zu Oberflächenverschleiß in der Fügefläche Welle / Nabe führt.
- Eine überlagerte Pressverbindung zwischen Welle und Nabe mit 0,1 % bezogenem Übermaß bringt bezüglich der ertragbaren Torsionsbelastungen oberhalb der reinen Pressverbandübertragbarkeit keinen Nutzen. Das gilt sowohl für schwellende als auch wechselnde Belastungen.
- Die Tragfähigkeit einer Einstiftverbindung gegenüber einer Dreistiftverbindung ist reduziert, jedoch nur im geringen Maß.
- Bei einem Verhältnis von Wellendurchmesser zu Nabendurchmesser von $Q_A = 0,5$ kommt es zu keinen Nabenbrüchen. Bei $Q_A = 0,71$ treten Nabenbrüche auf.

4 Literatur

- /1/ Birkholz, H.: Auslegung von Längsstiftverbindungen mit mehreren Mitnehmerelementen unter Drehmomentbelastung. Dissertation, TU Clausthal 2004
- /2/ Korte, T.: Dimensionierung und Gestaltung von spielbehafteten Längsstiftverbindungen. VDI-Berichte 1790, VDI Tagung Wiesloch Okt. 2007, ISBN 3-18-091790-3
- /3/ Wesolowski, P.: FEM-Simulation von Längsstiftverbindungen mit teilplastischem Materialverhalten. Unveröffentlichte Studienarbeit, IMW TU Clausthal, 2006

Gestaltung und Dimensionierung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen

Hilgermann, J. L.; Lütkepohl, A.



Innenhochdruckgefügte Pressverbindungen stellen eine interessante und innovative Alternative zu klassischen Pressverbindungen dar. Geringe Fertigungstoleranzen und die gleichzeitige Integration des Leichtbauprinzips ermöglichen eine ökonomische und ökologische Fertigung. Der niedrige Wissensstand und fehlende Auslegungsvorschriften innenhochdruckgefügter Pressverbindungen erlauben den Einsatz dieser Verbindungstechnologie nur nach umfangreichen experimentellen Untersuchungen. Derzeitige Forschungsarbeiten am Institut für Maschinenwesen haben die Erarbeitung konstruktiver Grundlagen und Aussagen zur Betriebsfestigkeit Innenhochdruckgefügter Welle-Nabe-Verbindungen zum Ziel.

Inside-High-Pressure Joining-Technology makes up an interesting and innovating alternative to the classical Joining-Technologies. Little manufacturing tolerance and the integration of lightweight construction make an economically and ecologically manufacturing possible. Little knowledge and missing dimensioning rules allow the use of such technology after only after extensively testing. Current research at the Institute of mechanical Engineering has the ambition to create dimensioning rules and to predict the lifetime of Inside-High-Pressure joined shaft to collar connections.

1 Einleitung

Innenhochdruckgefügte Pressverbindungen stellen eine interessante und innovative Alternative zu klassischen Pressverbindungen im Bereich der Antriebstechnik dar. Solche Verbindungen werden zurzeit im Bereich der Massenfertigung im Automobilbau an Nocken- und Steuerwelle realisiert, die Tragfähigkeiten werden dabei empirisch auf den Anwendungsfall hin erprobt. Das Potential dieser wirtschaftlich interessanten und auf Leichtbau ausgerichteten Verbindungstechnik umfasst aber mindestens die gesamte Antriebstechnik des Maschinen-, Fahrzeug- und Apparatebaus. Bisher fehlt jedoch eine verlässliche Methode zur Auslegung und zum Tragfähigkeitsnachweis unter statischen und dynamischen Beanspruchungen.

Das Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal untersucht derzeit das Verhalten innenhochdruckgefügter Pressverbindungen unter dynamischen Lasten (Torsion und Umlaufbiegung). Ziel ist die Ermittlung einer Tragfähigkeits-Grenzlast, bis zu der ein schadensfreier Einsatz in der Praxis möglich ist. Kenntnisse über Steigerungspotenziale der Tragfähigkeit sowie die mathematisch-physikalischen Zusammenhänge sollen erarbeitet und das Verhalten der Verbindung unter konstruktiven und werkstoffmechanischen Einflüssen untersucht werden.

2 Prinzip des Innenhochdruckfügens

Das Prinzip des Innenhochdruckfügens (IHF) ist der Technologie des Innenhochdruckumformen (IHU) sehr ähnlich. Im Gegensatz zum IHU, bei dem beispielsweise ein Rohr gegen eine Werkzeugwand expandiert wird und einen Körper mit komplizierter Geometrie ergibt, werden beim IHF Welle und Nabe kraftschlüssig miteinander verbunden. Die Hohlwelle wird in der Nabe ausgerichtet.

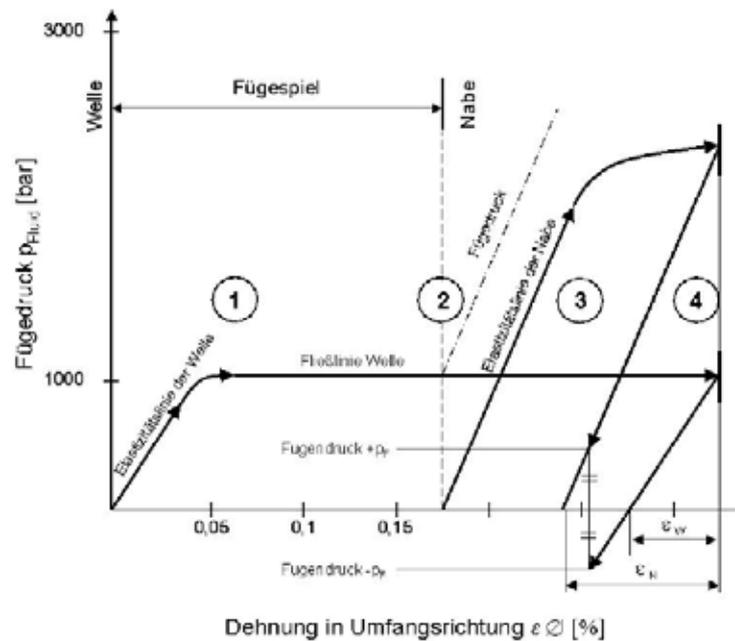


Bild 1: Verformungsschaubild der Welle-Nabe-Verbindung während des Innenhochdruckfügens, /1/

Das Aufweitewerkzeug wird in die Welle geführt und so positioniert, dass die sich auf der Sonde befindlichen Dichtungen mit einem genau

definierten Drucküberstand seitlich der Nabenränder abschließen. Dieser im Rohr genau abgedichtete Ringspalt unterhalb der Nabe und zwischen den Sondendichtungen wird anschließend durch ein Hydromedium mit Druck beaufschlagt. Dieses Medium gelangt durch eine Sondenbohrung in den Ringspalt. /1/

Bei Drucksteigerung weitet sich die Welle lokal unterhalb der Nabe elastisch und/oder plastisch auf, **Bild 1-1**. Nachdem das Fügepiel überwunden ist, legt sich die Welle an die Nabe an und beide Bauteile expandieren, **Bild 1-2**. Bei weiterer Drucksteigerung und durch gezielte Materialkombination der beiden Fügepartner wird die Welle plastisch, die Nabe elastisch oder teilplastisch verformt, **Bild 1-3**. Nach dem Erreichen des max. Fügedrucks und Halten des Drucks für einen bestimmten Zeitraum erfolgt die vollständige Druckrücknahme. Welle und Nabe federn gemeinsam zurück, **Bild 1-4**. /1/

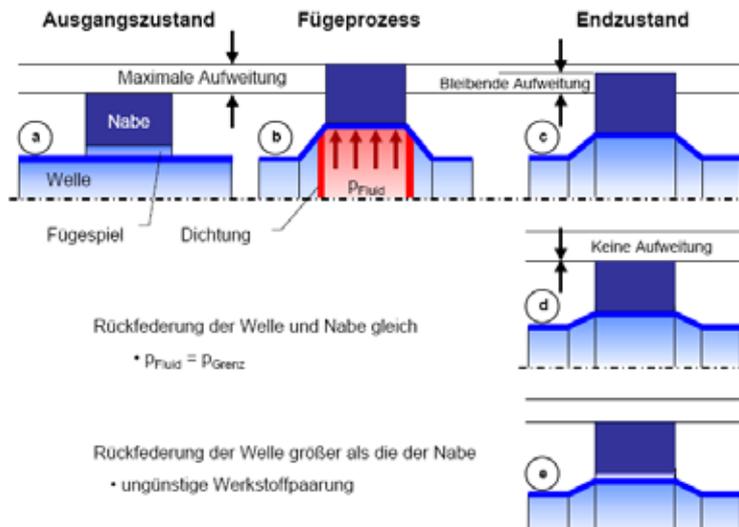


Bild 2: Phasen des Fügeprozesses und mögliche Endzustände, /1/

Durch die unterschiedlichen Nachgiebigkeiten und aufgrund der Festigkeitsunterschiede der Fügepartner ergibt sich ein unterschiedliches Rückfederungspotential, das dazu führt, dass sich die Nabe auf die Welle „schrumpft“. Die Rückfederungsbehinderung, verursacht durch die plastifizierte Welle, sorgt für einen festen Presssitz der Welle-Nabe-Verbindung, **Bild 2-c**. Es ergibt sich ein Eigenspannungszustand ähnlich dem eines Pressverbandes oder nach einer Autofrettage, der das Rohr in der Bohrung festhält. Wird eine ungünstige Materialpaarung gewählt, bei der das Rückfederungsverhalten der Nabe kleiner ist als

das der Welle, kann sich ein Presssitz nicht ausbilden, **Bild 2-e**. Den Grenzzustand bei dem die Rückfederung der Nabe gleich der Rückfederung der Welle ist, wird in **Bild 2-d** dargestellt. Hier liegt ein Zustand vor, der mindestens erreicht werden muss, damit sich ein Presssitz bei Überschreitung des Grenzfugedruckes einstellt. Bei der analytischen Betrachtung der Verbindung ist dieser „Grenzzustand“ von besonderer Bedeutung. /1/

3 Schädigungsmechanismen

Die Drehmomentein- bzw. -ausleitung im vorderen Teil der Pressverbindung bewirkt eine unterschiedliche Verdrillung, die schon bei relativ geringer Drehmomentbelastung zur Überschreitung der maximalen Reibschubspannung und damit zu einer Relativbewegung (Schlupf) führt.

Die Bereiche einer Pressverbindung, in denen eine Relativbewegung (Schlupf) zwischen Welle und Nabe unter Flächenpressung stattfindet, bezeichnet Groppe als Gleitzonen. Zur Ausbildung dieser Bereiche ist insbesondere der Kraftfluss maßgeblich verantwortlich. /3/

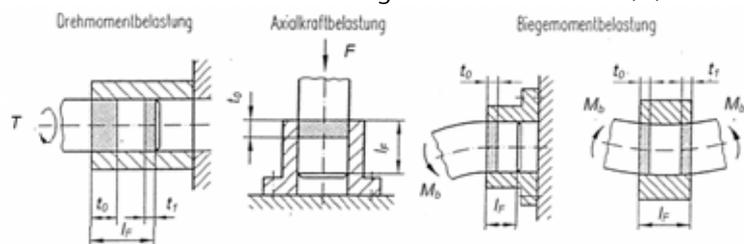


Bild 3: Pressverbindungen mit Gleitzonen bei Drehmoment-, Axialkraft- und Biegemomentbelastung (prinzipielle Darstellung), /3/

In diesen Gleitzonen führt die Relativbewegung bzw. das Aufeinanderreiben der Fügepartner unter Flächenpressung und dynamischer Beanspruchung zum Schwingungverschleiß und schädigt das Bauteil durch Reibkorrosion. Obwohl in zahlreichen Forschungsvorhaben die besondere Bedeutung der Flächenpressung und des Schlupfes untersucht wurden, fehlen für unter Innenhochdruck gefügten Welle-Nabe-Verbindungen gesicherte Erkenntnisse über die qualitative Wirkung der Flächenpressung und den so genannten tribologisch unschädlichen Schlupf.

/4/, /5/ und /6/ beschreiben auf Basis grundlegender Untersuchungen zum Thema Reibdauerbruch, dass sowohl die Flächenpressung als auch der Schlupf einen relevanten Einfluss auf den Schwingverschleiß haben.

Unter dynamischer Belastung mit örtlichem Wechselgleiten verringern sich, mit zunehmender Lastwechselzahl, die Größen der Gleitzone, der Gleitwege und die Gleitarbeit. Mit dieser Verringerung ist eine Erhöhung der Übertragungsfähigkeit, dem so genannten Hochtrainieren, verbunden.

Bei trocken sowie bei mit Ölen bzw. Schmierstoffen gefügten Pressverbindungen bildet sich, bei einer dynamischen Belastung mit örtlichem Wechselgleiten entsprechender Größe, Passungsrost, welcher meist einen Anriss in der Welle zur Folge hat. Typisch für einen Reibdauerbruch ist, dass der Riss nicht direkt unterhalb der Nabe, sondern im geringen Abstand von der Nabenkante in der Gleitzone beginnt. Bei trocken gefügten Pressverbindungen tritt dies schneller auf als bei den mit Schmierstoffen gefügten Verbindungen.

4 Untersuchungen am IMW

Experimentelle und theoretische Untersuchungen haben die Erarbeitung konstruktiver Grundlagen zur besseren Beherrschung des Reibrostproblems und eine Aussage zur Betriebsfestigkeit Innenhochdruckgefügter Welle-Nabe-Verbindungen zum Ziel.

Finite Elemente Berechnungen definieren die Grenzbelastung zur Vermeidung von Reibkorrosion unter Torsion durch Bestimmung des Schlupfes. Hierbei sollen nicht nur die Reibkoeffizienten sondern auch die Oberflächenbeschaffenheit der Welle und der Nabe sowie deren chemisch-physikalisch-mechanischen Wechselwirkungen in das Modell integriert werden. Die ermittelten Ergebnisse werden an experimentellen Versuchen überprüft und das FE-Modell gegebenenfalls nachkalibriert. Weiterführende experimentelle Untersuchungen stützen die Simulation und geben gleichzeitig Aufschluss über die zu erwartende Streuung der Ergebnisse.

In einem weiteren Arbeitsschritt werden FE-Simulationen zum Verhalten innenhochdruckgefügter Pressverbindungen unter statischer Querkraftbiegung durchgeführt. Anders als bei Torsionsbelastung ist bei Querkraftbiegebelastung eine Relativbewegung von Welle und Nabe in axialer Richtung zu erwarten. Auch hier dienen experimentelle Untersuchungen zur Kalibrierung und Verifikation des FE-Modells, und geben Aufschluss über die zu erwartenden Streuung der Ergebnisse.

In einem letzten Schritt werden innenhochdruckgefügte Welle-Nabe-Verbindungen experimentell unter umlaufender Querkraft-Biegebelastung untersucht. Sie sollen die tribologischen Auswirkungen dieser Belastungsart aufzeigen und eine Aussage zur Grenzbelastung ermöglichen.

5 Zusammenfassung

Innenhochdruckgefügte Pressverbindungen stellen eine interessante und innovative Alternative zu klassischen Pressverbindungen dar. Fehlende Auslegungsvorschriften verhindern den zahlreichen Einsatz dieser Fügetechnologie. Umfangreiche theoretische sowie experimentelle Forschungsarbeiten am Institut für Maschinenwesen haben das Ziel, wichtige Auslegungs- und Gestaltungsprinzipien sowie Aussagen zum Betriebsfestigkeitsverhalten zu erarbeiten. Umfangreiche FE-Simulationen werden maßgeblich für die Untersuchungen eingesetzt und schaffen ein fundiertes mathematisch-physikalisch-mechanisches Verständnis der Vorgänge unter Last.

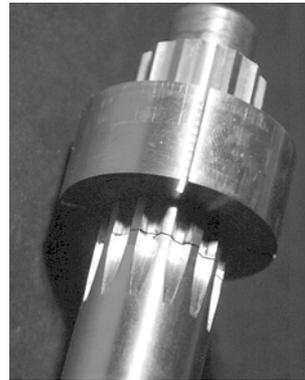
6 Literatur

- /1/ Grünendick, T.: Experimentelle Untersuchungen an innenhochdruckgefügten Wellen. IMW - Institutsmitteilung Nr. 28, Clausthal 2003
- /2/ Grünendick, T.: Die Berechnung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen. Papierflieger, Clausthal 2005, ISBN: 3-89720-795-8
- /3/ Gropp, H.: Klose, D.: Grundlegende Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zum Übertragungsverhalten dynamisch belasteter Pressverbindungen. VDI Berichte 1384, VDI-Tagung in Fulda, 28./29. April 1998, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998
- /4/ Funk, W.: Der Einfluss der Reibkorrosion auf die Dauerhaltbarkeit zusammengesetzter Maschinenelemente. Dissertation, TH Darmstadt, 1968
- /5/ Julius, A.: Reibkorrosion – Zum Mechanismus des Reibdauerbruchs. FKM-Forschungsheft 18, 1972
- /6/ Kreitner, L.: Die Auswirkungen von Reibkorrosion und Reibdauerbeanspruchung auf die Dauerhaltbarkeit zusammengesetzter Maschinenteile. Dissertation, TH Darmstadt, 1976

Grundlegende Untersuchungen an Zahnwellen zur Kerbwirkungsermittlung

Lau, P.; Schäfer, G.

Für die beanspruchungsgerechte Auslegung von Wellen und Achsen kommt die DIN 743 /1/ zum Einsatz. Hier werden u. a. Kerbwirkungszahlen für ZWVen (Zahnwellenverbindungen) nach DIN 5480 /2/ genannt. Die Berechnungsergebnisse ließen sich in der Vergangenheit allerdings nicht immer mit den Erfahrungen aus der industriellen Praxis in Einklang bringen. Zur Beseitigung dieser Unstimmigkeiten hatte die FVA (Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V.) ein Forschungsvorhaben mit dem Titel „Profilwellen-Kerbwirkung“ (FVA 4671) initiiert. In Zusammenarbeit mit dem IMM (Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion) der TU Dresden ist dieses Vorhaben vor kurzem erfolgreich abgeschlossen worden.



Calculating appropriate axles and camshafts with regard to the ruling loads designers usually employ the German standard DIN 743. Herein the user is able to find fatigue notch factors for spline shafts. But these factors did not always meet the experiences made in former practice. Aiming to eliminate this inconsistency the FVA, a German research organisation focussing on drive systems and components, had granted a research project labelled „Profilwellen-Kerbwirkung“ (FVA 4671). In cooperation with the IMM (Institute of Machine Elements and Machine Design) of the Technical University of Dresden this research project had been finished successfully a short time ago.

1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Hauptziele des Vorhabens bestanden in der Ermittlung verlässlicher Kerbwirkungszahlen und in der Beseitigung von Unsicherheiten hinsichtlich der Belastungsgrenzen bei statischer Belastung.

Hierfür wurden auf Dresdner Seite umfangreiche numerische Variationsrechnungen durchgeführt. Parallel fanden in Clausthal experimentelle Untersuchungen statt, die dazu dienten, die numerisch ermittelten Ergebnisse abzusichern. Als Gegenstand der experimentellen Untersuchungen wurde in Abstimmung mit den beteiligten Industriepartnern eine ZWV in der Größe 25x1,75x13 nach DIN 5480 festgelegt.

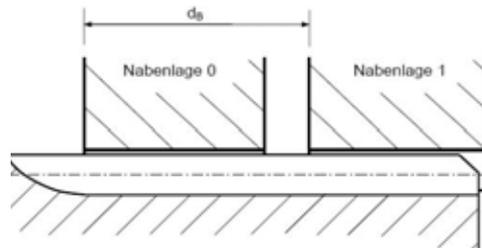
2 Untersuchte Einflussfaktoren

In den experimentellen Untersuchungen wurden verschiedene Einflüsse auf die Beanspruchbarkeit von ZWVen überprüft:

- die Auslaufgeometrie (gebundener Auslauf – freier Auslauf),
- das Vorhandensein einer Sicherungsringnut nach DIN 471/3/,
- der Fertigungseinfluss (umformend – spanend hergestellte Verzahnung),
- der Werkstoff (Vergütungsstahl – Einsatzstahl),
- die Belastungsart (Torsion – Biegung),
- der zeitliche Verlauf der Belastungen (statisch – dynamisch) und
- der Kräfteinleitungspunkt (zwei verschiedene Nabenlagen), dazu siehe das nachfolgende **Bild 1**.

Bild 1:

Die beiden untersuchten Nabenlagen (NL 0 und NL 1) am Beispiel einer Zahnwelle mit gebundenem Auslauf



Zur Verbreiterung der Informationsgrundlage wurden außerdem weitere Untersuchungen und Messungen an den vorliegenden Prüfteilen angestellt. Sie dienten u. a. der Ermittlung bzw. Bestimmung der grundlegenden Werkstoffeigenschaften, der Werkstoffzusammensetzungen, der Gefüge, der Rauigkeiten, der Eigenspannungen und der Härte-Tiefe-Verläufe.

3 Versuchseinrichtungen

Bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen wurde der umfangreiche institutseigene Prüfstandsbestand genutzt. So fanden die statischen und dynamischen Torsionsuntersuchungen größtenteils auf einem servohydraulischen Prüfstand statt, der in der Lage ist sowohl hochdynamische, aber auch einfache statische Belastungen zu erzeugen. Die Umlaufbiegeuntersuchungen wurden auf einem ebenfalls bereits vorhandenen Umlaufbiegeprüfstand durchgeführt,

der im letzten Drittel der Versuchsphase Unterstützung durch einen baugleichen Neubau bekam. Allein für die Untersuchungen bei statischer Biegebelastung musste auf die Infrastruktur eines Nachbarinstituts zurückgegriffen werden.

4 Ausgeführte Prüfteile

Die nachfolgenden Bilder zeigen exemplarisch einige der experimentell untersuchten Prüflingsvarianten: in **Bild 2** lassen sich die untersuchten Auslaufgeometrien am Beispiel von Prüflingen mit spanend hergestellter Verzahnung erkennen; von links: freier Auslauf mit kleinen Radien, freier Auslauf mit vergrößerten Radien und gebundener Auslauf.

Bild 2:

Die unterschiedlichen Auslaufgeometrien: frei (Variante 1), frei (Variante 2) und gebunden



Bild 3 und 4 zeigen in vergleichender Darstellung Prüflinge mit spanend (links) und umformend (rechts) gefertigter Verzahnung.



Bild 3 und 4: Die unterschiedlich gefertigten Verzahnungen (am Beispiel von Prüflingen mit gebundenem Auslauf)

5 Experimentelle Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse einzelner Untersuchungen in Form von $T-\varphi$ -Verläufen (Drehmoment-Verdrehwinkel-Verläufen, stat. Torsion), F_Q-x -Verläufen (Querkraft-Weg-Verläufen, stat. Biegung) und Bauteil-Wöhlerlinien (dyn. Torsion und Biegung) wiedergegeben.

Anmerkung: Aufgrund des begrenzten Raums kann dieser Artikel leider nur einzelne Aspekte des Vorhabens behandeln.

5.1 Statische Torsionsbelastung

Allgemein ist unter diesem Punkt auffällig, dass die Streuung der Ergebnisse gering ausfällt. Die Zahnwellen aus beiden Werkstoffen zeigen einen kontinuierlichen Übergang vom elastischen zum elastisch-plastischen Werkstoffverhalten. Außerdem werden teilweise sehr große Verformungsgrade erreicht. So können bis zum letztendlichen (Torsions-)Bruch Verdrehwinkel von bis zu 110° erreicht werden.

Bild 5 zeigt mehrere $T-\varphi$ -Verläufe von Wellen mit gebundenem Auslauf. Der Unterschied zwischen den betrachteten Prüflingen besteht in den verschiedenen Werkstoffen und Fertigungsverfahren der Verzahnungen.

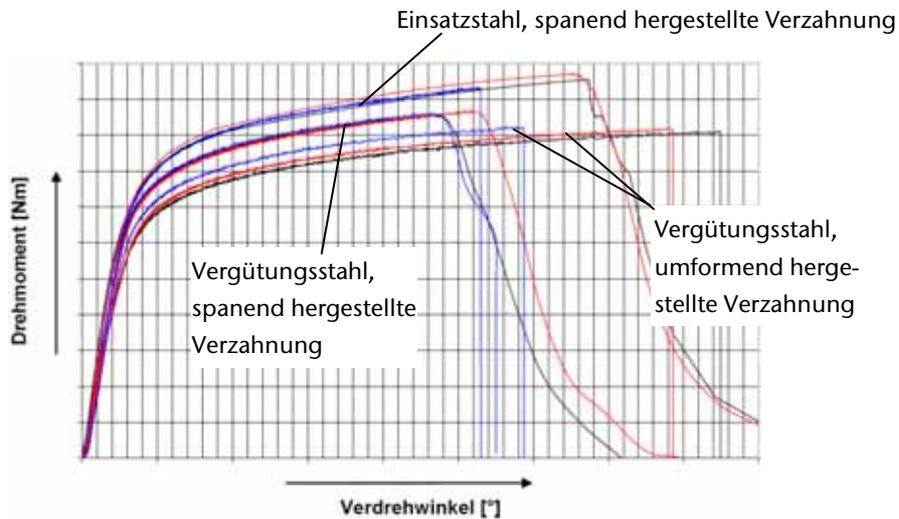


Bild 5: $T-\varphi$ -Verläufe bei statischer Torsion (drei Gruppen von jeweils drei Verläufen); mit werkstoff- und Fertigungsangaben; gemeinsame Parameter: gebundener Auslauf, NL 0

Liegen die Verläufe zu Beginn des elastischen Bereichs noch nah beieinander, fasn sie zu dessen Ende hin auf und lassen bei weiter wachsendem Verdrehwinkel zunehmend größere Unterschiede erkennen. So erreichen die Einsatzstahl-Zahnwellen, verglichen mit denen aus dem Vergütungsstahl durchweg die höheren Drehmomente bei gleichen Verdrehwinkeln und stellen sich als die steifere Variante heraus. Im Hinblick auf die Fertigungsverfahren der Verzahnung erreichen Zahnwellen mit spanend hergestellter Verzahnung höhere Drehmomentwerte bei gleichen Verdrehwinkeln.

5.2 Dynamische Torsionsbelastung

Die in diesem Bereich durchgeführten Untersuchungen fanden sämtlich bei schwellender Belastung und jeweils konstantem Spannungsverhältnis statt. Wie bei den Untersuchungsergebnissen zur statischen Torsion fällt die Streuung auch hier gering bis klein aus, was sich letztlich auch an den hohen Bestimmtheitsmaßen der Regressionsgeraden ablesen lässt, die allesamt Werte größer 0,77 erreichen.

Erwiesen sich die ZWen aus dem Einsatzstahl mit spanend hergestellter Verzahnung bei den statischen Torsions-Untersuchungen gegenüber den beiden anderen ZW-Varianten im Hinblick auf die erreichten Lasten noch als überlegen, ändert sich das Bild wenn man ihre Untersuchungsergebnisse bei dynamischer Torsionsbelastung vergleicht (Bild 6).

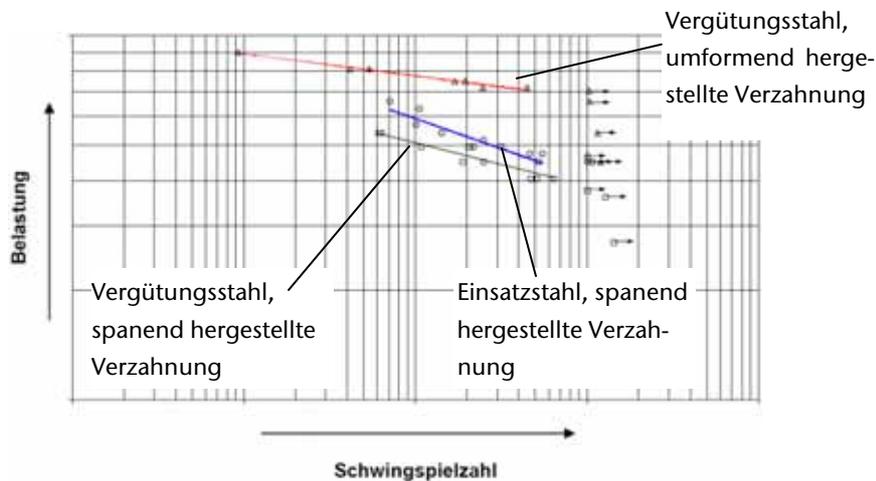


Bild 6: Bauteil-Wöhlerlinien bei dynamischer Torsion; mit Werkstoff- und Fertigungsangaben; gemeinsame Parameter: gebundener Auslauf, NL 0

Aus vorstehendem Bild, das die gleichen Zahnwellenvarianten wie Bild 5 vergleicht, geht hervor dass die ZWen aus dem Vergütungsstahl mit umformend hergestellter Verzahnung bei etwa gleichen Bruch-Schwingspielzahlen wesentlich höhere Lasten ertragen als ZWen, die eine spanend hergestellte Verzahnung aufweisen.

5.3 Statische Biegebelastung

Analog zu den Untersuchungsergebnissen bei statischer Torsionsbelastung liegen die Steigungen der Verläufe zu Beginn des elastischen Bereichs wiederum recht eng beieinander und lassen erst im weiteren Verlauf deutlicher werdende Unterschiede erkennen. Auch hier haben Werkstoff und Auslauform großen Einfluss auf die erreichten Lasthorizonte.

Zur Verdeutlichung zeigt **Bild 7** ermittelte F_Q - x -Verläufe, in denen diese beiden Einflüsse offenkundig werden: die Prüflinge aus dem Einsatzstahl erreichen durchweg die höheren Lastniveaus bei identischer Geometrie. Bei gleichem Material bewirkt ein freier Auslauf ein erkennbar früheres Abknicken des Verlaufs am Ende des elastischen Bereichs.

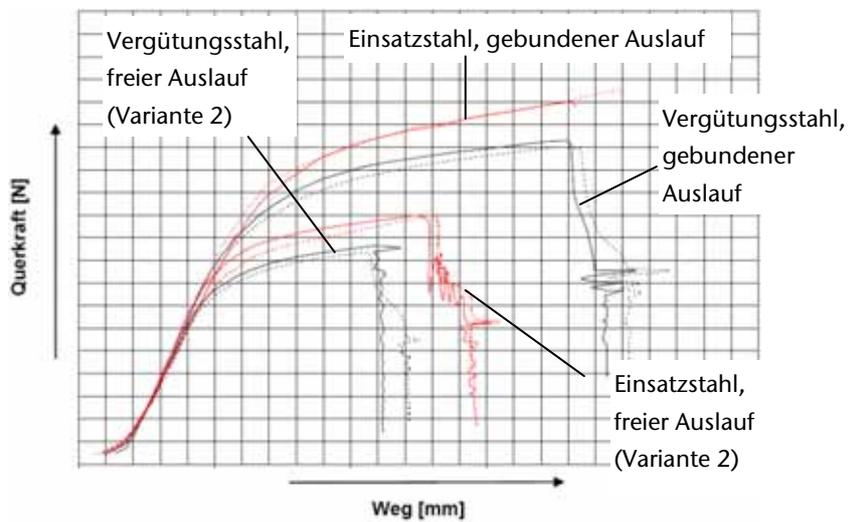


Bild 7: F_Q - x -Verläufe bei statischer Biegung (vier mal zwei Verläufe); mit Werkstoff- und Geometrieangaben; gemeinsame Parameter: spanend hergestellte Verzahnung, NL 0

5.4 Dynamische Biegebelastung

Verglichen mit den Ergebnissen aus den Untersuchungen bei dynamischer Torsion fällt auf, dass die Streuung bei den Ergebnissen der Umlaufbiegeuntersuchungen größer ist. Es traten hier vereinzelt Durchläufer bei Lastniveaus auf, auf denen mit einem Bruch im Zeitfestigkeitsbereich zu rechnen war.

Grundsätzlich ergibt sich bei den mit wechselnder Beanspruchung durchgeführten dynamischen Biegeuntersuchungen im Vergleich zu denen mit dynamischer Torsionsbelastung (Abschnitt 5.2) ein geändertes Bild: Wie in **Bild 8** ersichtlich, sind die ZWen mit freiem Auslauf bei dieser Beanspruchungsart denen mit gebundenem insbesondere im Bereich der Dauerfestigkeit überlegen. Zu größeren Lasten bzw. zu kleineren Schwingspielzahlen hin nähern sich die Zeitfestigkeitsgeraden allerdings an. In diesem Bild ist zusätzlich noch der geringfügig schwächende Einfluss der in Auslaufnähe vorhandenen Sicherungsringnut (SRN) zu erkennen.

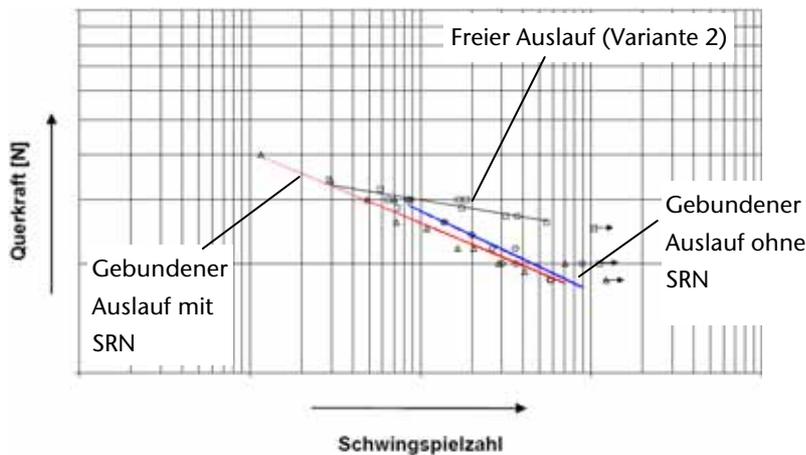


Bild 8: Bauteil-Wöhlerlinien bei dynamischer Biegung; mit Geometrieangaben; gemeinsame Parameter: Einsatzstahl, spanend hergestellte Verzahnung, NL 0

6 Anmerkung

Das vorgestellte Forschungsvorhaben (Projektnummer 14058 BG) wurde aus Mitteln der FVA (Forschungsvereinigung Antriebstechnik) bzw. der AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) finanziert. Genauere Untersuchungsergebnisse stehen Mitgliedsfirmen der FVA zur Verfügung.

7 Zusammenfassung

Im Zuge eines Forschungsvorhabens im Bereich der Welle-Nabe-Verbindungen fanden am IMW umfangreiche experimentelle Untersuchungen an ZWVen nach DIN 5480 statt. Durch die Zusammenführung der am IMW erarbeiteten Ergebnisse mit denen der ebenfalls beteiligten Dresdner Forschungsstelle konnten abschließend verlässliche Kerbwirkungszahlen und Grenzen für die statische Belastbarkeit ermittelt werden.

8 Literatur

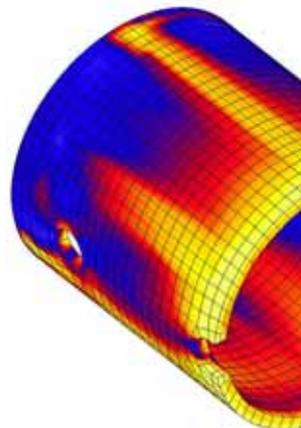
- /1/ DIN 743: Tragfähigkeitsnachweis von Achsen und Wellen. Beuth, Berlin, 2000
- /2/ DIN 5480: Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser. Beuth, Berlin, 2006
- /3/ DIN 471: Sicherungsringe für Wellen; Regelausführung und schwere Ausführung. Beuth, Berlin, 1981

Konstruktion
Berechnung
Simulation



Die ITNW Ingenieurtechnik NordWest GmbH ist ein unabhängiger Dienstleister für Konstruktions- und Berechnungstätigkeiten, Forschungs- und Entwicklungsaufgaben im Umfeld der Luft- und Raumfahrttechnik, des Automobilbaus und des Maschinenbaus.

Das Unternehmen ist in drei Bereiche gliedert, die ausgehend vom Produktkonzept, der Konstruktion, der Berechnung und Simulation über das Validieren im Lebensdauerversuch bis hin zur Fertigung technischer Produkte die gesamten Ingenieur Tätigkeiten der Produktentwicklung abdecken.



ITNW Ingenieurtechnik NordWest GmbH
Tel: +49 441 2050 960 • Fax: +49 441 2050 961
E-Mail: email@it-nw.de

Die Eigenschaften neuer Seilkonstruktionen zur Realisierung von Leichtbauseiltrieben



Dietz, P.; Schwarzer, T.

In nahe liegender Zukunft sollen Kunststoff- und Hybridseile in Leichtbaukonstruktionen bei einer mehrlagigen Bewicklung der Seiltrommel eingeführt werden. Dies erfordert Begleitmaßnahmen im Auslegungskonzept und in der Gestaltung der Trommel, da die Eigenschaften solcher Seile gänzlich unterschiedlich zu denen von Drahtseilen sind.

In the near future chemical fibre- and hybridropes are going to be implemented in the construction of lightweight multilayer winches. This application necessitates measures in existing dimensioning concept and calculation of such winches, due to the strongly different rope characteristics.

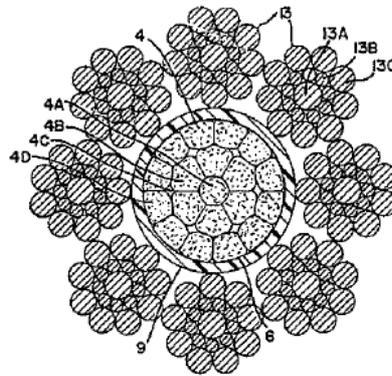
1 Einleitung

Im Maschinen- und Anlagenbau geht die Tendenz aufgrund des Kosten- und Termindrucks dahin, bereits so viele Einzelkomponenten wie möglich vormontiert anzuliefern und aufzubauen. Dies hat zur Folge, dass Kranhersteller den Anforderungen nach stetig steigenden Hakenlasten und Auslegerreichweiten nachkommen müssen. Da aber gerade im mobilen Anwendungsbereich eine hohe Flexibilität unabdingbar ist, bedeutet dies letztendlich für die Gestaltung und Dimensionierung von Seiltrommeln, die Realisierung größerer Seilzuglasten und Seilspeicherlängen bei gleichzeitiger Reduzierung des verfügbaren Bauraums. Diese Anforderungen können aber nur mit ausreichend und beanspruchungsgerecht dimensionierten, mehrlagig bewickelten Seiltrommeln erreicht werden. In diesem Zusammenhang sollen Kunststoff- und Hybridseile zum Einsatz kommen, die ein um ein Vielfaches geringeres Eigengewicht aufweisen, damit ein Leichtbauseiltrieb noch realisierbar ist.

2 Mögliche Seilkonstruktionen

Im Aufbau des Seils können verschiedene Ansätze verfolgt werden, welche von reinen Faserseilen mit einem Kunststoffmantel zum

Schutz vor mechanischen Beschädigungen, bis hin zu Misch- oder Hybridkonstruktionen gehen. Reine Faserseile sind nicht robust genug um den mechanischen Anforderungen während der Installation und des Betriebs standzuhalten, besonders im Fall einer mehrlagigen Trommelbewicklung. Eine mögliche Lösung hierfür können die so genannten Hybridkonstruktionen sein. Sie kombinieren die Robustheit eines Stahlseils mit den gewichtsreduzierenden Eigenschaften von Faserseilen. In der Regel bestehen diese Seilkonstruktionen aus einem Faserkern, der durch Drahtaußenlitzen geschützt wird. In **Bild 1** ist ein solcher Seilaufbau dargestellt.



4 - Kevlar®-Kern und Kernelemente, 6 - Fasermantel, 9 - Kernschutzmantel, 13 - äußere Drahtlitzen

Bild 1: Beispielhafter Aufbau einer Hybridkonstruktion aus einem US-Patent /1/

3 Messung der Seileigenschaften

Die Kenntnis der Seileigenschaften ist für eine hinreichend genaue Dimensionierung einer Trommelgeometrie von großer Bedeutung, da das Längs- und das Querelastizitätsmodul des verwendeten Seils einen großen Einfluss auf die Seilpaketsteifigkeit und somit auch auf die Belastung der Trommel haben. Dies gilt insbesondere für eine mehrlagige Bewicklung. Im Rahmen eines laufenden Forschungsvorhabens der DFG wurden am Institut für Maschinenwesen zwei dieser oben angeführten Hybridkonstruktionen auf dem Seilzugprüfstand (**Bild 2**) hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht. Es wurden Messungen unter verschiedenen Längs- und Querkraftverhältnissen sowie unterschiedlicher Lagenanzahl und Anordnung gefahren, um den jeweiligen Einfluss auf die sich einstellenden Eigenschaften zu ermitteln.

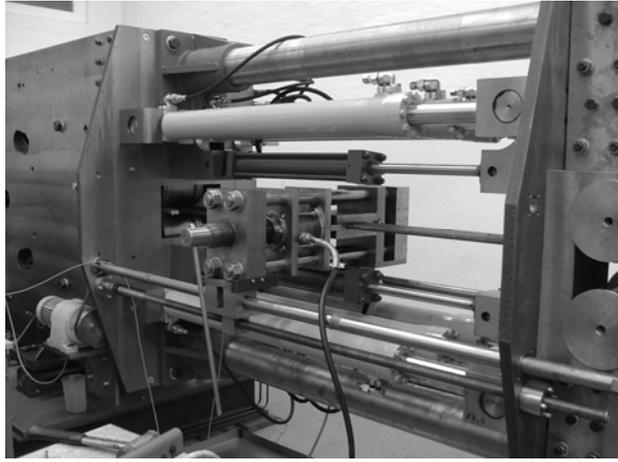
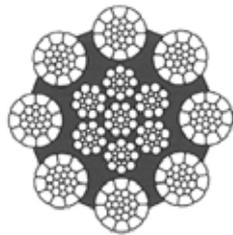


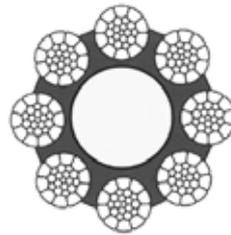
Bild 2: Seilzugprüfstand

3.1 Versuchsseile

Die untersuchten Hybridseile basieren auf der Turboplast-Konstruktion der Firma CASAR (**Bild 3**). Es handelt sich hierbei um eine weit verbreitete Konstruktion für Hubseile, da es eine gute Flexibilität aufgrund der 8 Außenlitzen mit einer hohen Verschleißfestigkeit durch die Verdichtung dieser Litzen kombiniert. In Anlehnung an die Standardvariante (a), die nur mit Stahldrähten und Litzen ausgeführt ist, wurde bei den Hybridvarianten (b) der Seilkern durch einen Faserkern ersetzt. Die Querschnittsfläche dieses Kerns beträgt rund 25% des Gesamtquerschnitts.



(a) Standard Turboplast



(b) Hybrid Turboplast

Bild 3: Querschnitt einer Standard Turboplast und einer Hybrid Turboplast Konstruktion /2/

Die zwei untersuchten Varianten haben denselben Aufbau, unterscheiden sich aber im verwendeten Fasermaterial des Kerns. Bei dem verwendeten Material handelt sich um Aramid-Fasern mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften. Diese Fasern besitzen eine sehr hohe Zugfestigkeit in Verbindung mit einer geringen Dehnung und einer geringen Dichte. Im Vergleich zu einem üblichen Seildraht sind die Kennwerte der beiden eingesetzten Fasertypen in **Tabelle 1** dargestellt. Das Hauptunterscheidungsmerkmal liegt im E-Modul der jeweiligen Faser.

Fasertyp	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]	E-Modul [GPa]	Dichte [g/cm ³]
Standard Modul (SM)	3250	3,7	75	1,44
Hohes Modul (HM)	3100	2,7	105	1,45
Draht (hochfest)	1770	2,6	200	7,85

Tabelle 1: Eigenschaften von Aramidfasern, im Vergleich zu den Eigenschaften eines typischen Seildrahts /2/

Als Vergleich für die ermittelten Kennwerte dienen zwei im Kranbereich verwendete Seilkonstruktionen; zum einen ein PDD 1315 CZ und zum anderen ein PC EUROLIFT. Hierbei handelt es sich um reine Drahtseile mit einer unterschiedlichen Seilkonstruktion. Alle Seile haben einen Nenndurchmesser von 23mm und eine Mindestbruchkraft F_{\min} in Abhängigkeit der jeweiligen Konstruktion im Bereich von 410 kN bis 490 kN.

3.2 Versuchsparameter

Zu den während der Versuche variierten Parametern zählen:

- Längsspannungsverhältnis $k_L = 0,1; 0,2; 0,3$
mit $\sigma_L = k_L \cdot \sigma_N$ (1)
 σ_L Zugspannung im Seil
 σ_N Nennfestigkeit des Drahts
- Querspannungsverhältnis $k_Q = 0,07; 0,1$
mit $\sigma_Q = k_Q \cdot \sigma_L$ (2)
 σ_Q Querspannung im Seil

- *Lagenanzahl und Anordnung*
1-4 Lagen, Säulen- und Pyramidenanordnung

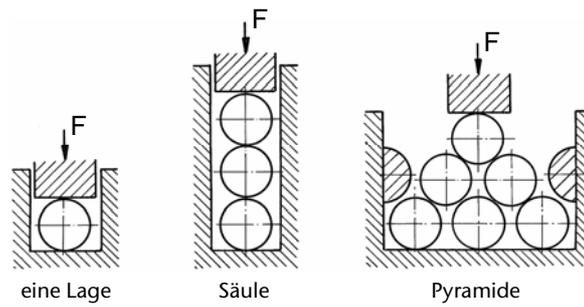


Bild 4: Untersuchte Seilanordnungen /3/

4 Ergebnisse

Die dargestellten Auswertungen beziehen sich in erster Linie auf die Ermittlung des Seilquerschnittsmoduls E_{SQ} , da das Längselastizitätsmodul E_{SL} durch den Seilhersteller bei der Bestimmung der Bruchkraft ermittelt und angegeben wird. **Bild 5** zeigt das sich einstellende Querschnittsmodul in Abhängigkeit des Längsspannungsverhältnisses k_L bei einem konstanten Querspannungsverhältnis $k_Q = 0,07$.

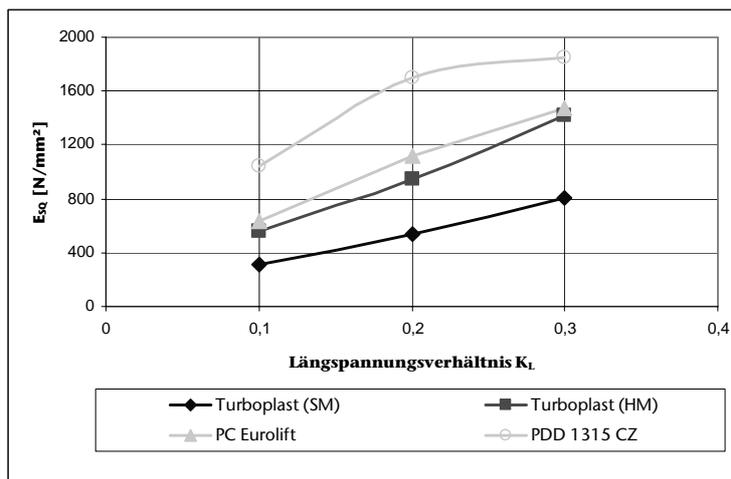


Bild 5: E_{SQ} in Abhängigkeit von k_L ; $k_Q = 0,07$; 1. Lage

Das Diagramm stellt für alle untersuchten Seile einen Anstieg des Querelastizitätsmoduls mit einer Erhöhung des Längsspannungsverhältnisses, sprich einer Erhöhung der Seilzugkraft, dar. Die Hybridkonstruktion mit dem Faserkern (SM) weist bei allen Messungen das geringste Quermodul auf. Das Quermodul des Seils mit dem hochmoduligen Faserkern (HM) ist bei allen Messpunkten um das 1,5-fache größer als bei der Standardvariante. Herauszustellen ist die Tatsache, dass die Hybridkonstruktion (HM) von den ermittelten Quermodulen im Bereich der PC Eurolift-Konstruktion liegt ($k_Q = 0,07$), welches eine reine Drahtseilkonstruktion ist. Das PDD 1315 CZ zeigt im Vergleich zum Eurolift eine wesentlich höhere Quersteifigkeit.

Die Abhängigkeit des Seilquerelastizitätsmoduls vom Längsspannungsverhältnis k_L bei einem konstanten Querspannungsverhältnis $k_Q = 0,1$ ist in **Bild 6** dargestellt.

Aus den ermittelten Quermodulen bei diesem Querspannungsverhältnis ist ein nahezu identischer Verlauf wie in der vorherigen Darstellung zu erkennen. Aufgrund der höheren Vorspannung in Längsrichtung und einer damit einhergehenden Verdichtung des Seilquerschnitts, liegen die hier bestimmten Querelastizitätsmodule in einer Größenordnung von 25-35% über denen bei einem Querspannungsverhältnis von $k_Q = 0,07$. Besonders herauszustellen ist in diesem Fall die Annäherung der Quermodule der beiden Drahtkonstruktionen und der Hybridkonstruktion (HM).

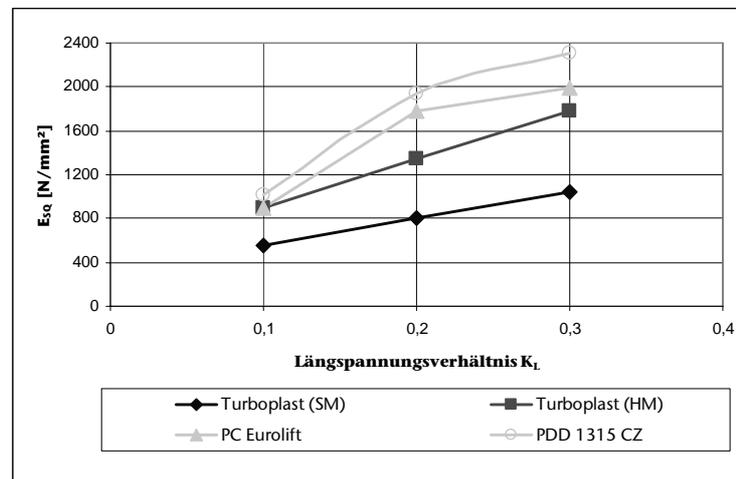


Bild 6: E_{SQ} in Abhängigkeit von k_L ; $k_Q = 0,1$; 1. Lage

Bild 7 zeigt das sich einstellende Quermodul in Abhängigkeit von der Lagenanzahl bei einem konstanten Querspannungsverhältnis $k_Q = 0,07$.

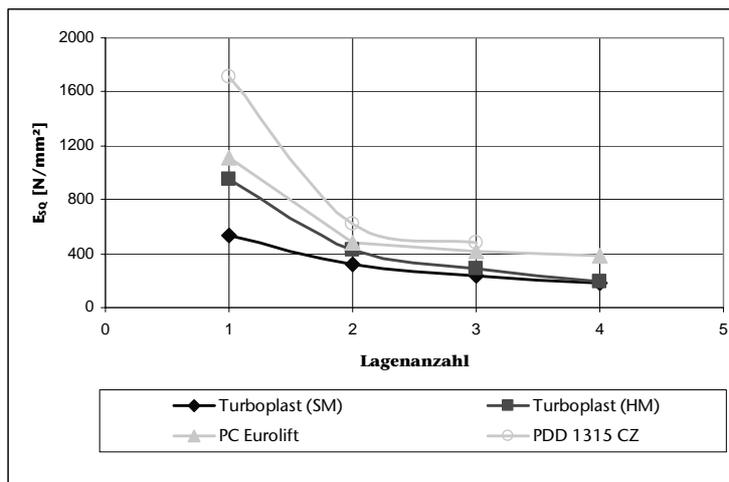


Bild 7: E_{SQ} in Abhängigkeit der Lagenanzahl; $k_L = 0,2$; $k_Q = 0,07$

Generell lässt sich bei der lagenbezogenen Darstellung des Querelastizitätsmoduls eine degressive Abnahme der Steifigkeit mit Erhöhung der Lagenanzahl feststellen, die sich in den höheren Lagenzahlen einem konstanten Wert annähern. Die Unterschiede in der Quersteifigkeit besonders in der ersten Lage werden mit zunehmender Lagenanzahl kleiner, so dass diese ab der dritten Lage nur in einem kleinen Bereich variieren.

Die Abhängigkeit des Seilquerelastizitätsmoduls von der Lagenanzahl bei einem konstanten Querspannungsverhältnis $k_Q = 0,1$ ist in **Bild 8** dargestellt. Aus den ermittelten Quermodulen bei $k_Q = 0,1$ ist auch in diesem Fall ein nahezu identischer Verlauf wie in der vorherigen Darstellung (**Bild 7**) zu erkennen. Festzuhalten ist in diesem Fall, dass die Quersteifigkeiten der beiden Hybridkonstruktionen im höheren Lagenbereich bei den beiden untersuchten Querspannungsverhältnissen nahezu identisch sind. Analog zu der Betrachtung mit einer Seilage bewirkt die höhere Vorspannung in Längsrichtung ein in den ersten zwei Lagen größeres Querelastizitätsmodul.

Die ermittelten Werte für die beiden Drahtkonstruktionen liegen in einem üblichen Bereich für einen solchen Seildurchmesser und Seilaufbau /3/,/4/.

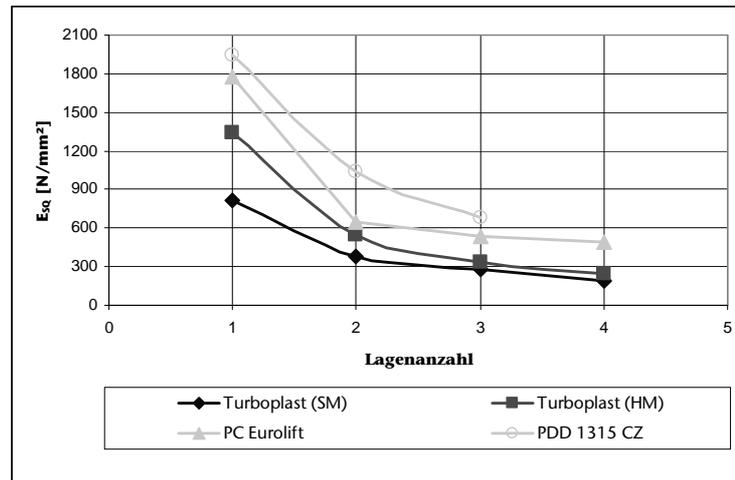


Bild 8: E_{SQ} in Abhängigkeit der Lagenanzahl; $k_L = 0,2$; $k_Q = 0,1$

Der Einfluss einer Pyramidenanordnung, welche der Seilanordnung im Parallelbereich einer LEBUS-Berillung entspricht, wird in Abhängigkeit vom Längsspannungsverhältnis für die Hybridkonstruktion mit hohem E-Modul (HM) in **Bild 9** dargestellt.

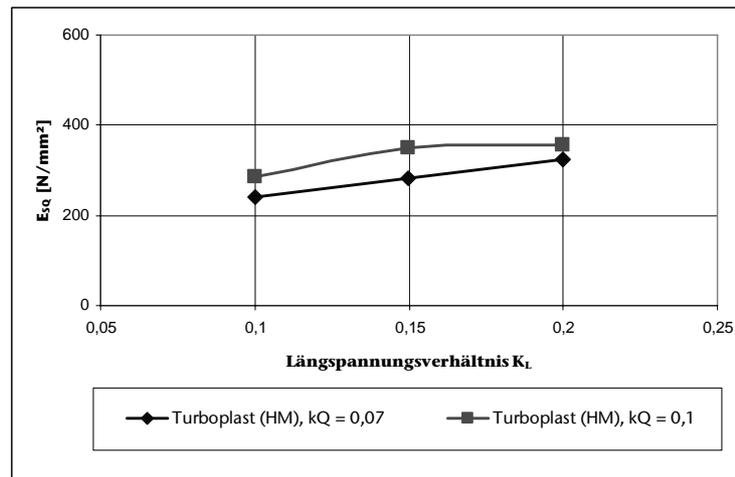


Bild 9: E_{SQ} in Abhängigkeit von k_L ; Pyramidenanordnung

Die Darstellung zeigt ein ansteigendes Querelastizitätsmodul bei den gemessenen Längsspannungsverhältnissen. Vergleicht man die Werte bei einem Querspannungsverhältnis $k_t = 0,2$ mit denen für drei Lagen in Säulenordnung, so liegen die Steifigkeiten für die Pyramidenanordnung um rund 80 N/mm^2 über denen der Säulenordnung. Auch dieses Verhalten wurde in früheren Messungen /4/ festgestellt.

5 Zusammenfassung

Die allgemeinen Ausführungen verdeutlichen, dass Kunststoff- oder Hybridseile – als laufendes Seil – aufgrund ihres Gewichtsvorteils gegenüber Drahtseilen mit vergleichbarer Tragfähigkeit den Leichtbau im Bereich der Hebezeuge erheblich forcieren können. Für dieses Einsatzfeld liegen bis heute nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen vor. Das Problem der Mehrlagenbewicklung einer Seiltrommel mit solchen Seilen wurde noch nicht bearbeitet.

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen zur Messung der Seileigenschaften haben gezeigt, dass sich bei der Verwendung solcher Seile, in diesem Fall für die beiden betrachteten Hybridkonstruktionen mit unterschiedlichem Faserwerkstoff, ein reduziertes Querelastizitätsmodul aufgrund des Faserkerns einstellt. Es ist aber auch ersichtlich, dass man durch die Wahl des Faserwerkstoffs in den Bereich normaler Drahtkonstruktionen kommen kann. Durch diese Eigenschaftsänderung stellt sich ebenfalls ein geändertes Beanspruchungsverhalten der Seiltrommel ein. So erhöht sich einerseits durch eine Reduzierung des Querelastizitätsmoduls die Beanspruchung auf die Bordscheiben, andererseits kommt es zu einer Entlastung des Trommelmantels. Weiterhin wird durch den Dämpfungsanteil in den Kunststoffseilen eine Verlustarbeit induziert, welche in Wärme umgesetzt wird. Alle diese Effekte müssen in die bestehenden Auslegungsgrundlagen für Seiltrommeln einfließen, welche letztendlich auch ein beanspruchungsgerechtes, gewichtsoptimiertes Trommeldesign bei der Verwendung von Kunststoff- oder Hybridseilen ermöglichen.

Derzeit erfolgen die weiteren Auswertungen der mit beiden Hybridseilkonstruktionen durchgeführten Trommelmessungen mit fünfzähliger Bewicklung (**Bild 10**), welche mit den Messungen für ein herkömmliches Drahtseil verglichen werden, um die in anderen Artikeln beschriebenen theoretischen Modelle zu validieren.

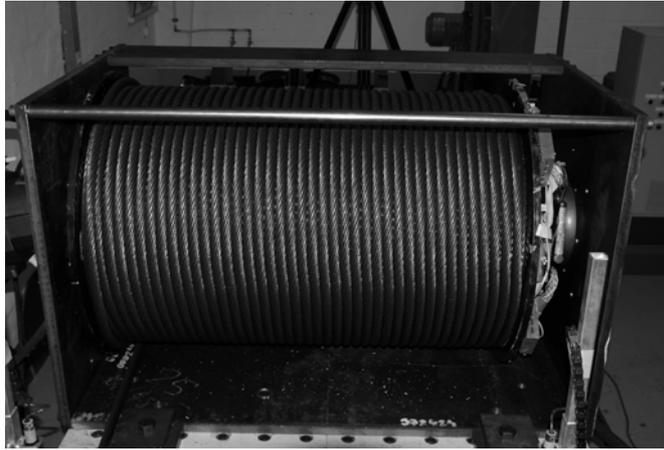


Bild 10: Hybridkonstruktion auf dem Trommelprüfstand

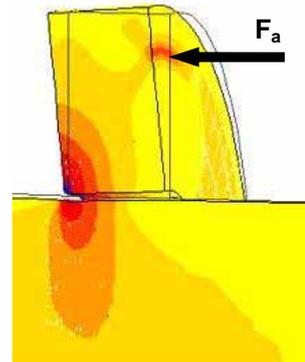
6 Literatur

- /1/ Klees, D.A.; Hoganson, R.B.; Data, H.L.: Rope with fibre and method of forming same, US Patent 4887422, 1989
- /2/ Ridge, I.M.L.; O’Hear, N.; Verreet, R.; Grabandt, O.; Das, C.A.: High strength fibre cored steel wire rope for deep hoisting applications, OIPEEC Conference Johannesburg 2007
- /3/ Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und plastischem Werkstoffverhalten; Dissertation, TU Clausthal, 2001
- /4/ Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln; Dissertation, TU Clausthal, 2000
- /5/ Schwarzer, T.: Die Problematik der Auslegung mehrlagig bewickelter Seiltrommeln bei der Bewicklung mit Kunststoff- und Hybridseilen, Kranfachtagung Bochum, 2007

Aktuelle Entwicklungen in der Druckkamberechnung

Thoden, D.; Lütkepohl, A.; Schwarzer, T.

Der Einsatz von Druckkämmen in Zahnradgetrieben beschränkt sich gegenwärtig, bis auf wenige Ausnahmen, auf Turbogetriebe. Durch die Entwicklung genauerer Berechnungsmethoden sowohl für die mechanische Festigkeit als auch für die Schmierverhältnisse soll die Druckkammtechnik einer breiteren Verwendung zugeführt werden.



The use of thrust collars in gear drives at the moment is limited save for a few exceptions to turbo transmissions. With the development of new calculation methods as well for the mechanical strength as for the lubrication situation shall bring the technique of thrust collars to a broader range of application.

1 Einleitung

Der Einsatz von schrägverzahnten Zahnradern in Stirnrad- und Planetengetrieben ist seit Jahren Stand der Technik. Dem Hauptvorteil der größeren Laufruhe und der damit verbundenen geringeren Geräuschentwicklung steht die Entstehung einer Axialkraft gegenüber, die über zusätzliche Lagerungen ausgeglichen werden muss.

Werden dafür, wie es üblich ist, Wellenlagerungen verwendet, so sind für jede Welle speziell ausgelegte Axiallagerungen nötig. Neben den erhöhten Reibungsverlusten müssen auch die Wellen und das Gehäuse so steif ausgelegt werden, dass es zu keinen, den Zahneingriff behindernden, Verformungen kommt.

Einen anderen Weg schlug die Firma BBC vor 85 Jahren ein, als sie das Maschinenelement Druckkamm patentieren ließ /1/, das als ein an der Verzahnung angebrachtes Axialgleitlager angesehen werden kann, mit dem die beschriebene Axialkraft nahe dem Entstehungsort zurückgeführt und ausgeglichen wird. Ersichtlich wird dieses in **Bild 1**, wo der Axialkraftfluss vergleichend für ein Getriebe ohne und mit Druckkamm aufgetragen ist.

Neben dem Vorteil, Wellen und Gehäuse leichter auslegen zu können, kann auf ein zweites Axialwellenlager verzichtet werden. Darüber hinaus kann bei schnell laufenden Getrieben, die mit einer externen Axialkraft beaufschlagt werden, das Führungslager auf die

langsam laufende Welle gelegt werden, womit sich zusätzliche Reibungsverluste minimieren lassen.

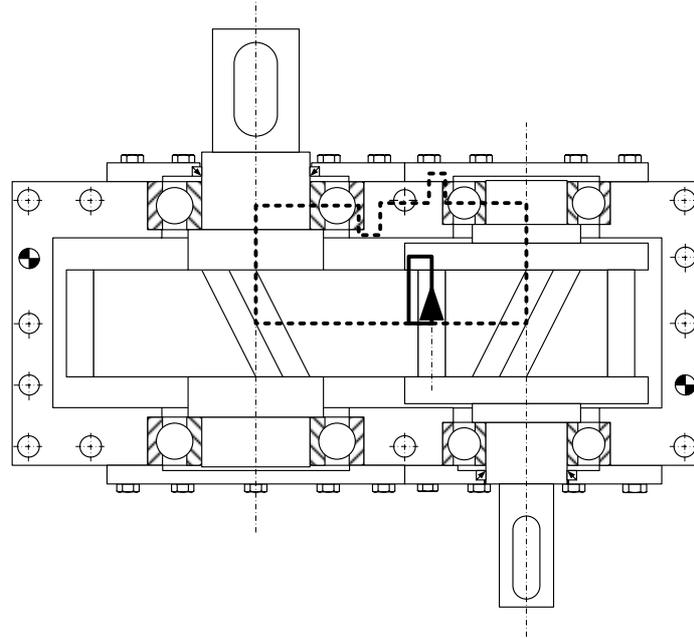


Bild 1: Axialkraftfluss im schrägverzahnten Stirnradgetriebe ohne (gestrichelt) und mit (ausgezogen) Druckkamm

1.1 Stand der Technik

Trotz vielfältiger Bemühungen, seinen Bekanntheitsgrad zu steigern, führt der Druckkamm ein Schattendasein im allgemeinen Maschinenbau /2, 3/. Eine Ausnahme bildet hier nur der Bereich der Turbogetriebe.

Beispiele aus jüngerer Vergangenheit zeigen aber, dass der Einsatz von Druckkämmen über diesen Bereich hinaus angedacht wird und möglich ist /4/. Die breit gestreute Verwendung scheitert jedoch in erster Linie am Fehlen geeigneter allgemeiner Berechnungsvorschriften, die die komplexe Spannungs- und Schmiersituation in einfachen Ansätzen handhabbar machen.

Das IMW ist daher bemüht, diesen Missstand zu beseitigen und unternimmt auf dem Gebiet der Druckkammtechnik weitere Forschungsanstrengungen.

Hierzu ist es nötig, die Verformungsverhältnisse unter Belastung genau zu kennen, da diese sowohl Einflüsse auf die Festigkeit des Druckkamms als auch die Tragfähigkeit des Schmierfilms haben /5/.

1.2 Analytisches Berechnungsmodell

In seiner üblichen Ausführung ist der Druckkamm ein aufgeschrumpfter Ring und kann als Pressverband dimensioniert werden. Weitere Ausführungsformen sind in /2/ dargestellt. Als erste Annäherung für eine analytische Berechnung wird die innen eingespannte Kirchhoff'sche Kreisringplatte verwendet. Angewandt auf den Druckkamm müssen für dieses Modell folgende Annahmen getroffen werden:

- feste Einspannung in der Mitte
- symmetrische Belastung
- gegenüber der Dicke großer Durchmesser

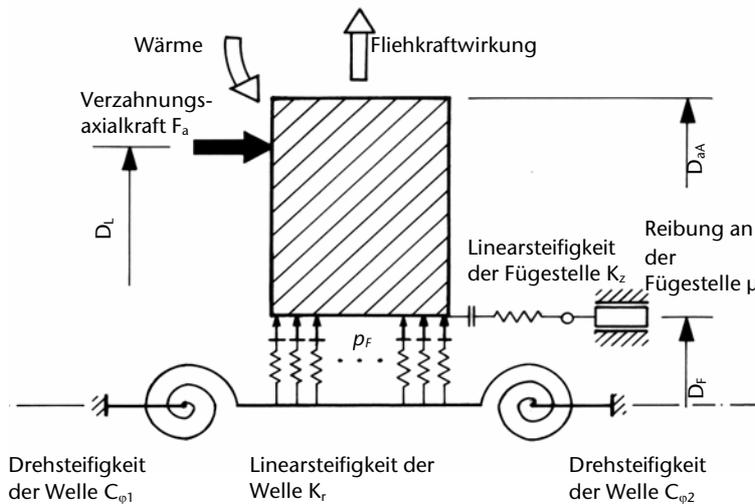


Bild 2: Ersatzmodell des aufgeschrumpften Druckkamms unter Axialkraft, Fliehkraft und Wärmewirkung /2/

Da der Druckkamm jedoch nur punktuell axial belastet wird, kommt dieses Modell hier schon an seine Grenzen. Wird die Klaffkraft erreicht, muss die Einspannung als gelenkig angesehen werden. Nach den Erkenntnissen aus /2/ wäre hier ein Sicherheitsfaktor von 3 und größer nötig, damit Festigkeitsnachweise, die mit der symmetrischen Theorie durchgeführt würden, tragfähig wären. Um dieser Überdi-

mensionierung zu entgehen, wird die Einzelkraft durch Fourierreihenentwicklung in eine Linienlast transformiert. Die daraus ermittelte analytische Gleichung vernachlässigt aber weiterhin die Schubspannungen, die in dem üblicherweise breit, gegenüber dem Durchmesser, ausgeführten Druckkamm vorhanden sind.

Werden weitere Einflüsse wie Wärmeeintrag, Fliehkraft sowie die Festigkeitseigenschaften von Fügestelle und Welle berücksichtigt, muss von dem in **Bild 2** dargestellten Ersatzbild ausgegangen werden. Erst eine analytische Annäherung an die dort herrschenden Umstände kann zu einer Getriebeauslegung unter Leichtbaugesichtspunkten führen, ohne eine Optimierung durch langwierige numerische Simulationen durchführen zu müssen.

2 Aktuelle Forschungsarbeiten

In einem zurzeit laufenden Forschungsvorhaben der DFG soll eine allgemeingültige Berechnungsgrundlage zur Auslegung von Druckkämmen mit unterschiedlichen Abmessungen entwickelt werden. Das Untersuchungsspektrum umfasst Geometrien die aufgrund ihrer Gestalt Modellansätzen von der Platten- bis hin zur Kreisringtheorie entsprechen. Im Folgenden werden Auszüge der Ergebnisse der bislang durchgeführten numerischen Untersuchungen dargestellt.

2.1 Numerische Untersuchungen

Numerische Simulationen sind notwendig, um die Randbedingungen für eine spätere Festlegung des analytischen Lösungsansatzes zu ermitteln. Ein Untersuchungspunkt ist hierbei die Ermittlung des sich bei Belastung einstellenden Kontaktdrucks bei unterschiedlichen Druckkammgeometrien.

Tabelle 1 zeigt Durchmesser und Breite der in den folgenden Diagrammen betrachteten Probengeometrien.

Probennummer	D_{aA} [mm]	B [mm]
01	162	21
04	139	33
07	123	41
11	107	51
14	95	57

Tabelle 1: Ringgeometrien der numerischen Simulation bei einem Wellendurchmesser von $D_F = 73$ mm

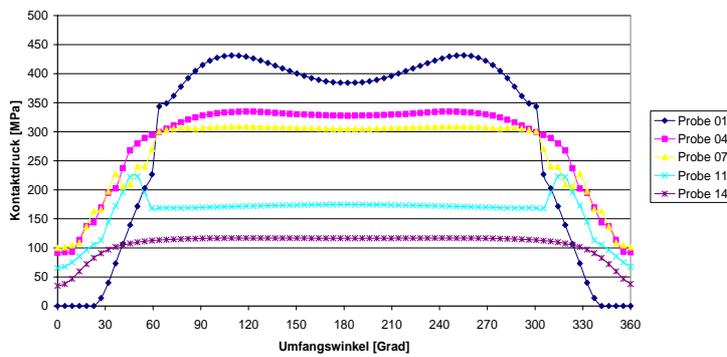


Bild 3: Kontaktdruckverteilung über dem Umfang, Verbindungsbeginn der Lasteinleitungsseite

Bild 3 zeigt den sich einstellenden Kontaktdruck am Verbindungsbeginn (Lasteinleitungsseite), bei axialer Belastung. Die Kraft (50 kN) wird in diesem Fall über ein Ringsegment von 20° aufgebracht. Im Diagramm liegt der Kräfteinleitungsbereich symmetrisch bei 0° bzw. 360°. Es ist zu erkennen, dass sich die nach dem Fügevorgang herrschende, über dem gesamten Umfang gleichmäßige Kontaktdruckverteilung durch die Belastung verändert. Bei 0°/360° ist der Kontaktdruck aufgrund der angreifenden Kraft geringer als bei 180°. D.h. der Druckkamm beginnt sich am Verbindungsbeginn, am Kräfteinleitungsbereich, von der Welle abzuheben.

Bei Probe 01 ist ein deutliches Klaffen der Verbindung feststellbar (Kontaktdruck = 0). Die Verkipfung und die damit einhergehende Verformung sorgen bei 110° und 260° für eine Überhöhung des Kontaktdrucks. Bei den anderen untersuchten Geometrien tritt kein Klaffen am Verbindungsbeginn auf.

Mit abnehmendem Durchmesser und zunehmender Breite des Druckkamms wird die Veränderung des Kontaktdrucks über dem Umfang geringer und vergleichmäßigt sich, da die Geometrie aufgrund der gewählten Abmessungen steifer wird.

Bild 4 zeigt den sich einstellenden Kontaktdruck am Verbindungsende. Es ist erkennbar, dass sich aufgrund des Klaffens bzw. der Verkipfung/Verformung des Druckkamms im Kräfteinleitungsbereich auf der Gegenseite der Verbindung ein „Kneifen“ hervorgerufen wird, d.h. der Kontaktdruck erhöht sich bei 0° bzw. 360°. Auch in diesem Fall vergleichmäßigt sich der Kontaktdruckverlauf mit abnehmendem Durchmesser und zunehmender Breite des Druckkamms.

Neben der Betrachtung des Kontaktdrucks wurden auch Untersuchungen zur Verformung bzw. Spannungsverteilung innerhalb der Verbindung durchgeführt und ausgewertet.

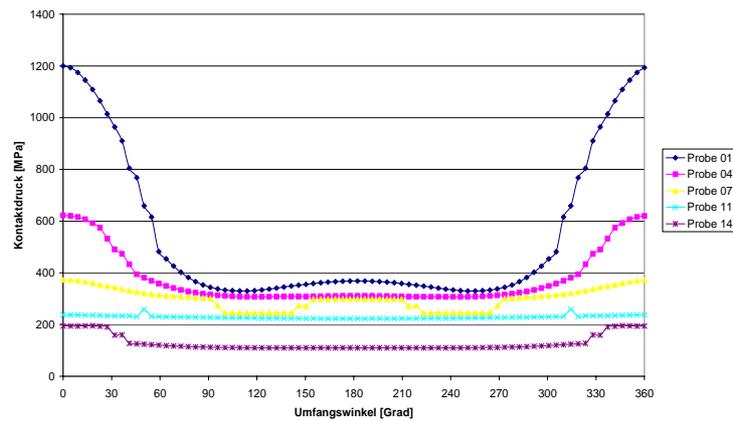


Bild 4: Kontaktdruckverteilung über dem Umfang, Verbindungsende, Gegenseite

2.2 Schmierverhältnisse

Als hydrodynamisches Lager sind Druckkämme im instationären Betrieb empfindlich, wodurch der Einsatz in Industrie- und Fahrzeuggetrieben erschwert wird. Mit der Erstellung des Berechnungsprogramms in /5/ ist ein erster Schritt getan worden, das elastoelastohydrodynamische Verhalten zu untersuchen. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Anfahr- und Abbremsituation, da hier der Mischreibungsbereich durchfahren wird. Wünschenswerterweise sollte dieses unter Last geschehen, entsprechende Verfahrensweisen und Vorkehrungen, die den Verschleiß berücksichtigen oder verhindern sind daher zu erarbeiten.

3 Zusammenfassung

Ein Druckkamm ist ein interessantes Maschinenelement, das Axialkräfte, die durch Schrägverzahnungen hervorgerufen werden, direkt ausgleicht. Durch die kleinere Dimensionierung von Wellen, Gehäuse und Lagerungen ist der Bau von kompakteren, leichteren und effizienteren Getrieben möglich.

Durch die Entwicklung handhabbarer Berechnungsvorschriften für die mechanische Festigkeit und die genaue Untersuchung der Schmiersituation kann das Anwendungsgebiet für Druckkämme deutlich erweitert werden.

4 Literatur

- /1/ Brown, Boveri & Cie AG, Schweiz: Stirnradgetriebe mit einseitiger Schraubenverzahnung, P: 401652, 1922
- /2/ Dietz, P., Mupende, I., Druckkämme unter instationärer Axialkraftbelastung. Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal 28 (2003): S. 47-54.
- /3/ Dietz, P., Mupende, I., Druckkamm - ein altes Maschinenelement mit neuem Anwendungspotential. Konstruktion 58 (2006) 4: S. 69 - 75.
- /4/ Dehner, E., Heidrich, G., Küçükay, F., Kompaktplanetengetriebe - Eine neue Planetengetriebegeneration. Antriebstechnik 24 (1985) 8: S. 40,42,47-48.
- /5/ Thoden, D., Elasto-hydrodynamische Schmierung von Druckkämmen. Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal 31 (2006): S. 23-26.

Umwelttechnik

**Anlagen zur Abluftreinigung
Abwasserbehandlung
und Abfallentsorgung**



Abwasser-Gesamtanlage im Automobilwerk



EISENMANN Turaktor®
zur Entsorgung toxischer
Flüssigkeiten und Gase

EISENMANN hat das komplette Programm für Ihre umweltfreundliche Produktion. Unsere umfassende Produktpalette bietet für nahezu alle Entsorgungsthemen die jeweils richtige Lösung aus einer Hand. Sprechen Sie mit uns!

EISENMANN

Postfach 1280 · 71002 Böblingen
Tel. +49 7031 78-0 · Fax +49 7031 78-1000
www.eisenmann.de · info@eisenmann.de

Adsorptionsrad zur Lösemittel-
Aufkonzentrierung und
nachgeschalteter Thermischer
Nachverbrennung TNV zur
Lösemittel-Entsorgung

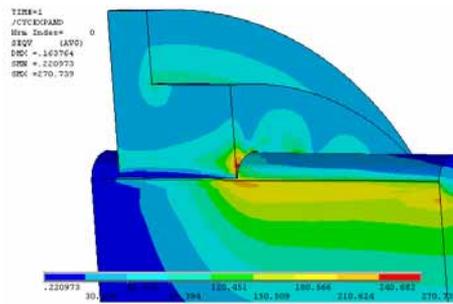


EISENMANN

Leistungssteigerung von Zahnwellenverbindungen durch Neugestaltung des Zahnprofils

Dietz, P.; Wächter, M.

Numerische Untersuchungen an Zahnwellenverbindungen haben gezeigt, dass sich durch eine optimierte Zahnform nach dem Novikov-Grundprofil bei Drehmomentbelastung eine Beanspruchungsreduzierung im Zahnfuß auf 77% und bei der Flankenbeanspruchung auf 68% gegenüber einer Zahnwellengeometrie mit Evolventenflanken nach DIN 5480 bei gleichen Grundabmessungen erzielen lässt. Ferner ist eine Zentrierfähigkeitserhöhung festzustellen, die bei Auftreten von Querkräften zu vermindertem Verschleiß führt und die Lebensdauer der Verbindung erhöht. Die entwickelte Zahnform ermöglicht bei gleichem Bauraum höhere Leistungsdurchsätze und eröffnet Anwendungschancen in der gesamten Antriebstechnik.



Positive fit connections with circular arc type teeth are expected to have a larger tooth foot and tooth face load carrying capacity than involute and spline type tooth connections due to their convex - concave tooth geometry. By making use of the contact in the outer part of the flanks, a better centring behaviour than with the practically only flank centred use of involute tooth shapes is assumed. The basically more compact shape of teeth with circular arc shape should enable easier manufacturing by cold forming. Calculations with FE have shown an increase of load capacity of at least 30%, the radial stiffness under lateral forces is the double compared with involute splines.

1 Ausgangslage

Ausgangspunkt für die Untersuchungen von Wellen-Naben-Verbindungen nach dem Zahnwellenprinzip waren folgende Hypothesen:

Ausgangspunkt für die Untersuchungen von Wellen-Naben-Verbindungen nach dem Zahnwellenprinzip waren folgende Hypothesen:

- Kreisbogen-Verzahnungen lassen aufgrund ihrer konvex-konkaven Flankengeometrie gegenüber den Evolventen-

Verzahnungen eine erhöhte Zahnfuß- und Flankentragfähigkeit erwarten. Hierdurch ist eine Leistungssteigerung unter Beibehaltung der Hauptabmessungen der Verbindung möglich.

- Durch Ausnutzung des Kontakts in den weiter außen (und damit unter wesentlich größerem „Eingriffswinkel“) liegenden Flankenteilen wird ein verbessertes Zentrierverhalten gegenüber der praktisch nur flanken-zentriert eingesetzten Evolventen-Verzahnung angenommen. Damit können aufwendige Fremdzentrierungen oder die fragwürdigen Doppelzentrierungen in Flanken- und Durchmesserbereich entfallen.

Die grundsätzlich kompaktere Form des Zahnes mit Kreisbogenprofil sollte eine fertigungsgerechtere Herstellung mittels Kaltumformen erlauben. Die bekannten Anrisse im Fußbereich und die Wülste an den Zahnköpfen entfallen, die Eigenspannungen durch Umformen tragen zur Festigkeitssteigerung bei und der Fertigungsprozess wird preisgünstiger.

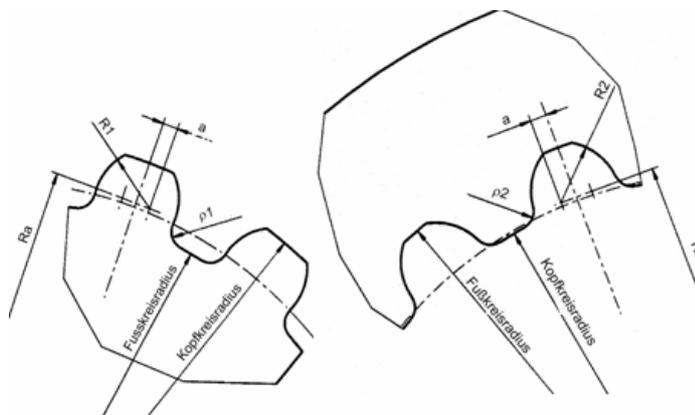


Bild 1: Novikov-Grundprofil, Bezeichnungen und Abmessungen

Abgeleitet aus dem Novikov-Grundprofil für Laufverzahnungen wird eine Optimierung der Zahngeometrie für Zahnwellenverbindungen mit den Kriterien Zentrierfähigkeit, Flächenpressungsoptimierung auf den Zahnflanken und Optimierung der Zahnfußspannung im Verbindungsbereich durchgeführt. Ausgehend von einer Verbindung mit Modul 3 mm und 18 Zähnen wurden die Parameter Zahnkrümmung R_1 und R_2 , Lage der Kreisbögen a und R_a , Zahnfußausrundung ρ_1 und ρ_2 , Modul m und Zähnezahl z variiert. **Bild 1** zeigt am Novikov-Grundprofil die verwendeten Bezeichnungen. Die Simulationen erfolgten durch 2D und 3D-Modelle mit dem Programmsystem ANSYS.

Es konnte eine optimale Geometrie für Drehmomentübertragung gefunden werden, mit dieser Geometrie wurden auch Belastung aus reiner Querkraft und Mischbelastungen simuliert. Alle Rechnungen wurden mit elastischem und elasto-plastischem Werkstoffverhalten durchgeführt.

2 Beanspruchungen unter Torsion

Bild 2 zeigt den grundsätzlichen Unterschied der Beanspruchungshöhe und -verteilung an zwei vergleichbaren Verbindungen unter gleichen Lasten.

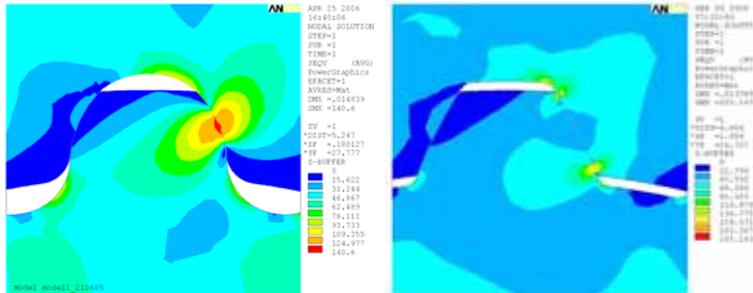


Bild 2: Vergleichsspannung nach von Mises für Drehmomentbelastung 800 Nm, 42CrMo4 rein elastisches Werkstoffverhalten, Modul $m = 3$ mm, Zähnezahl 18. Links: Kreisbogenverzahnung mit Nabenfußausrundungsradius 2,73 mm und Wellenfußausrundungsradius 2 mm; Rechts: Evolventenzahnform DIN 5480

Die Flankenbeanspruchung beim Evolventenprofil weist Beanspruchungsmaxima am Flankenkopf und -fuß auf, die zwar örtlich begrenzt sind, aber mit 205 N/mm^2 um 50 % über der Flankenbelastung der Kreisbogenverzahnung liegen. Die Beanspruchung der Kreisbogenverzahnung lässt sich beeinflussen durch die Krümmungsradien der Zähne und ihre Lage – es zeigt sich ein Optimum bei einer „positiven Profilverschiebung“ von ca. 0,08 und bei einem Verhältnis von Modul zu Flankenkrümmungsradius von 1,25.

Die Spannungsspitze im Naben Zahnfuß ist beim Evolventenprofil ausgeprägter als beim optimierten Kreisbogenprofil. Im Wellenzahnfuß auf der Zugseite lässt sich bei der Kreisbogengeometrie eine Spannungsreduzierung auf 77 % der Evolventenbeanspruchung feststellen. Dies ist im Wesentlichen auf eine optimierte Ausrundungsgeometrie im Zahnfuß gegenüber der genormten Evolventengeometrie zurückzuführen, die in der Verringerung des Wellenquerschnitts ihre Grenze findet (Bild 2 links).

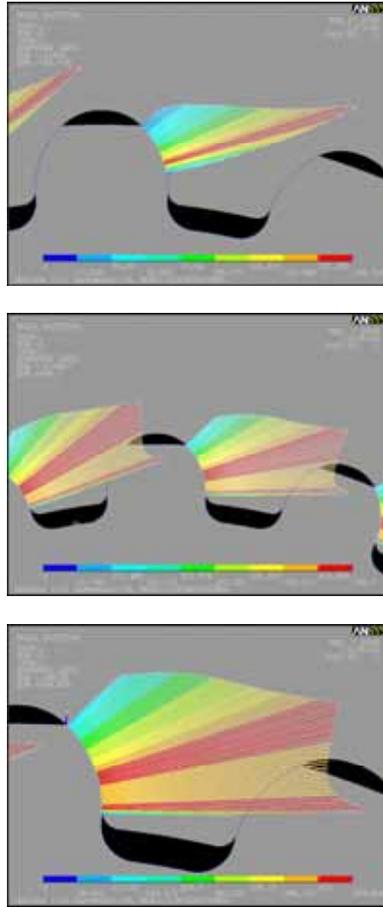


Bild 3: Kontaktdruckverlauf, Zahnform A (R_2 (Nabe)/ R_1 (Welle) = 1,015), 42CrMo 4 ideal elastisch-plastisches Werkstoffverhalten. a) Drehmoment 800 Nm; b) Drehmoment 4800 Nm; c) Drehmoment 5300 Nm

Auch Ort und Verlauf der Beanspruchungen unterscheiden sich beträchtlich. Während unter reiner Drehmomentbelastung sich bei der Evolventenverzahnung die Maxima der Flächenpressung mit hohen Gradienten auf den Bereich um die Zahnköpfe konzentrieren (Bild 2 rechts), liegt das Maximum der Flankenpressung bei der Kreisbogenverzahnung etwa in Flankenmitte und weist aufgrund der verhältnismäßig großen Berührungszone mäßigere Gradienten auf. Bei Vergrößerung des Drehmoments wirken sich die Flankenbelastungen nur im unteren Bereich des Zahnes aus – die Zahnköpfe können damit entsprechend der in der Ausgangslage beschriebenen Aufgabenverteilung unbeeinflusst von der Belastungshöhe sich der Zentrierung der Verzahnung widmen. Die Flankenbelastung, die für die Übertragungsfähigkeit ebenso wie für den Verschleiß von hoher Bedeutung ist, wird im Folgenden in einer Detailbetrachtung näher erläutert: Es werden zwei Flankenformen untersucht – Form A hat ein Verhältnis Nabenkrümmungsradius R_2 zu Wellenkrümmungsradius R_1 von 1.015, Zahnform B von 1,1 und damit grundsätzlich eine kleinere

Kontaktfläche. Bei beiden Zahnformen bildet sich an Zahnfuß und Zahnkopf ein Spalt aus, der Hauptkontaktbereich liegt in Zahnmitte.

Bild 3 und **Bild 4** zeigen die Kontaktdruckverläufe der beiden Geometrien bei jeweils unterschiedlichen Belastungen.

Zahnform A zeigt bei niedriger Belastung (800 Nm, Bild 3a) eine Beanspruchung ausschließlich im Kopfbereich, der Verlauf ähnelt einer

zum Zahnfuß hin verschobenen Parabel. Bei höherer Belastung baut sich der Kontaktdruck in Richtung Zahnfuß auf, da die Zähne sich unter der Last durchbiegen, der Kontaktdruck am Zahnkopf der Welle hat sich damit nicht wesentlich verändert. Bild 3b zeigt den Verlauf bei 6-

facher Belastung gegenüber Bild 3a (4800 Nm), die Beanspruchungen befinden sich gerade noch im elastischen Bereich. Bild 3c stellt den Fall der überelastischen Beanspruchung dar, durch die Verformung der Wellenzähne erhöht sich der Kontaktdruck am Nabenzahnkopf erheblich.

Bei der Zahnform B ergeben sich deutlich andere Kontaktverteilungen. Unter niedriger Last werden Zahnkopf und Zahnfuß nicht belastet, es zeigt sich aber ein starker Druckanstieg an der fußseitigen Kontaktzone. Der maximale Druck ist deutlich höher als bei Zahnform A. Diese Verteilung ändert sich grundsätz-

lich nicht, selbst bei der höchsten Last wird der Hauptanteil der Belastung vom Fuß getragen.

Schlussfolgerung dieser Betrachtung ist, dass Zahnform A für die Flankenbeanspruchung und für die Aufgabe der Zentrierung geeigneter ist. Die Empfindlichkeit der Lastverteilung von der Krümmungsdifferenz im Hertz'schen Kontakt deutet aber darauf hin, dass diese Verzahnungsform hohe Ansprüche an die Fertigungsgenauigkeit stellt.

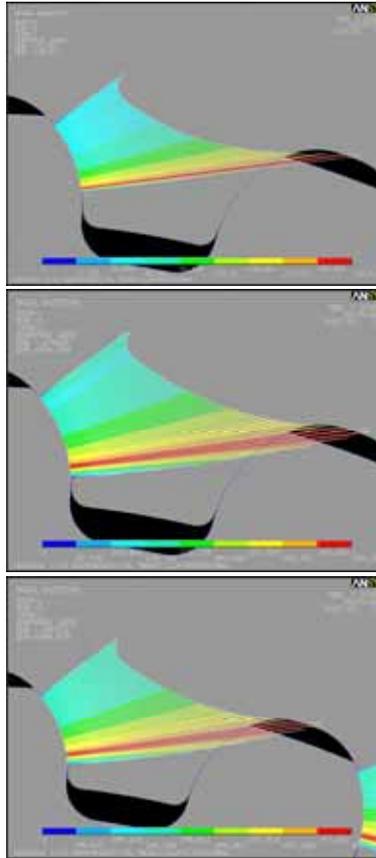


Bild 4: Kontaktdruckverlauf, Zahnform B (R_2 (Nabe)/ R_1 (Welle) = 1,1), 42CrMo 4 ideal elastisch-plastisches Werkstoffverhalten. a) Drehmoment 800 Nm; b) Drehmoment 4800 Nm; c) Drehmoment 5300 Nm

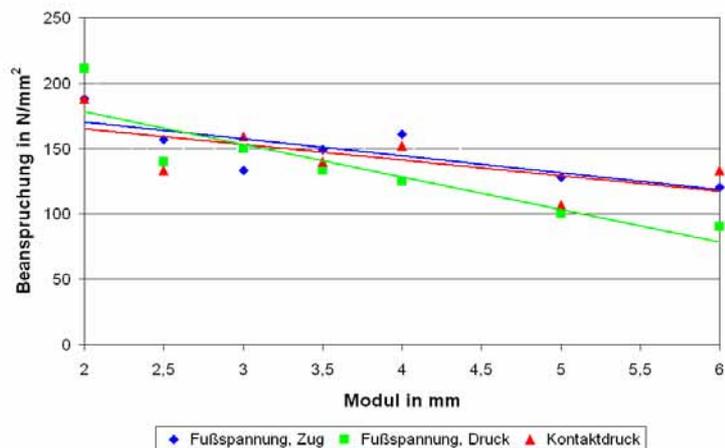


Bild 5: Zahnfußvergleichsspannungen und Flankenkontaktspannung in Abhängigkeit von Modul und Zähnezahl, Drehmoment 800 Nm, Bezugsdurchmesser 54 mm, 42CrMo4 rein elastisches Werkstoffverhalten

Die Zahnfußbeanspruchungen sind im Wesentlichen durch die Zahnfußausrundungen bestimmt. Während in Bild 2 rechts bei einem genormten Zahnfuß-Ausrundungsradius von $\rho = 0,25$ m sich scharfe Spannungsspitzen auf der Zugseite bemerkbar machen, finden sich bei der Kreisbogenverzahnung und einer Zahnfußausrundung von $\rho = 0,66$ m die wesentlich geringeren Spannungsspitzen auf der Druckseite – diese Lage bleibt auch bei Veränderung der Fußausrundungen bestehen und ändert sich nur mit Veränderung der Zahnformen bei Zähnezahlen kleiner 18 (Bild 5).

Parameterrechnungen mit Modul und Zähnezahl bei gleichem Durchmesser ergeben, dass sich im Gegensatz zur Evolventenverzahnung die Tragfähigkeit bei kleineren Zähnezahlen (und damit größeren Modulen) erhöht. Dabei fällt das Maximum der Zahnfußspannungen auf der Druckseite der Zähne stärker ab als auf der Zugseite, bei größeren Moduln wird die Zugseite etwas stärker belastet (Bild 5). Die gezeigten grundsätzlichen Ergebnisse und Tendenzen können durch räumliche FE-Rechnungen bestätigt werden. Dabei bewirkt zum Einen die Torsionsverformung der im Allgemeinen nachgiebigeren Welle eine Beanspruchungsverteilung im Zahnfuß, die der oben beschriebenen Tendenz entgegenwirkt, zum Andern gehen große Moduln und große Ausrundungsradien der Wellen zu Lasten der Torsionsbeanspruchungen.

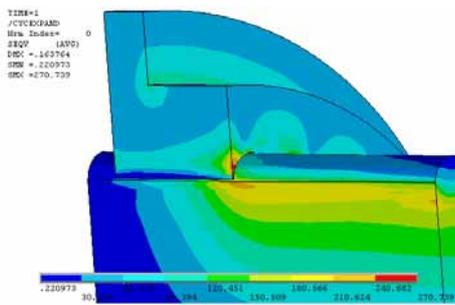


Bild 6: Vergleichsspannung nach von Mises für Drehmomentbelastung 6400 Nm, Streckgrenze 250 N/mm² ideal elastisch-plastisches Werkstoffverhalten, Modul 3 mm, Zähnezahl 18, Verbindungslänge 50 mm

Räumliche Untersuchungen zeigen auch das übliche Bild der Spannungsüberhöhung an der Nabenkante, wobei die Zahnfußspannungen der Welle die kritischen Beanspruchungen darstellen. Mögliche Verbesserungen durch größere Ausrundungen im Zahnfuß nach den in den 2D-Rechnungen ermittelten Werten werden bestätigt. **Bild 6** stellt das belastete Modell dar, in **Bild 7** werden die Vergleichsspannungen im Nabenfuß über der Verbindungslänge gezeigt. Die Rechnungen wurden dabei mit elastisch-plastischem Werkstoffverhalten durchgeführt.

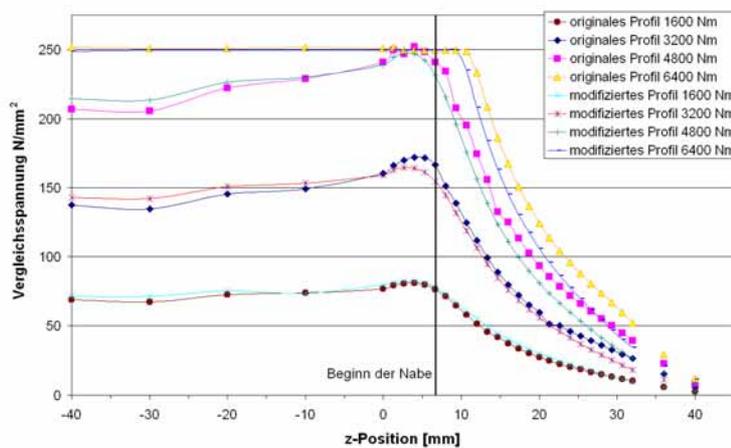


Bild 7: Vergleichsspannung nach von Mises über der Nabenlänge, Streckgrenze 250 N/mm² ideal elastisch-plastisches Werkstoffverhalten, Modul $m = 3$ mm, Zähnezahl 18, Verbindungslänge 50 mm. „originales Profil“ hat Zahnfußausrundungsradius $\rho_1 = 1,13$ mm, „modifiziertes Profil“ hat $\rho_1 = 2$ mm

3 Beanspruchungsverteilungen unter gemischter Belastung, Zentrierfähigkeit und Verschleißverhalten

Maßgebend für das Verhalten unter gemischter Belastung aus Drehmoment und Querkraft sind die Lastaufteilungen auf die einzelnen Zahnpaare und die durch das Spiel bedingten Reibungswege während eines Umlaufs.

Um das Zentrierungs- und Querkraftübertragungsverhalten beurteilen zu können, wird die Form A der fehlerfreien Bezugsverzahnung ohne Zahnspiel und ohne Drehmomenteinleitung mit Querkraften belastet.

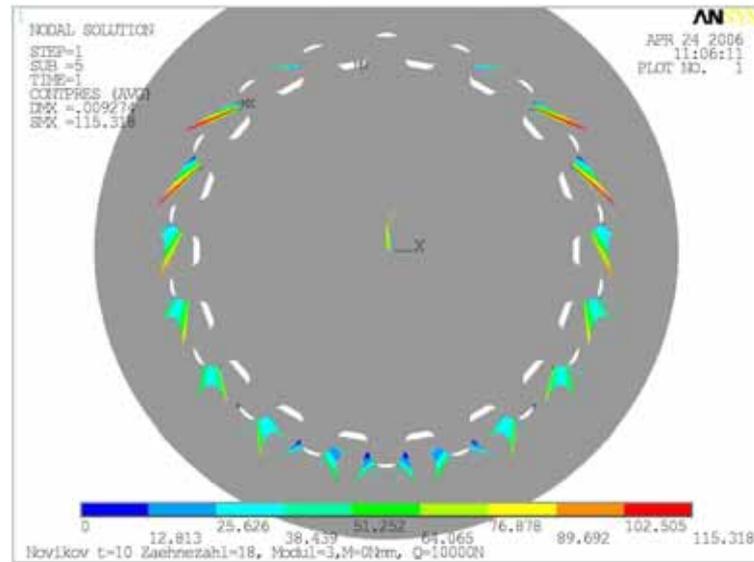


Bild 8: Kontaktdruckverteilung unter Querkraft 10 kN, Modul 3mm, Zahnzahl 18, Zahnform A, 42CrMo4 ideal elastisch-plastisches Werkstoffverhalten

Bild 8 zeigt die Kontaktdruckverteilung unter einer Querkraftlast von 10kN. Die Belastung aller Zähne ist achsensymmetrisch um die Senkrechte. Die maximalen Kontaktdrücke entstehen an der Zwei-Uhr-Position, der dritte Zahn von der Senkrechten aus weist trotz des höchsten Drucks den schmalsten Kontaktbereich auf, hier ist die Druckverteilung einer spitzen Parabel sehr ähnlich. An den Zahnköpfen der drei untersten Zähne ist auf beiden Seiten ein Kontakt vorhanden, welcher aber relativ gering ausfällt. Generell variieren die Tragbilder stark und ähneln nicht mehr den Beanspruchungsverläu-

fen unter reiner Drehmomentbelastung. Eine Erhöhung der Querkraft beeinflusst die Kontaktdruckverteilung nur geringfügig.

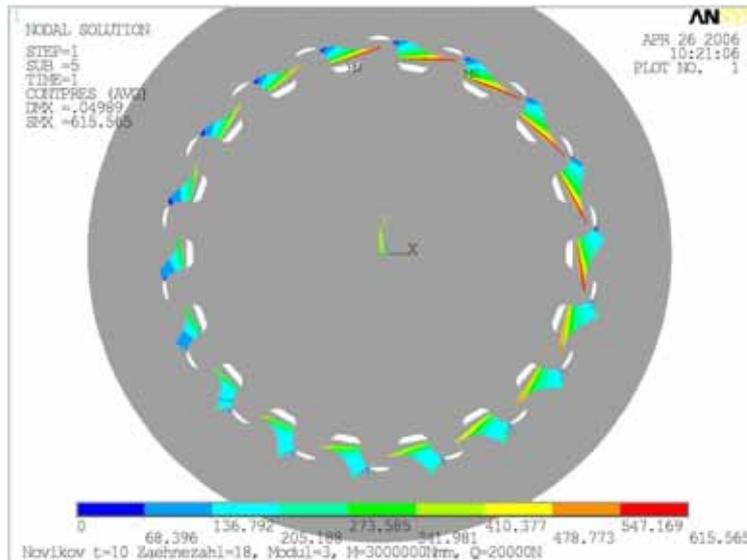


Bild 9: Kontaktdruckverteilung unter kombinierter Belastung mit 3000 Nm Drehmoment und 20 kN Querkraft, Modul 3mm, Zähnezahl 18, Zahnform A, 42CrMo4 ideal elastisch-plastisches Werkstoffverhalten

Die Untersuchung der Zahnwellenverbindungen unter dem kombinierten Einfluss von Querkraft und Drehmoment wurden für die Form A der Referenzverzahnung bei einem Drehmoment von 3000 Nm und einer Querkraft in drei Stufen von 10, 20 und 25 kN durchgeführt.

Die Kontaktdruckverteilung ist um den Umfang sehr gleichmäßig, das Tragbild ist an allen Zähnen ähnlich in Form und Größe (**Bild 9**). Es findet auch in dieser Lastkombination eine Verschiebung der Nabe gegenüber der Welle statt. Dies ist durch ein leichtes Eindringen der Zahnköpfe in die Nabe an der Unterseite der Verbindung zu erkennen.

Die in Bild 9 gezeigte Belastung entspricht bei einer Zahnwellenverbindung DIN 5480 der Kombination von Drehmoment und Querkraft, bei der der Einfluss der Querkraft überwiegt und die Evolventenzähne an ihren der Last abgewandten Seiten Kontakt finden – dabei findet ein verstärkter Verschleiß statt. Im Gegensatz zur Evolventenverzahnung verbessert bei der Kreisbogenverzahnung bereits ein geringes Drehmoment die Aufnahmefähigkeit für Querkräfte. Eine Eigenschaft der Kreisbogenform besteht darin, unter tangentialer Belastung eines Zahns eine radial nach innen gerichtete Kraft zu erzeugen,

welche die Querkraft teilweise ausgleicht. Daraus folgt direkt ein stark verminderter Einfluss der Querkraft auf die Verbindung, wenn gleichzeitig Drehmoment anliegt. Im Sinne einer Aufgabenteilung übernehmen damit fußseitige Bereiche der Zähne mit kleinem Eingriffswinkel die Aufgabe der Drehmomentübertragung, die Köpfe der Zähne mit großem Eingriffswinkel nehmen die Querkräfte auf und sorgen für die Zentrierung.

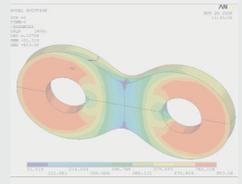
Ein Vergleich der Beanspruchungen bei elastisch-plastischer Rechnung mit einer Mischbelastung aus 3000 Nm Drehmoment und 20 kN Querkraft in der Verbindung mit Kreisbogenprofil und in einer Verbindung mit Evolventenflanke nach DIN 5480 zeigt, dass bei der Evolvente der Kontaktdruck um 38 % höher und die Vergleichsspannung im Zahnfuß um 30 % höher ausfällt. Durch die Vergrößerung der die Last übertragenden Fläche bei der Kreisbogenverzahnung ergibt sich eine Reduzierung der Beanspruchungen in einer beeindruckenden Größenordnung.

Die Verschiebungen im Bereich der Verzahnung, speziell der Unterschied zwischen den Verschiebungen der Nabenzähne zu den Verschiebungen der Wellenzähne fallen bei der Kreisbogenverzahnung geringer aus, es gibt geringere Gesamt-Relativverschiebungen und somit eine geringere Verschleißneigung. Diese Aussagen sind allerdings zu relativieren, da die für die Berechnung verwendeten Zahnformen weder Spiel noch Fertigungsabweichungen aufweisen.

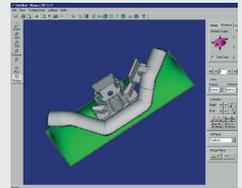
Die bisherigen numerischen Untersuchungen lassen eine erhebliche Leistungssteigerung von Zahnwellen mit einem Kreisbogenprofil gegenüber den standardisierten Verbindungen nach DIN 5480 erwarten. Es ist geplant die Untersuchungen an ausgeführten Verzahnungen hinsichtlich der statischen und dynamischen Tragfähigkeit unter Drehmomentbelastung und hinsichtlich des Verschleißverhaltens unter kombinierter Belastung und unter dem Einfluss von Flankenspiel und Fertigungstoleranzen fortzusetzen. Dies beinhaltet auch die Entwicklung der spanlosen Fertigung solcher Verbindungen, die sich in Vorversuchen als machbar erwiesen hat.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei an dieser Stelle für die Unterstützung des Forschungsvorhabens gedankt.

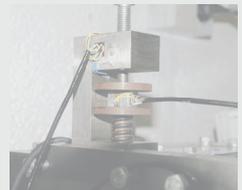
Konstruktion und Berechnung
von Maschinenelementen



Konstruktionsmethodik und
rechnerunterstützte
Produktentwicklung



Systementwicklung, Versuchstechnik
und Maschinenakustik



Lehre und Institutsbetrieb



Hochschule und Kontakte



Selektives Lasersintern von porösen Entlüftungsstrukturen am Beispiel des Formenbaus



Siemann, E.

Der industrielle Einsatz des Lasersinterns von Metallen richtet sich meist auf die Erzeugung sehr dichter Bauteile. Im Rahmen einer Kooperation mit der Firma Wilhelm Eisenhuth GmbH KG soll die Möglichkeit des gezielten Erzeugens von Porositäten untersucht und sie für die Problematik der Entlüftung eines Spritzgusswerkzeuges genutzt werden.

In collaboration with Wilhelm Eisenhuth GmbH KG the Institute of Mechanical Engineering used the SLS technology to generate molds with defined porosities.

1 Einleitung

Durch die hohen Qualitätsanforderungen und die ständig sinkenden Zykluszeiten in der Spritzgussfertigung, fällt der Formentlüftung ein immer höherer Stellenwert im Werkzeugbau zu. Denn ohne eine ausreichende Entlüftung treten häufig Fehler, wie z.B. eine unvollständige Formfüllungen, Dieseleffekte, Bindenähte oder Glanzunterschiede an Oberflächen der Bauteile auf.

Da konventionell die Vermeidung dieser Probleme teilweise einen relativ hohen technischen Aufwand bedarf, sollte durch Einsatz des Selektiven Laser Sinterns (SLS) eine ausreichende Entlüftung durch eine gezielte Beeinflussung der Dichte in einzelnen Bereichen der Werkzeugform (siehe **Bild 1**) erreicht werden.

Gerade bei komplexen Geometrien der Formnester, die ein hohes Risiko des Lufteinschlusses bieten, stellt die Nutzung des SLS Verfahrens zur Generierung der Werkzeugformen mit integrierter Entlüftung ein Vorteil gegenüber der Fertigung durch spanende oder erodierende Bearbeitung dar.

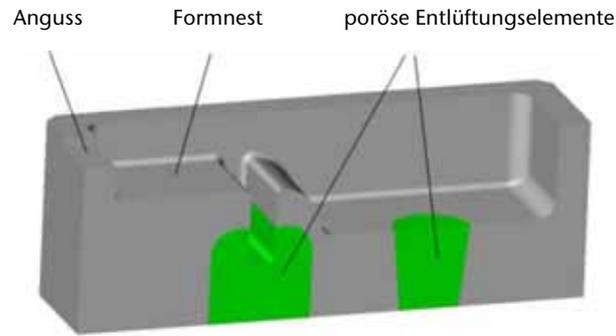


Bild 1: Schematische CAD-Darstellung einer Form (geschnitten) mit eingesetzten porösen Entlüftungselementen (grün) /1/

2 Erzeugung der Porositäten

Das Ergebnis eines SLS-Bauprozess ist von vielen Faktoren abhängig. Im größten Maße ausschlaggebend für die Bauteilqualität und Dichte ist der in den Werkstoff eingebrachte Energieeintrag. Verantwortliche Parameter für diesen sind unter anderem Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Fülllinienlänge und Fülllinienabstand (Hatchabstand). Innerhalb der vorgenommenen Versuche werden hinsichtlich einer Veränderung der Porosität der Bauteile nur die Sinterparameter variiert. Das **Bild 2** soll die Einflüsse auf den Bauprozess verdeutlichen.

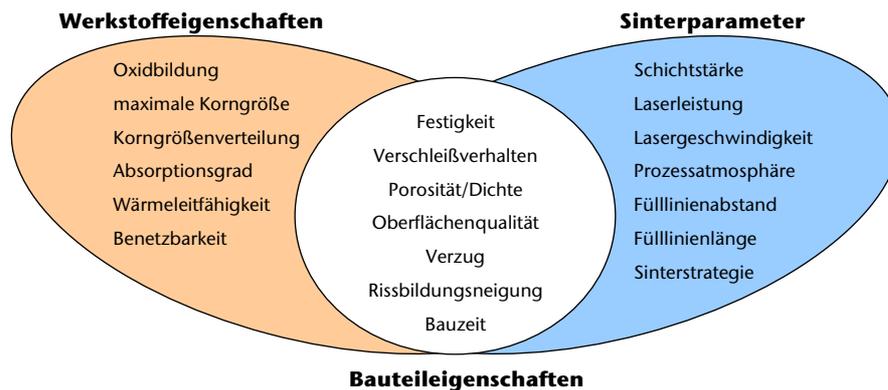


Bild 2: Einflussfaktoren auf die Bauteileigenschaften

2.1 Vorgehensweise der Grundlagenversuche

Ziel der Vorversuche ist es, mit Hilfe der Variation von Anlagenparametern und Belichtungsstrategien, Bereiche von definierter Porosität in Standard-Bauteile des selektiven Lasersinterns zu generieren. Diese sollen eine Durchströmbarkeit von Luft zulassen, aber ein Austreten einer Kunststoffschmelze verhindern. Um die Ergebnisse der unterschiedlichen Energieeinträge in die Proben zu dokumentieren und vergleichen zu können wurde folgender Ablaufplan (siehe **Bild 3**) festgelegt.



Bild 3: Ablaufplan der Vorversuche /2/

3 Ergebnisse der Grundlagenversuche

Es konnten mit unterschiedlichen Sinterparametern eine lokale Erhöhung der Porosität gezielt bewirkt werden. Unter anderem wurde hierbei eine Probengeometrie (siehe **Bild 4**) mit zwei Bereichen verwendet. Zum einen bestand diese Probe aus einem mit Standard-Parametern erzeugten Grundkörper und zum anderen aus Versuchs-Parametern erzeugten zweitem Bereich.

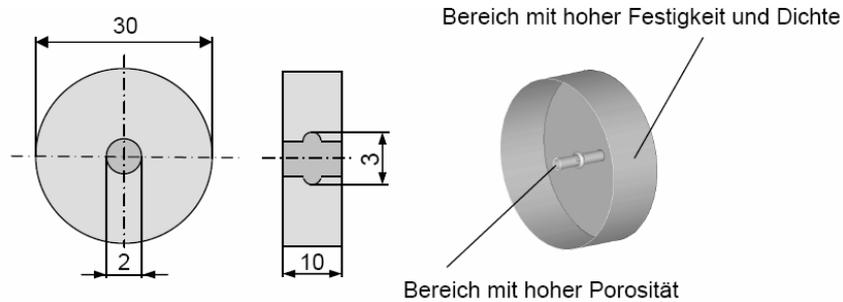


Bild 4: Probenaufbau /3/

Dabei zeigte die Variation der Lasergeschwindigkeit und des Fülllinienabstandes die besten Resultate. Abhängig vom Sintermaterial wurden lokale Porositätswerte von ca. sechs bis vierundzwanzig Prozent erreicht und Härtewerte zwischen ca. 170 HV und 226 HV. Schliffbilder (siehe **Bild 5**) bestätigten die Annahme eines gezielt ausgebildeten Porenkanals.

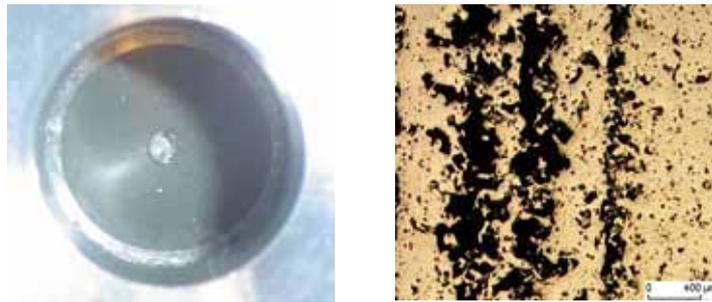


Bild 5: Durchlässigkeitsprüfung und Schliffbild /2/

4 Erstellung von Sintereinsätzen und einer Versuchsforn

Ausgehend von den Ergebnissen der Grundlagenversuche wurden unterschiedliche Sinterstopfen (siehe **Bild 6**) und Sintereinsätze (siehe **Bild 7**) zum Einsetzen in eine Spritzgussform hergestellt.



Bild 6: Vollständig poröse Entlüftungstopfen /1/

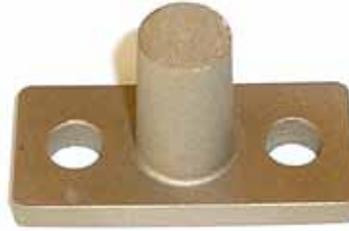


Bild 7: Entlüftungselement mit lokaler Porosität /1/

Weiterhin konnte mit Hilfe der Firma Eisenhuth eine Versuchsforn (siehe **Bild 8**) eruiert werden. Auf Grund einer Moldflow Spritzguss-Simulation (siehe **Bild 9**) konnte eine komplexe Kavität konstruiert werden die, bei den eingesetzten Spritzgusswerkstoffen, eine schlechte Entlüftungseigenschaft aufweist.



Bild 8: Versuchsforn mit Einsätzen



Bild 9: MOLDFLOW Analyse /4/

Die Formhälften und Einsätze befinden sich zurzeit für eine Bemusterung bei der Firma Eisenhuth und erste Ergebnisse werden Ende des Jahres 2007 erwartet.

5 Zusammenfassung

Durch Variation der beim Bauprozess benutzten Sinterparameter ist es möglich, Entlüftungsstrukturen mit lokaler Porosität herzustellen. So können vollständig poröse Entlüftungsstrukturen oder Spritzgussformen generiert werden. Das SLS Verfahren kann hierbei seine Vorteile ausspielen und erlaubt dabei eine schnelle, preiswerte und präzise Fertigung einfacher und komplexer Geometrien.

Das vorgestellte Projekt wird gefördert vom Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE).



6 Steigerung der Qualität der Laser-Sinter-Anlage

Die im Institut für Maschinenwesen installierte EOS EOSINT M 250 ext. konnte Anfang des Jahres 2007 durch einen neuen CO₂-Laser aufgewertet werden. Eine Steigerung der Sinterqualität der erzeugten Bauteile mit den Standard-Metallpulvern wie DirectMetal 20 und DirectSteel 20 kann so sichergestellt werden.

Im Bereich der Werkstoffforschung ermöglicht dies ein breiteres Spektrum an Denkbaren Materialien, wie zum Beispiel Keramiken und Hartmetalle.

7 Literatur- und Quellenverzeichnis

- /1/ Hickmann, Dr. T., Adamek, T. (Wilhelm Eisenhuth GmbH KG), Müller, Prof. Dr.-Ing. N., Trenke, Dr.-Ing. D. (Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal); Der Stahlformenbauer, Ausgabe 05-2006, S. 14-16, Fachverlag Möller 2006
- /2/ Siemann, E.; Diplomarbeit: Untersuchung zur Porosität von Laser-Sinterwerkstoffen unter Verwendung gezielter Sinter-Strategien, Institut für Maschinenwesen, Clausthal-Zellerfeld 2007
- /3/ Trenke, D.; Dissertation: Selektives Lasersintern von porösen Entlüftungsstrukturen am Beispiel des Formenbaus, Papierflieger Clausthal-Zellerfeld 2006
- /4/ Xie, L., Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik, TU Clausthal

Validierung einer FE-Simulation

Hilgermann, J. L.

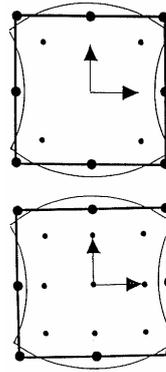
Simulationen werden in hoher Anzahl und großem Umfang in der Produktentwicklung und der Forschung angewendet. Viele Hersteller werben mit der intuitiven Programmnutzung. Einfache „One-Click-Solutions“ werden in zunehmendem Maße in Simulationssoftware integriert um auch wenig geschultem Personal die Durchführung von Simulationen zu ermöglichen. In zunehmendem Maße werden Simulationswerkzeuge auch von Fachfremdem Personal genutzt. Die Komplexität, der hohe Entwicklungsstand sowie die guten Erfahrungen der Vergangenheit mit Simulationswerkzeugen schaffen ein Gefühl von Vertrauen gegenüber der Simulationssoftware. Eine fundierte und gründliche Reflexion der Ergebnisse erscheint überflüssig. Die Gefahr ist jedoch offensichtlich.

Moderne FE-Programme lösen zuverlässig fast jegliche Gleichungssysteme, auch dann, wenn Modelle fehlerhaft bzw. unzureichend durchdacht wurden. Das Ergebnis, farbige Spannungs- und Verformungs-Plots, wird häufig nicht hinterfragt. Lösungen werden als „wahr“ hingenommen, gleichwohl eine Überprüfung nur selten durchgeführt wird. Fehlerhafte Ergebnisse werden nur selten entdeckt, bzw. Abweichungen zu später durchgeführten Versuchen auf numerische Fehler geschoben. Tatsächlich verursachen numerische Fehler bei einem durchdachten Modell einen geringen Anteil, welcher zumeist die Fertigungstoleranzen unterschreitet.

Im folgenden Artikel sollen einige wichtige und wesentliche Validations-schritte vorgestellt werden. Er soll helfen, eine sichere Grundlage und Vertrauen der berechneten Ergebnisse zu schaffen.

Simulation is highly used in production-development and research. Many Software-companies promote their intuitive Software handling. Simple to use "one-click-solutions" are more and more integration in Simulation-software to enable the use of their program to unskilled users. To an increasing degree more unskilled users are working Simulation-software today. The complexity and the high degree of development as well as the good experiences of the past with Simulation-software, form a sense of confidence in the software. A well-founded and systematic reflection of the results seems unnecessary. The danger of such confidence is obvious.

Modern FE-programs are solving almost any system of equations reliable, even if the model is inaccurate or not well thought. The results, coloured stress-/strain-plots, are often not being scrutinized. Solutions are



accepted as being "true", nevertheless verification has been made. Erroneous results are being detected seldom, and differences on testing are being put the blame on numerical errors respectively. As a matter of fact numerical errors are for well thought models less than manufacturing tolerance, and are therefore negligible.

The following article describes important validation-steps, and helps to build a good foundation and confidence to the calculated results.

1 Erste Verifikationen

Vor der Analyse werden die Dimension, die Masse, das Trägheitsmoment sowie der Schwerpunkt der Struktur im Preprocessor mit dem CAD-Modell verglichen. Hierdurch werden Fehler beim Import oder bei der Geometrie-Modellierung aufgedeckt.

Die erste Verifikation der Ergebnisse erfolgt über die grafische Oberfläche des Postprocessing und durch das sogenannte Listing nach dem Solver-Prozess. Diese Informationen ermöglichen von vorne herein den Ausschluss bzw. die Bestätigung der falschen Eingabe von Randbedingungen oder von numerischen Ungenauigkeiten im Gleichungssystem.

Warnungen und Fehlermeldungen, welche der Solver des FE-Programms während der Rechnung generiert, werden aufgerufen und interpretiert. Dies muss auch dann durchgeführt werden, wenn die Rechnung „scheinbar“ konvergiert ist und eine scheinbar plausible Lösung aufgerufen werden kann. Werden weder Warnung noch Fehlermeldung angezeigt, wird im Postprocessor überprüft, dass die Reaktionskraft, auf Fesselungen deren Richtung von den eingeleiteten Kräften verschieden ist, null betragen.

2 Numerische Konditionierung

Determinanten von schlecht konditionierten Matrizen sind von Null verschieden, streben aber gegen Null. Solche Matrizen sind mathematisch inversibel, ihre Inverse ist jedoch nicht eindeutig definiert.

Dieser Sachverhalt wird am Beispiel von drei in Reihe geschalteten Federn der Federrate K und k , erläutert. Es sei k klein gegenüber K . Obwohl die Diagonale der Steifigkeitsmatrix Werte ähnlicher Größenordnung aufweist, ist die Steifigkeitsmatrix der Struktur schlecht konditioniert.

$$\begin{bmatrix} K & -K & 0 \\ -K & K+k & -k \\ 0 & -k & K+K \end{bmatrix} \text{ mit } K \gg k$$

Die erste und zweite Zeile der Matrix sind quasi linear von einander abhängig. Ein solcher Sachverhalt entsteht, wenn in einem Modell zwei Materialien unterschiedlichen Steifigkeiten oder wenn große Unterschiede in der Elementgröße integriert wurden. Ein FE-Programm untersucht die numerische Konditionierung der Steifigkeitsmatrix ausschließlich an Hand der Hauptdiagonale und gibt den kleinsten und größten Wert aus. Das hier angesprochene Beispiel zeigt jedoch, dass es sich hierbei nur um eine qualitative Aussage, nicht aber um eine absolute Beschreibung der numerischen Konditionierung handelt, denn die Größenunterschiede der Hauptdiagonalen sind ähnlich groß, gleichwohl die Matrix schlecht konditioniert ist.

Zur Vermeidung bzw. Lösung eines solchen Problems muss die Steifigkeit der gesamten Struktur angeglichen werden. Entweder wird die Vernetzungsgröße der gesamten Struktur angeglichen, oder wenn zwei Materialien unterschiedlicher Steifigkeit modelliert wurden, dann wird die weniger steife Struktur feiner, die höher steife Struktur größer vernetzt [1].

3 Pivots und Fesselungen

Im dreidimensionalen Raum besitzt jede Struktur sechs Bewegungsmöglichkeiten (drei Translationen und drei Rotationen). Im zweidimensionalen Raum besitzt jede Struktur drei (zwei Translationen und eine Rotation), in Axialsymmetrischen Modellen derer eine (die Translation entlang der Symmetrieachse).

Für eine statische Analyse wird eine minimale Anzahl an Fesselungen benötigt, um Verschiebungen der Struktur gegen das Unendliche zu unterbinden, auch dann, wenn in jener Richtung keine Kraft wirkt.

Eine Struktur, bei der genau die Anzahl an Freiheitsgrade blockiert wird, wie mögliche Bewegungsmöglichkeiten, ist Iso-Statisch gelagert. Eine Struktur, bei der mehr Freiheitsgrade blockiert werden als Bewegungsmöglichkeiten existieren, ist Hyper-Statisch gelagert. Bei einer Struktur, bei der weniger Freiheitsgrade blockiert werden, als Bewegungsmöglichkeiten existieren, spricht man von Hypo-Statik. Hypo-Statik ruft numerisch eine oder mehrere Nullstellen in der Hauptdiagonalen der Steifigkeitsmatrix hervor. Die Werte der Hauptdiagonalen der Steifigkeitsmatrix werden als pivots bezeichnet, und so spricht man bei einer Nullstelle vom „pivot-null“.

/1/ beschreibt die Anzahl der Pivots-Null in einem FE Modell. Die Formel wird im Folgenden näher erläutert werden.

$$PN = MR - FIX - LIA + DDLNAR + MCP + MCN + MI$$

- PN = Anzahl der Nullstellen in der Hauptdiagonalen der Steifigkeitsmatrix (PN:= Pivots-Nuls)
- MR = Anzahl der Bewegungsmöglichkeiten der Struktur im Raum (MR:= Mode Rigides)
Im dreidimensionalen Raum besitzt jede Struktur sechs Bewegungsmöglichkeiten (drei Translationen und drei Rotationen). Im zweidimensionalen Raum besitzt jede Struktur derer drei (zwei Translationen und eine Rotation), in Axialsymmetrischen Modellen derer eine (die Translation entlang der Symmetrieachse).
- FIX = Anzahl der durch Fesselung blockierten Bewegungsmöglichkeiten (FIX:= Fixation)
Fesselungen eliminieren die Bewegungsmöglichkeiten durch Fesselung einzelner Elementknoten in eine bestimmte Richtung bzw. um die Drehung um eine Achse. Sie sind absolute Randbedingungen.
- LIA = Anzahl der durch relative oder lineare Verknüpfung zwischen den Freiheitsgraden blockierte Freiheitsgrade (LIA:= Liaison)
In manchen Fällen ist es nicht möglich absolute Randbedingungen zu definieren um Bewegungsmöglichkeiten auszuschließen. Direkte Verknüpfungen zwischen den Freiheitsgraden einzelner Elementknoten bzw. die Definition linearer Beziehungen der Freiheitsgrade untereinander bezeichnet man als relative Randbedingungen.
- DDLNAR = Anzahl der Bewegungsmöglichkeiten welche nicht an die Steifigkeit des Elements gekoppelt ist (DDLNAR:= Degré De Liberté Non Alimentés en Raideur)
Diese Problematik existiert nur für Elemente der Balken, im dreidimensionalen Raum liegenden Membrane und, in einigen FE-Programmen, mit Shell-Elementen. In diesen Fällen existieren Freiheitsgrade, welche nicht an die Elementsteifigkeit gekoppelt sind.

- MCP = Anzahl der parasitären kinematischen Bewegungen (MCP:= Modes Cinématiques Parasites)
Die Generierung der Elementsteifigkeitsmatrix erfolgt numerisch über eine „unter-Integration“. Es sei ein Rechtekelement, dessen Steifigkeitsmatrix numerisch über 4 Gauß-Integrationspunkte generiert wurde. Ohne äußere Last und ohne Fesselung existiert in der Ebene ein Verformungszustand, dessen Gaußpunkte mit denen des unverformten Zustandes identisch sind. Die Verformungsenergie des Elementes wird an den Gaußpunkten diskretisiert und ist ebenfalls null gleichwohl eine Verformung existiert.

- MCN = Anzahl der Bewegungsmöglichkeiten welche durch eine schlechte numerische Konditionierung hervorgerufen werden (MCN:= Mauvais Conditionnement Numérique)
Als Richtgröße kann ein maximal zulässiges Verhältnis vom Maximalwert zum Minimalwert der Hauptdiagonalen der Steifigkeitsmatrix von 10^8 angenommen werden (siehe auch Numerische Konditionierung).

- MI = Interne Mechanismen (MI:= Mécanismes Internes)
Fehler durch Internen Mechanismen entstehen durch eine falsche Konzeption von Stabwerken, bei denen die Knotenzahl nicht das geforderte Verhältnis zu den Stabelemente $b = 2n - 3$ erfüllt. Hierbei ist n die Anzahl der Knoten und b die Anzahl der Stabelemente. Weitere Fehler entstehen durch Fehlende Verbindungen von Teilstrukturen untereinander.

4 Negative Pivots

Das Aufkommen von negativen Pivots ist häufig in der fehlerhaften Eingabe der Werteingabe begründet, welche im Preprocessor kontrolliert werden können:

- E-Modul negativ
- Dicke, Sektion oder Flächenträgheitsmomente negativ
- Querkontraktionszahl größer 0,5

Aber auch durch die Integration von rigid-bodies in das Modell entstehen in Verbindung mit Lagranges-multiplikatoren negative Pivots /1/.

5 Schlussfolgerung

Die von /1/ vorgestellte Formel erlaubt die Interpretation der Anzahl der Nullstellen der Hauptdiagonalen der Steifigkeitsmatrix.

Kann ein definierter Wert für einen Teil der Formel angegeben werden, z.B. der Wert 6 für MR in einem 3-dimensionalem Modell, dann ist eben dieser Zahlenwert in die Formel einzutragen. Wird eine Aussage negiert, z.B. keine DDLNAR, dann ist der Wert 0 entsprechend einzusetzen. Kann eine Aussage weder bejaht noch negiert werden, so wird die Formel entsprechend aufgelöst, da PN, die Anzahl der Pivots-Null, durch die Ausgabe des Programms bekannt ist. Hierdurch werden gezielt Fehler oder Probleme erkannt und können im Anschluss beseitigt werden.

Am Beispiel der Steifigkeitsmatrix wurde erläutert, dass das hier vorgestellte strukturierte Vorgehen keine Garantie und kein Nachweis für ein fehlerfreies Modell schafft. Das Ausbleiben an Fehler und/oder Warnmeldungen bedeutet nicht eine korrekte Modellierung. Die Software kann bei der Fehlersuche helfen, vielmehr ist aber das Gespür und die Erfahrung des Programmnutzers gefordert Fehler zu erkennen und zu beseitigen.

6 Zusammenfassung

Ohne eine vorherige Verifikation ist eine Auswertung der durch eine FE-Simulation gewonnen Ergebnisse nicht sinnvoll. Die richtige Interpretation der vom Solver ausgegebenen Fehler und Warnungen ist unumgänglich.

Simulationsläufe ohne Fehler- und/oder Warnmeldungen bilden die Wirklichkeit nicht automatisch korrekt ab. Das Vorhandensein von Fehlern und/oder Warnungen bedeutet gleichzeitig nicht, dass Ergebnisse inkorrekt sind. Vielmehr ist eine richtige Interpretation der Fehler und/oder Warnungen erforderlich. Dieser Artikel schafft eine erste Grundlage zum Verständnis dieser Problematik.

7 Literatur

- /1/ Craveur, J.: Modélisation des structures, Calcul par éléments finis, Dunod, Paris 2001. ISBN 2 10 005547 X
- /2/ Craveur, J.; Maceau, D.: De la CAO au Calcul, Dunod, Paris 2001. ISBN 2 10 005220 9
- /3/ Müller, G.; Groth, C: FEM für Praktiker, Band 1, Expert-Verlag, Renningen 2007. ISBN 3 8169 2685 1

Getriebetechnik, Mechatronik?

Ein Vergleich aus der Medizin- und Hygieneindustrie

Lohregel, A.; Ostertag, W.; Sprick, R.

Wettbewerbsfähige Produktionsprozesse in der Medizin- und Hygieneindustrie erfordern effiziente Durchlaufprozesse mit hohen Produktionsgeschwindigkeiten und hoher Flexibilität für Formatumstellungen und zukünftige Produktgenerationen. Es wird eine innovative Prozesseinheit vorgestellt, die dank der Kombination aus trägheitsoptimaler Konstruktion und flexibler Servo-Einzelantriebstechnik die o. g. Anforderungen erfüllen kann.



Competitive manufacturing of medical and healthcare products requires high production speed and high flexibility for easy size changeover and future product generation. Thanks to the combination of an inertia-reduced design and a flexible servo single drive concept the presented innovative device fulfils above mentioned requirements.

1 Einleitung

Die Fertigungs- und Produktionstechnik der Medizin- und Hygieneindustrie unterliegt einem enormen Kostendruck. In den 90er Jahren erfolgte daher eine Verlagerung personalintensiver Produktionsprozesse von den Hochlohnländern in die Länder des ehemaligen Ostblocks. Aufgrund des inzwischen stark angestiegenen Lohnniveaus in diesen Ländern ist heute eine zweite Welle der Verlagerung einfacher Produktionsschritte in Richtung Osten wie z. B. China und Indien zu verzeichnen. Für den Erhalt des Produktionsstandorts Europa bedeutet dies, die Produktionsprozesse hinsichtlich Effizienz, Synchronisierung und Standardisierung zu optimieren.

2 Aufgabenstellung

Ein Großteil der hier angesprochenen Medizin- und Hygieneprodukte werden heute in so genannten kontinuierlich laufenden Durchlaufprozessen hergestellt. D. h. die als Rollenware vorliegenden einzelnen biegeschlaffen Rohmaterialien wie z. B. Folien, Vliesstoffe und Laminate werden in einem Hauptprozess bei hoher Produktionsgeschwindigkeit zum fertigen Endprodukt komplettiert.

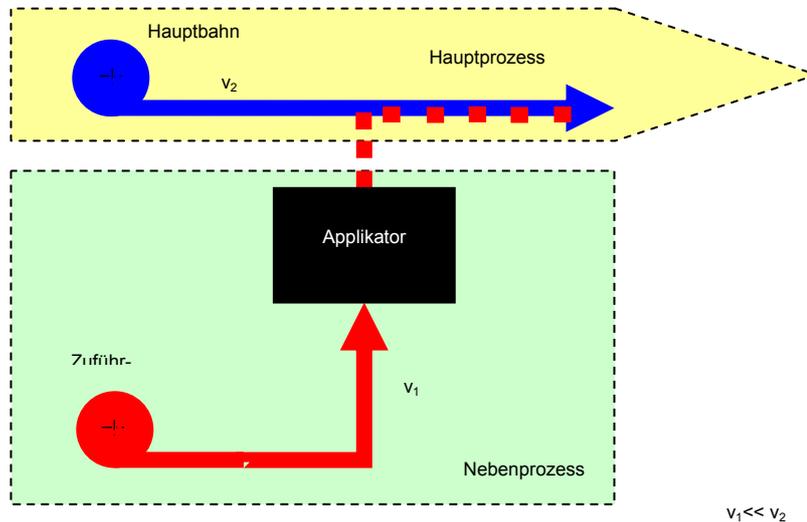


Bild 2.1: Schaubild für Haupt- und Nebenprozess

Dabei werden Bahngeschwindigkeiten von bis zu 400 m/min und abhängig von der Produktlänge Taktzahlen von bis zu 3000 Stück/Minute erreicht. Als Produktbeispiele seien hier Inkontinenzprodukte, OP-Abdeckmaterialien sowie medizinische Pflaster und Verbände genannt. Die einzelnen Produktkomponenten werden in so genannten Nebenprozessen vorkonfektioniert und dem Hauptprozess zugeführt. In der Regel laufen die Nebenprozesse im Vergleich zum Hauptprozess mit geringerer Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeitsdifferenz kann bei den hier aufgeführten Produktgruppen bis zum Faktor 40 betragen. Zum Zeitpunkt der Applikation, d. h. der „Montage“ der im Nebenprozess hergestellten Komponente an den Hauptproduktstrang müssen beide Prozesse synchron laufen. Im

Folgenden werden Applikator-Modelle zur Lösung dieser Aufgabe vorgestellt bzw. erarbeitet.

3 Stand der Technik

3.1 Slip-Cut Systeme (Hauptprozess orientierte Systeme)

Diese Systeme orientieren sich am Geschwindigkeitsniveau des Hauptprozesses. Der Materialstrang des Nebenprozesses wird mit der Geschwindigkeit v_1 einer mit Vakuum beaufschlagten und mit der Winkelgeschwindigkeit ω_{Amboss} rotierenden Ambosswalze zugeführt. Die Konfektionierung erfolgt ebenso unter Schlupf wie die nachfolgende Beschleunigung auf die Geschwindigkeit v_2 .

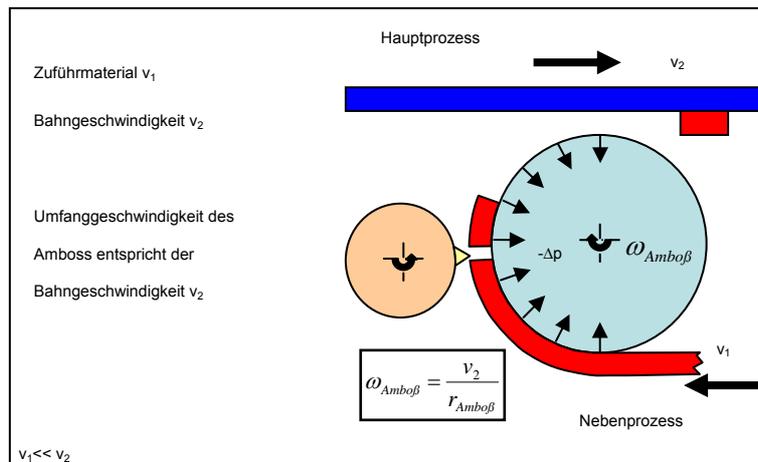


Bild 3.1: Applikator nach dem Prinzip des Slip Cut Systems

3.2 Nocken Systeme (Hilfsprozess orientierte Systeme)

Diese Applikatoren arbeiten mit dem Geschwindigkeitsniveau des Nebenprozesses. Der Materialstrang des Nebenprozesses wird mit der Geschwindigkeit v_1 zugeführt. Die Ambosswalze rotiert ebenfalls mit einer Umfangsgeschwindigkeit v_1 . Die Konfektionierung erfolgt ohne nennenswerten Schlupf mit der Geschwindigkeit v_1 . Erst durch die hochfrequente Zustellbewegung eines Nockensystems wird die Materialkomponente des Nebenprozesses beschleunigt und an den Hauptprozess appliziert.

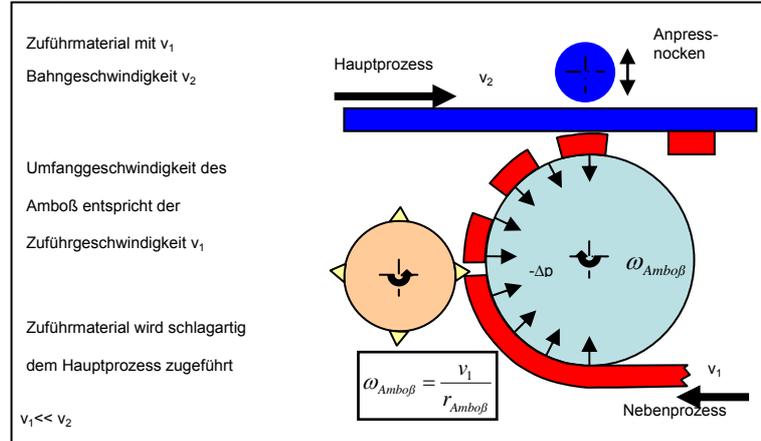


Bild 3.2: Applikator nach dem Prinzip des Nocken Systems

Anforderung	Slip Cut System	Nocken System
Schlupffreier Schnitt	--	+
Flexibilität	--	--
Einstellaufwand	-	--

Tabelle 3.1: Systemvergleich

4 Lösungsweg

Keine der in Kapitel 3 vorgestellten Lösungen mit ihren Vor- und Nachteilen ist für die Applikation spannungsempfindlicher Windelverschlussysteme als optimale Lösung anzusehen. Dies führte bei der PAUL HARTMANN AG dazu, ein neues eigenes Applikationsverfahren zu entwickeln. Die Applikation der Tapes soll nach dem in **Bild 4.1** dargestellten Funktionsprinzip erfolgen.

Die wesentliche Anforderung an das neue Verfahren ist die, dass im gesamten Applikationsprozess keine Geschwindigkeitsdifferenz (Schlupf) zwischen Haupt- und Nebenprozess auftritt. Darüber hinaus darf auch während des Schnittes keine Differenzgeschwindigkeit zwischen Messer und Amboss auftreten, da dies die empfindlichen Tapes beschädigen könnte, bzw. die Standzeit der Messer nachteilig beeinflusst wird.

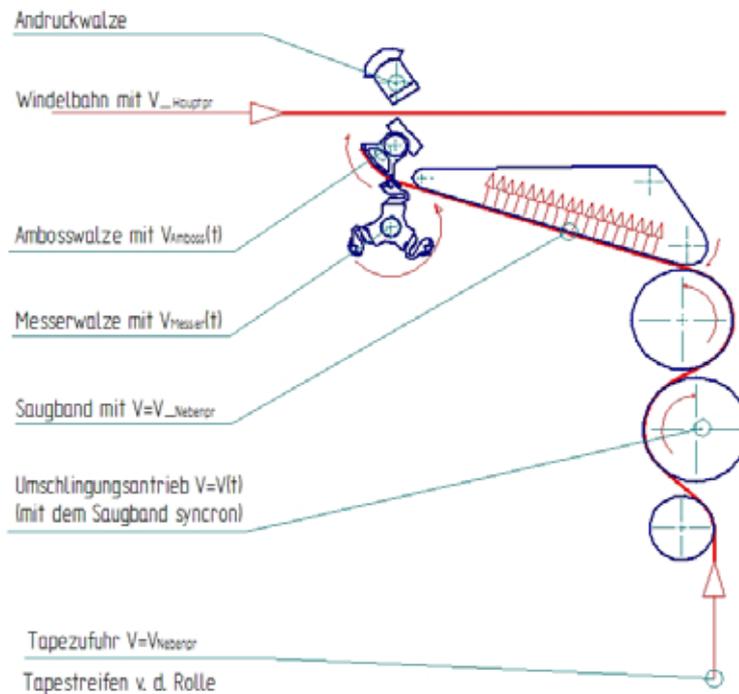


Bild 4.1: Funktionsprinzip des neuen Tapeapplikators nach dem „non slip system“

Unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen ergibt sich für den Applikationsvorgang das ideale Geschwindigkeitsprofil gemäß Bild 4.2.

Betrachtet man die Kurve der idealen Geschwindigkeit so sieht man, am Anfang der Kurve eine Phase mit $v = \text{const.}$ auf dem Geschwindigkeitsniveau des Nebenprozesses (Schnitt u. Tapeübernahme) dann folgt eine Beschleunigungsphase auf das Geschwindigkeitsniveau des

Hauptprozesses, (Applikationsphase) mit anschließender Abbremsung auf das Geschwindigkeitsniveau des Nebenprozesses. Dieser Vorgang wiederholt sich zyklisch, wobei das Intervall dem Kehrwert der Produktionsleistung entspricht. Aus den eben genannten Festlegungen folgt, dass die Kurve folgende Randbedingungen erfüllen muss.

$$(1) t_{Takt} = \frac{1}{P_M}$$

$$(2) V_{ideal}(t)_{\max} = V_{Hauptpr} \quad (3) V_{ideal}(t)_{\min} = V_{Nebenpr}$$

$$(4) \int_0^{t_{Takt}} V_{ideal}(t) dt = 2\pi * R_{Walze} \quad (5) \int_b^c V_{ideal}(t) dt \geq l_{Tape}$$

Grundsätzlich besteht das Problem darin, dass die Geschwindigkeit des Hauptprozesses häufig ein Vielfaches der des Nebenprozesses beträgt und gleichzeitig sehr kurze Taktzeiten gefordert sind. Für die hier vorgestellte Applikationslösung ergibt sich resultierend aus der geforderten Produktionsleistung eine extreme Winkelbeschleunigung der Applizierwalze, wie in **Bild 4.4** dargestellt.

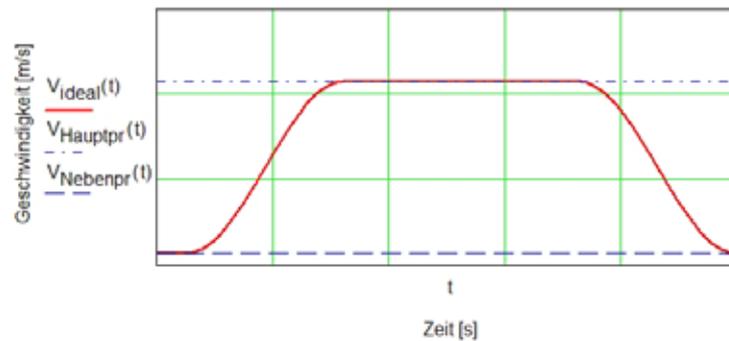


Bild 4.2: ideale Geschwindigkeit der Ambosswalze bei der Applikation

Zur Generierung dieser Kurven wurden verschiedene Lösungsansätze diskutiert, wovon zwei in die engere Wahl kamen und bis zur Versuchs- und Fertigungsreife parallel weiter entwickelt wurden. Eine Auswahl von Lösungsansätzen zeigt die folgende Tabelle.

In der ersten Variante erfolgt der Antrieb von Messer- und Ambosswalze (**Bild 4.1**) mit einem ungleichförmig übersetzenden Gleitsteingetriebe, während die zweite Variante als eine servotechnische Lösung mit direkter Anbindung der Walzen an die Servomotoren ausgeführt wird. Das Gleitsteingetriebe wurde ausgewählt da es eine sehr ausgeprägte Rastphase mit annähernd konstantem Übersetzungsverhältnis besitzt und sich gleichzeitig die erforderlichen Übersetzungsverhältnisse, sowie die hohen Beschleunigungen realisieren lassen.

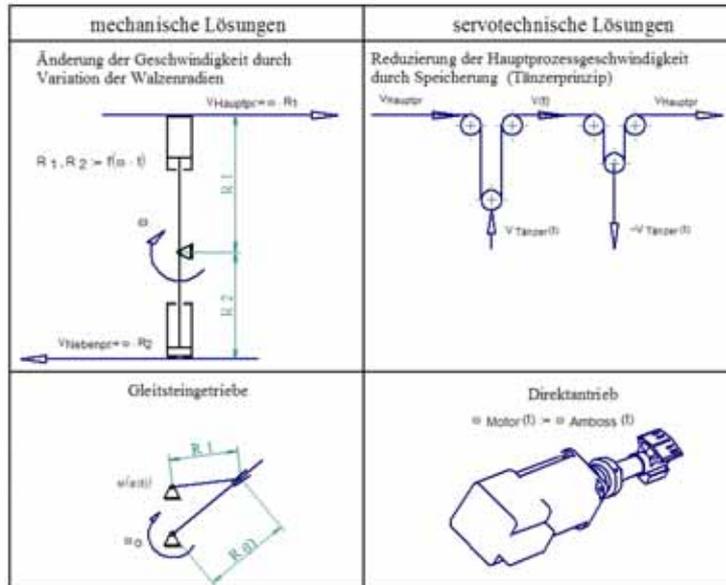


Bild 4.3: mögliche Funktionsprinzipien zur Geschwindigkeitsanpassung

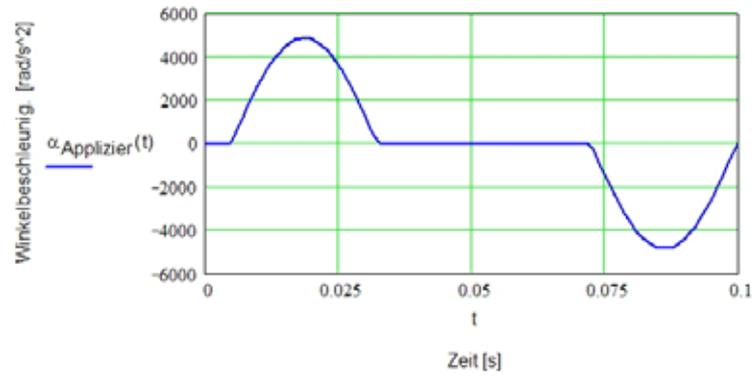


Bild 4.4: Winkelbeschleunigung der Applizier- bzw. Ambosswalze

Das Getriebe wird als Gleitsteingetriebe wie im folgenden Bild dargestellt ausgeführt.

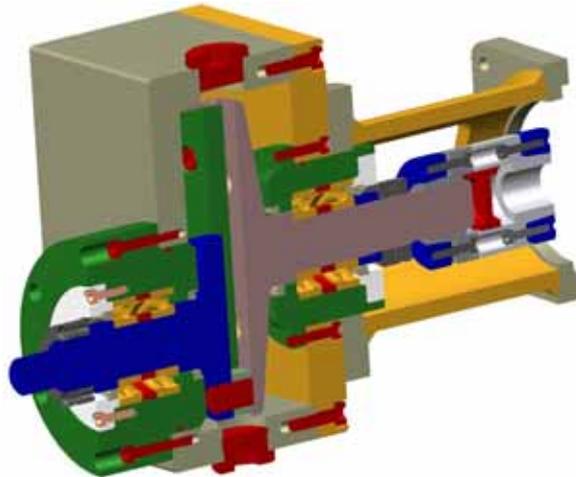


Bild 4.5: Getriebe als Gleitsteinvariante

Durch die sehr hohen Winkelbeschleunigungen der Abtriebsseite ist der Gleitstein hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt, deshalb wurde dieser zur Verschleißminimierung aus Hartmetall gefertigt. Der Antrieb, mit konstanter Drehzahl erfolgt von der Kupplungsseite her. Die Geschwindigkeit- und Beschleunigung des Gleitsteins stellt das folgende Diagramm dar.

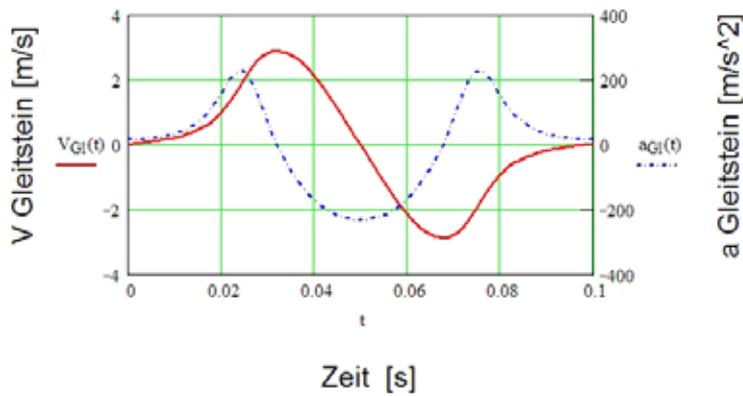


Bild 4.6: Geschwindigkeit- und Beschleunigung des Gleitsteins im Getriebe

Nachteilig für die Verwendung eines Gleitsteingetriebes ist das feste Übersetzungsverhältnis, (Abmessungsabhängig) da bei Änderung der Produktabmessung die Getriebe durch neue, auf die geänderten Abmessungen abgestimmte Getriebe ersetzt werden müssen.

$$i_{\text{Malteser}}(b \leq t \leq c) = \frac{V_{\text{Hauptpr}}}{V_{\text{Nebenpr}}} = \frac{l_{\text{Pr od}}}{l_{\text{Tape}}} = i_{\text{erforderlich}}$$

Erforderliche Übersetzung während der Applikationsphase.

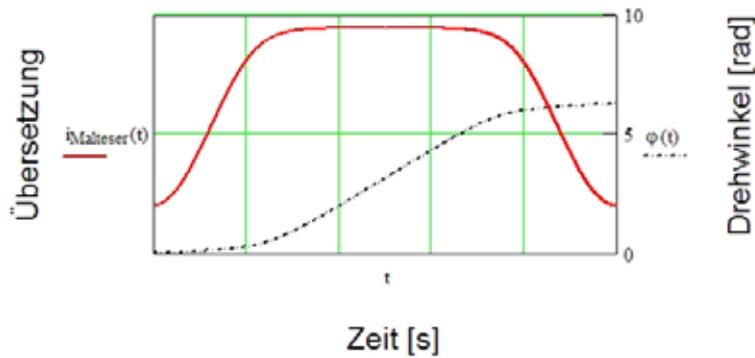


Bild 4.7: Übertragungsfunktion mit dazugehörigem Drehwinkel, bei einer Umdrehung

Verfolgt man den zweiten Lösungsansatz des Servodirektantriebes weiter, so kommt man nach kurzer Zeit zu dem Ergebnis, dass die erforderlichen maximalen Beschleunigungen der Ambosswalze nur mit kleinen Ambosswalzendurchmessern zu erreichen sind, was wiederum zur Folge hat, dass die Krümmungsradien auf welchen das Tape abgelegt wird zu klein sind um das Tape während der Beschleunigung sicher zu halten, bzw. der restliche „freie“ Winkel nicht zur Beschleunigung der Walze ausreicht.

$$\Delta\varphi_B = \pi - \frac{l_{Tape}}{R_{Amboss}}$$

wobei weiter gilt, dass

$$\Delta\varphi_B \geq \frac{1}{R_{Amboss}} \int_a^b V_{ideal}(t) dt$$

Aus dieser Abhängigkeit folgt, dass der Radius der Ambosswalze nicht beliebig reduziert werden kann und somit die Massenträgheit der Ambosswalze eine entscheidende Größe für die maximal erreichbare Walzenbeschleunigung ist. Es gilt die folgende Gleichung

$$M_{Motor_erf}(t) = \alpha_{Appliezier}(t) \sum J_i$$

mit $J_i = m_i \cdot r_i^2$

Bei näherer Betrachtung zeigte sich, dass mit den erforderlichen Walzenradien kein ausreichender Krümmungsradius zu erreichen war, und daraus folgend die maximal mögliche Massenträgheit der Ambosswalze überschritten wurde. Deshalb konstruierte man eine Ambosswalze welche zwar einen kleinen Applikationsradius und gleichzeitig einen großen Krümmungsradius besitzt. Das Prinzip und auch die bezüglich Massenträgheit und Festigkeit optimierte Ambosswalze stellt Bild 4.8 dar. Das Halten der Tapes auf der Ambosswalze erfolgt über ein aus dem Zentrum eingeleitetes Vakuum.

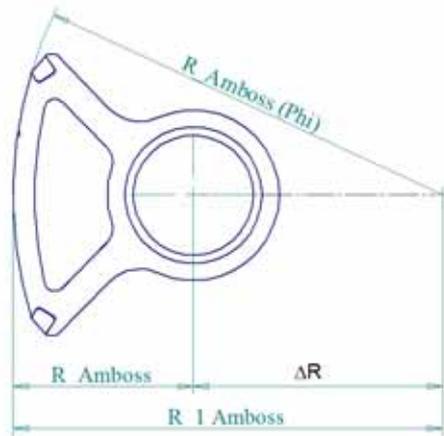


Bild 4.8: Trägheitsoptimierte Ambosswalze mit abgeflachtem Radius

Mit dieser Walzengeometrie ist es möglich das Tape nicht zu stark zu krümmen und gleichzeitig die maximalen Massenträgheitsmomente nicht zu überschreiten. Allerdings bedarf es bei der Kurvenberechnung einer Korrektur in der Form, dass der vom Drehwinkel veränderliche Walzenradius berücksichtigt werden muss. Es gilt dann nicht mehr die Standardgleichung sondern folgende Gleichung

$$V_{ideal}(t) = R_{Amboss} * \omega_{Amboss}(t)$$

$$V_{ideal}(t, \varphi) = R_{Amboss}(\varphi) * \omega_{Amboss}(t)$$

mit der Bedingung, dass

$$V_{ideal}(b \leq t \leq c) = const. \text{ und}$$

$$R_{Amboss}(\varphi) = R_{Amboss} - \left[R_{Amboss} * \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) + \Delta R - R_{1Amboss} * \sqrt{1 - \left(\frac{R_{Amboss}}{R_{1Amboss}}\right)^2 * \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)^2} \right]$$

Mit Änderung der Walzengeometrie wie in Bild 4.8 dargestellt ist es nicht möglich die Ambosswalze weiterhin mit dem Malteserkreuzgetriebe anzutreiben, da zum Erreichen der konstanten Umfangsgeschwindigkeit in der Applizierphase die Winkelgeschwindigkeit noch zusätzlich variiert werden muss. Folgerichtig wurde eine Servomotor-Einzelantriebstechnik ausgewählt und realisiert.

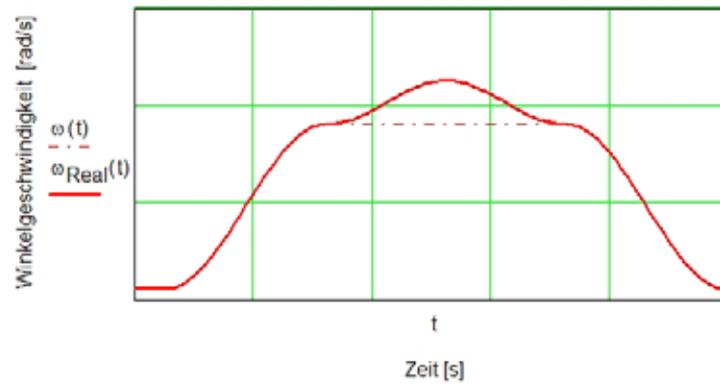


Bild 4.9: variierte Winkelgeschwindigkeit mit abgeflachter Ambosswalze

5 Zusammenfassung

Die Gesamtlösung besteht neben dem bereits vorgestellten Applikator aus zusätzlichen Einheiten, die im Wesentlichen der Materialführung und der lagegenauen Ausrichtung dienen. **Bild 5.1** zeigt eine Gesamtansicht des Systems.

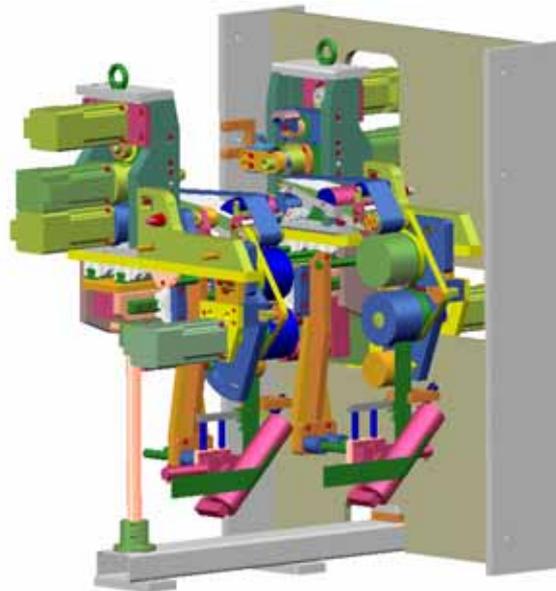


Bild 5.1: Gesamtansicht der Prozesseinheit „Applikation“

6 Literatur

- /1/ VDI Richtlinie 2727, Lösung von Bewegungsaufgaben mit Getrieben, VDI Handbuch Getriebetechnik, Stand Dezember 1998
- /2/ Studie zur Situation der Medizintechnik in Deutschland im internationalen Vergleich, BMBF, Berlin 2005
- /3/ G. Dittrich, R. Braune, Getriebetechnik in Beispielen, Oldenburg Verlag, 1987
- /4/ BVmed, Branchenreport, 2002
- /5/ Method and Device for a flat Material Web Section, WO 2005/065617A1, Patentschrift

7 Verwendete Formelzeichen

a, b, c	Zeitabschnitte
$\alpha_{\text{Applizier}}(t)$	Winkelbeschleunigung der Applizierwalze
$i_{\text{erforderlich}}$	erforderliches Übersetzungsverhältnis
$i_{\text{Malteser}}(t)$	Übersetzung des Malteserkreuzgetriebes
i_{prozess}	Prozessübersetzung
$\sum J_i$	Summe aller zu Massenträgheitsmomente
$\Delta\varphi_B$	freier Winkel zur Beschleunigung der Ambosswalze
ΔR	Mittenversatz der abgeflachten Amboss- / Applizierwalze
l_{Produkt}	Länge des Produktes
l_{Tape}	Länge des zu applizierenden Tapes
m_i	Einzelmasse
$M_{\text{Motor_erf}}(t)$	erforderliches Motordrehmoment
P_M	Leistung d. Maschine in Produkte/Sekunde
R_{Amboss}	Radius der Amboss- / Applizierwalze
$R_{1\text{Amboss}}$	Abgeflachter Radius der Amboss- / Applizierwalze
$R_{\text{Amboss}}(\varphi)$	Radius der Amboss- / Applizierwalze
r_i	Radius der Einzelmasse bezogen auf die Drehachse
t	Zeit
t_{Takt}	Zeit zur Applikation eines Tapes
$V_{\text{Amboss}}(t)$	Geschwindigkeit der Amboss-, Applizierwalze
V_{Hauptpr}	Bahngeschwindigkeit des Hauptprozesses

$V_{ideal}(t)$	ideale Geschwindigkeit für den Applizierprozess
$V_{Messer}(t)$	Geschwindigkeitsverlauf der Messerwalze
$V_{Nebenpr}$	Bahngeschwindigkeit des Nebenprozesses
$\omega_{Real}(t)$	Winkelgeschwindigkeit der Applizierwalze

ITNW
Damit Ihr Produkt hält
was es verspricht



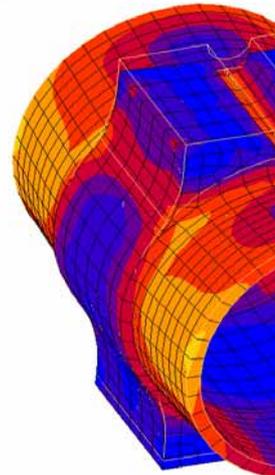
Ingenieurtechnik
NordWest

Die ITNW Ingenieurtechnik NordWest GmbH unterstützt Sie bei der Entwicklung Ihrer neuen Produktidee durch professionelle und bedarfsgerechte Konstruktion, Berechnung und Simulation und sorgt dafür, dass Ihr Produkt auch hält was es verspricht.

Unsere Leistungen auf einen Blick:

- Entwicklungs- und Konstruktionsunterstützung
- Bauteil- und Strukturoptimierung
- Festigkeit und Betriebsfestigkeit
- Lineare, nichtlineare, dynamische und transiente Analysen mittels moderner FEM-Methoden
- Erstellung von Berechnungsmodellen

ITNW Ingenieurtechnik NordWest GmbH
Tel: +49 441 2050 960 • Fax: +49 441 2050 961
E-Mail: email@it-nw.de

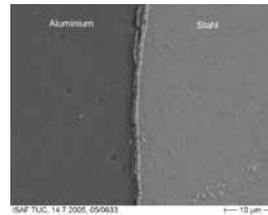


Vom Multi Material Design zum Finite Elemente Design



Schäfer, G.

Maschinenbauliche Konstruktionen sind zunehmend durch lokal extreme Anforderungen bei gleichzeitiger Schonung der Materialressourcen gekennzeichnet. Multi Material Anwendungen und aktuelle Entwicklungen in der Fertigungstechnik zur lokalen Modifikation von Werkstoffeigenschaften bieten dazu Lösungen an. Die Konstruktionslehre bietet für den effektiven Einsatz dieser werkstofflichen Lösungen, speziell bereits in der Konzeptphase, noch keine geeigneten Systematiken an. Überlegungen zum Finite Elemente Design (FED) greifen diese Fragestellung auf und ordnen die komplexen Einflussparameter zwischen Werkstoff, Technologie und Gestaltung mit dem Ziel einer semantischen Abbildung.



Metallic and composite structures have a wide application range in mechanical and process engineering. They are subject to many different tasks which are going to be more complex with variable local specifications. As an example, the geometry of a splined shaft-hub-connection leads obviously on the one hand to notch effect problems in special areas and on the other hand a very high wear resistance is needed on the flanks. Manufacturing processes such as cold forming and combined cutting, are increasing the material properties for different requirements by local effects. To balance the contradictions between the material resistance and the local stress concentration by means of plastic behaviour versus wear resistance and hardness leads in a perfect way to a design with a single material but multi material properties.

The use of such an advanced material design needs a detailed knowledge of the material properties. The knowledge has to be applied at the very beginning of the design process. The design process is a multidiscipline challenge between material science, design methodology and manufacturing, which can only be solved by concurrent engineering.

The necessary knowledge of accessible material properties, with regard to the manufacturing process, might be available by different databases, such as internal information, material supplier or public in the web from current research publications. In a guided search it might be possible to use new semantic web2.0-technologies like agents with ontologies, automated personal tagging and so on to provide this knowledge to the designer already in the conceptual design phase.

1 Einleitung

Dem Konstrukteur steht eine Vielzahl von Werkstoffen zur Funktionserfüllung zur Verfügung. In einfachen Anwendungsfällen ist es häufig ausreichend, das gesamte Bauteil „monolithisch“ aus einem Werkstoff herzustellen. In diesem Fall wird der am höchsten belastete Bauteilbereich zur Dimensionierung herangezogen und legt daher die Werkstoffkennwerte für das gesamte Bauteil fest. In den meisten Fällen erfolgt lediglich eine geometrische Anpassung. Diese Vorgehensweise ist bei komplex belasteten Bauteilen und Komponenten nicht effizient. Insbesondere bei konträren Anforderungen wie z.B. hoher Festigkeit und hoher Zähigkeit innerhalb eines Bauteils stehen dem Konstrukteur nur eingeschränkt Werkstoffe zur Verfügung.

Lösungen für diese Anwendungen stellen Verbundwerkstoffe (FRP) oder die Kombination verschiedener Werkstoffe im Multi Material Design (MMD) dar, siehe **Bild 2**. Weitere Lösungsansätze ergeben sich aus der möglichen lokalen Modifikation der Werkstoffeigenschaften, siehe **Bild 1**. So können die Werkstoffeigenschaften z.B. durch die Kombination von Spanen und Walzen oder Bake Hardening im Bereich dynamisch beanspruchter Bauteile positiv beeinflusst werden. Im Sonderforschungsbereich „Erzeugung hochfester metallischer Strukturen und Verbindungen durch gezieltes Einstellen lokaler Eigenschaften“ (SFB 675) werden an der Technischen Universität Clausthal und der Leibniz Universität Hannover solche Fertigungseinflüsse aktuell untersucht und optimiert.

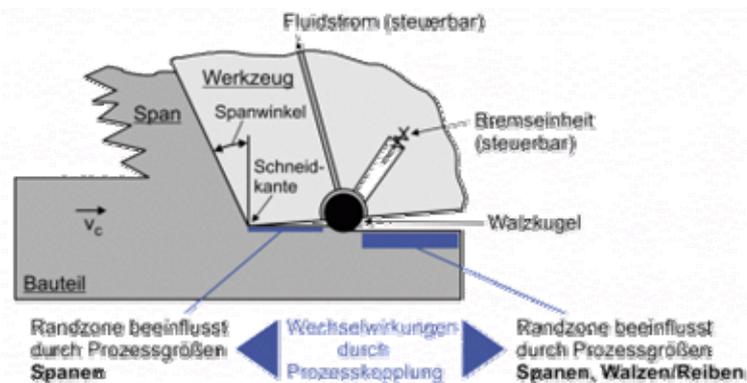


Bild 1: Kombiniertes Fertigungsverfahren Spanen-Walzen /1/

Eine ganzheitliche Betrachtung zur Erarbeitung allgemein gültiger Lösungsansätze erfordert dazu auch eine Erfassung der Wechselwirkungen zwischen den Verarbeitungsparametern, Eigenschaftsprofilen und dem Fügeverhalten. Das Ziel aktueller Überlegungen am IMW ist daher am Beispiel von Werkstücken mit einer sehr hohen Leistungsdichte eine neuartige Konstruktionssystematik auf Basis ortsaufgelöster Anforderungs- und Eigenschaftsprofile zu entwickeln (Finite Elemente Design, FED).

Es soll das interdisziplinäre Spannungsfeld zwischen Gestaltung, Werkstoff und Fertigung im finiten Volumenelement für die Auslegung und Herstellung hochbelastbarer Strukturen mit lokal eigenschaftsangepassten Werkstoffen genutzt werden. Dazu werden ortsaufgelöste Anforderungsmatrizen erstellt und mit Werkstoff- und Fertigungsprofilen unter Beachtung maximal möglicher Eigenschaftsgradienten korreliert. Diese neue Systematik (FED) kann anhand einer komplexen Konstruktionsaufgabe aus dem Bereich der Antriebstechnik für das Fügen eines rotationssymmetrischen Bauteils (Gelenkwelle) validiert werden.

Zur Erfüllung höchster Leistungsdichte hochfester Strukturen wird es häufig notwendig, unterschiedliche Funktionswerkstoffe in Integral- oder Verbundbauweise zu verwenden. Der Konstrukteur hat hierbei die Aufgabe, durch die Kombination von geeigneten Werkstoffen bestimmte Eigenschaften zu forcieren. Insbesondere die Möglichkeit durch Mischverbindungen an Komponenten und Bauteilen lokale Festigkeitssteigerungen zu realisieren, erweitert das Konstruktionspektrum erheblich.

2 Multi Material Design

Durch den Einsatz den örtlichen Beanspruchungen entsprechender Werkstoffe in einer Konstruktion ergeben sich große Kosten-Gewichtseinsparungs-Effekte, wie es am Multi Material Design in der Automobilindustrie deutlich wird, **Bild 2, /2/**. Die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen zu diesem Thema befassen sich neben den Werkstoffentwicklungen und den Strategien zur Werkstoffauswahl im Wesentlichen mit den Bauweisentrends im Fahrzeugbau. Dabei wurde bereits frühzeitig erkannt, dass systematische Ansätze erforderlich sind, die eine ganzheitliche Bearbeitung von Konstruktion, Werkstoffeigenschaften und Herstellung gewährleisten.

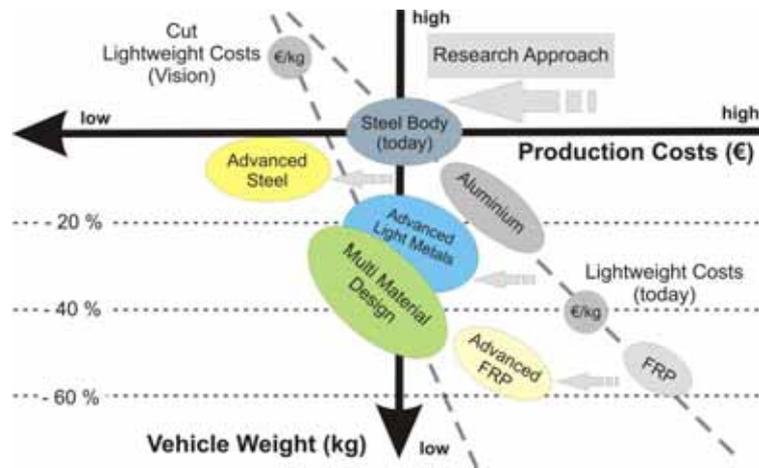


Bild 2: Kostenattraktives Multi Material Design im Karosseriebau /2/

Werkstoffverbindungen spielen bei der Umsetzung des Multi Material Design eine wichtige Rolle, da das Entwicklungspotenzial nur durch eine an die Mischbauweise angepasste Fügechnik voll ausgeschöpft werden kann /3/. Dabei sind sowohl thermische als auch bei unverträglichen Werkstoffkombinationen mechanische Fügeprozesse bzw. die Klebtechnik von großer Bedeutung.

Simulationsverfahren und FE-Analysen sind für die Mischbauweise eine unabdingbare Voraussetzung. Sie werden nicht nur für die Auslegung der Bauteile eingesetzt, sondern sind auch für die Belastbarkeit der Verbindungsstellen von entscheidender Bedeutung. In Hinblick auf eine rechnerunterstützte Konstruktionsystematik, die die Konstruktion, die örtlichen Werkstoffeigenschaften und die Fertigung gleichzeitig berücksichtigt, sind bisher keine Ansätze aus der Literatur bekannt. Es wird lediglich ein Ansatz für ein verbessertes thermisches Verhalten einer Multi Material Struktur beschrieben /4/.

Um die Anforderungen beim Einsatz funktionsorientierter Werkstoffe zu erfüllen, ist eine konstruktive Vorgehensweise erforderlich, die formal noch nicht existiert. Konstruktionsregeln, wie „werkstoffgerechtes“ oder „fertigungsgerechtes“ Konstruieren gelten ebenfalls nur für monolithische Bauteile. Die Abhilfe gelingt durch eine orts aufgelöste Betrachtungsweise im FED, die die Eigenschaftsprofile vom Werkstoff bzw. Fertigungsprozess in die Konzeptphase des Produktentstehungsprozess einbindet, die Technologie samt werkstofflicher Zusammenhänge - auch für Simulationsuntersuchungen zu Bau-

teil- und Funktionsverhalten - berücksichtigt, eine ganzheitliche Eigenschaftsverknüpfung gewährleistet und damit die Möglichkeit für eine vorausschauende Produktentwicklung bietet.

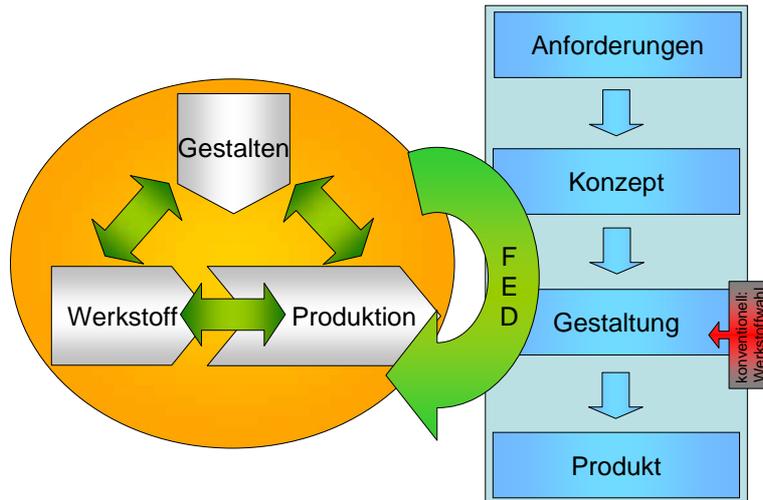


Bild 3: Vorgehen zur Entwicklung hochfester Strukturen aus einsatzoptimierten gefügten Mischverbindungen

3 Finite Elemente Design (FED)

Unter FED ist eine Konstruktionssystematik zu verstehen, die sich am finiten Bauteilelement als kleinste Konstruktionseinheit orientiert. In diesem System wird ein zu entwickelndes, bzw. zu optimierendes Bauteil in Bereiche verschiedener Anforderungen aufgelöst. Die Anforderungen an die Bereiche werden durch Anforderungsmatrizen beschrieben. Die konventionellen Vorgehensweisen betrachten ein Bauteil als Gesamtes, das verschiedene Anforderungen zu erfüllen hat. Durch die unzureichende Berücksichtigung von Werkstoff- und Fertigungspotenzialen kann hierbei nur in den seltensten Fällen ein Optimum bezüglich der Erfüllung aller Anforderungen erreicht werden. **Bild 4** zeigt exemplarisch das konventionelle, iterative Vorgehen bei der Konstruktion einer Zahnwellenverbindung. Die Anforderungen an das Bauteil gelten zum Teil nicht für das gesamte Bauteil sondern nur für lokal begrenzte Bereiche. So wird eine hohe Festigkeit und Oberflächenhärte im Bereich der Zahnwellen-Verbindung gefordert, während die eigentliche Welle über ein hohes Maß an Steifigkeit verfügen sollte.

	Anforderungen			
	Steifigkeit	Masse	Kosten	Bauraum
	✗	✗	✓	✓
	✓	✗	✗	✓
	✓	✗	✓	✓
	✓	✓	✗	✗

iterative Entwicklung
Zahnwellenverbindung

Bild 4: Iteratives Vorgehen bei der Konstruktion einer Zahnwellenverbindung

Durch die späte Berücksichtigung des Werkstoffes kann bei dieser Vorgehensweise auch erst in einem späten Konstruktionsstadium die Anforderungserfüllung überprüft werden. Die Abhängigkeit der Anforderungen voneinander macht bisweilen mehrere Iterationen notwendig und führt nicht zwangsläufig zur idealen Lösung. So führt, wie in **Bild 4** zu sehen ist, die Notwendigkeit der Anforderungserfüllung von einer monolithischen Zahnwelle (I) über eine monolithische Hohlwelle (II) und eine in Mono Material gefügte Hohlwelle (III) zu einer geschraubten Stahl/Aluminium Mischkonstruktion (IV). Die ideale Lösung, eine geschweißte Stahl/Aluminium Mischkonstruktion wurde bei dieser iterativen Vorgehensweise nicht gefunden, da die Kenntnis über die Fertigungstechnologie fehlte. Im FED werden hingegen für jedes Element die Anforderungsmatrizen mit Werkstoff- und Fertigungsparametern verknüpft und ermöglichen so bereits in der Phase der Konzeptfindung deren Berücksichtigung. Dies führt, unter Auslassung konventionell notwendigerweise zu durchlaufender Iterationen, zu einer schnelleren und innovativeren Lösung (**Bild 5**).

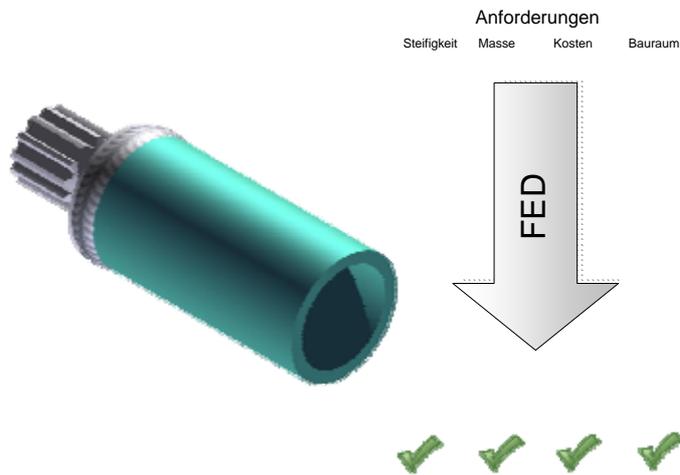


Bild 5: Lösungfindung durch Anwendung des FED

Insbesondere örtlich eigenschaftsveränderte Werkstoffe (SFB675) machen zur vollständigen Ausnutzung des Potenzials eine enge Kopplung von Werkstoffauswahl, Konstruktion und Fertigung erforderlich. Die an die lokalen Beanspruchungen angepassten Werkstoffeigenschaften können sowohl mit Hilfe unterschiedlicher Werkstoffe (Multi Material Design) als auch mit den im Rahmen des SFBs entwickelten modifizierten Werkstoffen realisiert werden. Bei Überschreitung eines gewissen Gradienten in den Eigenschaftsänderungen von einem Element zum nächsten ist eine örtliche Anpassung der Werkstoffeigenschaften notwendig. Dies kann entweder durch definierte Eigenschaftsänderung des gleichen Werkstoffs (z.B. lokale Verfestigung) oder durch Werkstoffwechsel (Mischbauweise) erzielt werden. In einer ersten makroskopischen Nutzung kann die FED-Vorgehensweise in Multi Material Design-Bauteilen durch Fügen realisiert werden. In der weiteren Entwicklung hin zur mikroskopischen Nutzung wird das System auf die im SFB 675 entwickelten Werkstoffe ausgedehnt. Dabei ergeben sich folgende konkrete Ziele:

- Eine an finiten Bauteilelementen orientierte Konstruktionssystematik (FED) für Mischverbindungen und lokal eigenschaftsgeänderte Werkstoffe mit der neuartigen Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Werkstoff-Fertigung-Gestaltung bereits in der Konzeptfindungsphase. Dies soll auch die numerische Simulation eines virtuellen Produkts schon in dieser Phase unterstützen. Lokal eigenschaftsgeänderte Strukturen sind bei dieser Vorgehensweise keine „Notlösung“ (z.B. Kugelstrahlbehandlung dauerschwing-

- bruchgefährdeter Bereiche), sondern sollen strategisch/konstruktiv angewendet werden
- die Systematisierung von finiten Funktionsbereichen, deren werkstofflicher Realisierung (incl. Fügen) und konstruktiver Beschreibung in semantischer Form sowie einer Ontologie zur Informationsrepräsentation
 - Schnittstellendefinition unter Berücksichtigung des orts aufgelösten Eigenschaftsprofils der Mischverbindung (Leistungsprofil)
 - Beschreibung der fertigungsbedingten konstruktiven Randbedingungen aus den Fügeprozessen (Verarbeitungsbedingungen)

4 Informationsrepräsentation zur Lösungsfindung

Parallel zu diesen werkstoff-/fügetechnischen und konstruktionssystematischen Fragestellungen soll die dynamische Informationsgewinnung und -bereitstellung auf Basis von Agentensystemen und anforderungsspezifischen selbstformenden Suchmasken weiter verfolgt werden. Solche Systeme sind bereits im e-business in Form von persönlichen Produktangeboten erfolgreich implementiert und können auf spezifische konstruktive Anforderungen im Ansatz übertragen werden. Damit kann die starre Kopplung an eine Informationsdatenbank und deren begrenzte Ressourcen überwunden werden und adäquat auf flexible Produkthanforderungen bereits in der konzeptionellen Phase der Freiheitsgrad „Werkstoffwahl“ mitgenutzt werden.

Für die Entwicklung innovativer Produkte ist es demnach wichtig, Werkstoffe und ihre Eigenschaften mit Fertigungstechnologien sowie den Funktionen, die das Produkt erfüllen soll, in Zusammenhang zu bringen.

Bei der Integration und Zusammenarbeit mehrerer Fachbereiche und der damit entstehenden Fülle an Wissen, Daten und Informationen, wird der Lösungsfindungsprozess dynamisch und sehr komplex.

Um die Kombination der Informationen aus den Entwicklungsfeldern Werkstoffe, Technologie und Konstruktion für den Konstrukteur anwendbar und handhabbar zu machen, sollen Informationsagenten angewendet werden, die – ähnlich wie der Konstrukteur – im Moment des Bedarfs von Information gezielt Recherchen unternehmen und dabei den aktuellen Wissensstand in der jeweiligen Produktentwicklungsphase berücksichtigen können /5/.

Da es gerade in der frühen Phase der Produktentstehung oftmals schwierig ist konkrete Aussagen zu definieren, erscheint es wenig zielführend, wenn in Informationssystemen und Datenbanken ausschließlich nach Schlagworten gesucht wird. Eine Beschaffung, Korrelation und Analyse von verschiedenen Informationen aus verschiedenen Quellen, die zu einem entsprechenden Muster passen, erscheint

geeigneter, um eine innovative Produktidee entstehen zu lassen. Informationsagenten stellen Informationsbrücken zwischen Quellen und Nutzern dar. Die Filterung von Informationen erfolgt über definierte Nutzerinteressen, mit welchen Informationsquellen auf Schlüsselworte oder Eigenschaften hin verglichen werden. Der Einsatz von Informationsagenten eröffnet folgende Anwendungsmöglichkeiten /6/:

- Zugriff auf heterogene/verteilte Informationssysteme
- Auffinden und Filtern relevanter Daten
- Handhaben und Bearbeiten von Metadaten
- Zusammenführen und Darstellen von Informationen

Informationsagenten können anhand abstrahierter Deskriptoren nach artverwandten Aufgaben und deren Detaillösungen in beliebigen Datenbeständen suchen. Dem Konstrukteur werden diese Detaillösungen dann präsentiert, um seinen darauf aufbauenden kreativen Lösungsfindungsprozess anzuregen. Damit weitet sich sein Gesichtsfeld vom bekannten Lösungspfad deutlich zu einem Lösungsfeld hin auf (Morphologischer Kasten). In einem weiteren Schritt soll das System ein personalisiertes Profil entwickeln, in dem der Konstrukteur Lösungen zu seinem Spezialgebiet bevorzugt dargestellt bekommt. Das System soll also anhand erledigter Konstruktionsaufgaben die Ausrichtung des Konstrukteurs erlernen (personalisierte Seiten).

Wesentlich ist in diesem Zusammenhang die iterative Suche des Agenten, da ausgehend von bestimmten Anforderungen (z.B. Festigkeit und Zähigkeit) bestimmte Werkstoffe gefunden werden. Zu denen geeignete Formgebungsverfahren und spezielle Angaben zu geeigneten Fügeprozessen und deren Randbedingungen bereitgestellt werden sollen.

5 Zusammenfassung

Aktuelle Entwicklungen aus dem Zusammenwirken von Werkstoff- und Fertigungstechnologie eröffnen neue Gestaltungsmöglichkeiten, die effektiv bereits in der Konzeptphase der Produktentstehung Eingang finden sollten. Mit dem Finite Elemente Design (FED) wird eine dem lokalen Anforderungs- und Eigenschaftsprofil entsprechende Konstruktionsmethodik angeboten. Gleichzeitig erlaubt die damit verbundene Systematik eine Strukturierung des Wissens aus den verknüpften Bereichen Werkstoff, Gestalten, Fertigung und Fügen der Art, dass eine rechnerunterstützte semantische Suche von Agenten auf Basis von Ontologien möglich wird. Damit werden konstruktive Teillösungen mit ihren werkstofflichen und fügetechnischen Einzelheiten auch in neuen Sinnzusammenhängen weiter verwendbar.

6 Literatur

- /1/ <http://www.sfb675.tu-clausthal.de/teilprojekte/b3/>
- /2/ Meschut G., Goede, M.: Neue Werkstoff- und Bauweisenkonzepte im Fahrzeugbau – Herausforderungen für thermische und wärmearme Fügeverfahren; Fügen im Fahrzeugbau; Bb. 9. Internationales Aachener Schweißtechnik Kolloquium, 29. – 30.06.2004; S. 37 – 48
- /3/ Stich, A.: Neue Werkstoff- und Verfahrenstechnologien im PKW-Bau – eine Zukunft für Werkstoffforschung und –entwicklung; Industriekolloquium „Fertigen in Feinblech (2004) S. 23 – 25
- /4/ Blouin, V. Y., Oschwald, M., Hu, Y., Fadel, G. M.: Design of functionally graded structures for enhanced thermal, behavior; Design Automation Conference, 31 (2005), S. 835 – 843
- /5/ Lütkepohl, A.: Anforderungsgetriebene Konstruktionsmethodik zur werkstoffgerechten Lösungsfindung. Abschluss-symposium zum Paketantrag „Kompatibilisierungsmethoden“, 16.11.2006, Clausthal
- /6/ Müller, D.: Intelligente Unterstützung für ein aufgabenorientiertes Anforderungsmanagement in der Integrierten Produktentwicklung. Dissertation, TU Clausthal, 2006

Innovation mit Normen und Standards

Bormann, E.; Kramer, W.

Das IMW führt im Rahmen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technik (BMWi) unterstützten Initiative „Innovation mit Normen und Standards (INS)“, die vom Deutschen Institut für Normung e.V. (DIN) beauftragte Untersuchung zum Thema „Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards“ durch.



Assigned by the DIN, the IMW effects the investigation „Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards“. This investigation has been remitted in the context of the initiative „Innovation with Norms and Standards“, which is supported by the Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi).

1 Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards

Die Kernaufgabe der Normung ist in den letzten Jahren durch schnelle Innovation deutlich erweitert worden. Über die Marktfähigkeit von Innovationen muss aber früh nachgedacht und zielgerichtet gehandelt werden. Insbesondere im Hinblick auf die fortschreitende Globalisierung der Märkte können Normen den Marktzugang innovativer Produkte fördern und sichern. Die positiven Impulse für den Transfer von Wissen zum Markt durch rechtzeitige Normung und Standardisierung sollten daher genutzt werden /1/.

Auf diesem Hintergrund unterstützt das BMWi die Initiative „Innovation durch Normen und Standards“. Im Rahmen dieser Initiative führte das IMW in den vergangenen beiden Jahren die vom DIN beauftragte Untersuchung „Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards“ durch (vgl. /2/, /3/, /4/).

Ziel dieser Untersuchung war es, die Bedeutung von Normen und Standards für den Marktzugang und die Marktzulassung zu ermitteln und den Nutzen der Normung sowohl für Handelsbeziehungen als auch für innerbetriebliche Abläufe aufzuzeigen. Die Untersuchung wurde in Unternehmen ausgewählter Branchen differenziert nach Klein-, Mittel- und Großunternehmen durchgeführt. Weiterhin wurde

danach unterschieden, ob das jeweilige Unternehmen Normungskompetenz hat oder nicht.

Neben ausführlichen Recherchen wurden im Jahr 2006 in persönlichen Gesprächen mit Vertretern aus den Branchen Energietechnik, Maschinen- und Anlagenbau, sowie Fahrzeugtechnik u. a. erste Erkenntnisse zur Anwendung von Normen und Standards in Ausschreibungen gewonnen. Anhand von Fallbeispielen wurde der Einfluss von Normen und Standards in unternehmensübergreifenden Beziehungen betrachtet.

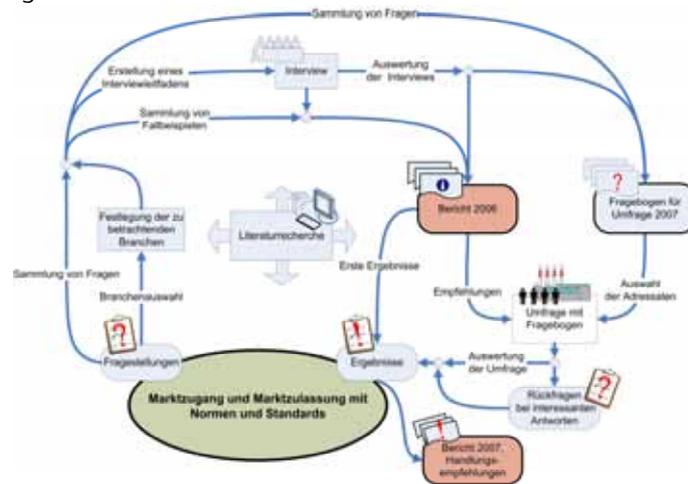


Bild 1: Vorgehensweise

Mit der Fortsetzung des Projektes im Jahr 2007 sollte durch eine weiter differenzierende Umfrage die Ergebnisse von 2006 verifiziert, konkretisiert und ggf. korrigiert werden. Auf Basis der im Jahr 2006 erzielten Ergebnisse wurde mittels eines erarbeiteten Fragebogens eine breit gestreute Befragung in Unternehmen verschiedener Branchen durchgeführt. Das Gesamtkonzept des Projekts ist in **Bild 1** dargestellt.

1.1 Vorstudie 2006

In dem 2006 durchgeführten Teil der Untersuchung konnte festgestellt werden, dass Großunternehmen sich weitestgehend des Potenzials, das Normen bieten bewusst sind und es nutzen, um erfolgreich am Markt teilzunehmen und z.T. um Marktvorbereitung zu betreiben. Kleine und mittelgroße Unternehmen (KMU) hingegen befolgen zu-

meist die Normen, die für ihre Produkte entweder in (gesetzlichen) Richtlinien festgeschrieben sind oder vom Kunden gefordert werden. Der Nutzen, den darüber hinausgehende Normen für ihr Unternehmen bieten können, erschließt sich ihnen oftmals nicht. Großunternehmen haben daher im Allgemeinen einen Innovationsvorsprung gegenüber KMU, da sie neue Normen eher begleiten und strategisch anwenden. Eine Nichtteilnahme an der nationalen Gremienarbeit und der Verzicht auf die Beobachtung der internationalen Normung kann somit letztlich zu Marktnachteilen führen. Für KMU ist es schwierig, Informationen über Normen sowie deren Aktualität zu erhalten. Soweit KMU überhaupt über Normen informiert werden, geschieht dies häufig über Kundenanforderungen oder die jeweiligen Industrierverbände.

Es zeigte sich u.A., dass es unterschiedliche Motivationen gibt, Normen und Standards anzuwenden (**Bild 2**).

In gesetzlichen Richtlinien aufgeführte Normen werden beispielsweise angewendet um Konformität mit dem seit 1993 eingeführten CE-Zeichen zu erreichen. Nachdem es jahrelang Probleme bei der Umstellung von nationalen auf europäische Richtlinien gab, werden sie heutzutage meist eingehalten. Es gibt jedoch bei einigen Firmen immer noch Probleme bei der richtigen Umsetzung. Auch wird das Potenzial von EU-Richtlinien nicht überall erkannt, sie werden häufig fälschlicherweise als Handelshemmnis gesehen.

Abhängig von der Position des jeweiligen Unternehmens am Markt werden den Handelspartnern mehr oder weniger Vorgaben über einzuhaltende Normen und Standards gemacht. Häufig handelt es sich dabei um Werknormen oder um die Vorgabe eines einzuhaltenden Qualitäts- und/oder Umweltmanagementsystems. Diese Forderung expliziter Normen und Standards wird teilweise als Zwang angesehen, sie kann aber auch ein Schutz des schwächeren Partners darstellen, da dieser bei auftretenden Problemen auf die Einhaltung der Forderung verweisen kann.

Normen, die nicht von anderer Stelle gefordert werden, werden meist nur von Großunternehmen genutzt. KMU entgehen die Vorteile dieser Normen mangels Zeit und Information. Darüber hinaus werden Normen strategisch genutzt, um dem eigenen Unternehmen Vorteile zu verschaffen. Auch hier zeigte sich das den KMU für die strategische



Bild 2 Motivationen Nutzung von Normen und Standards

Anwendung von Normen häufig nicht die geeigneten Mittel zur Verfügung stehen.

Normen und Standards werden in Ausschreibungen eingesetzt, um diese zu konkretisieren.

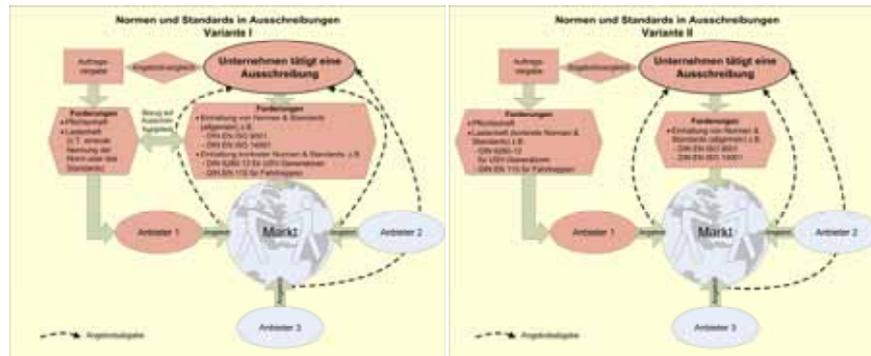


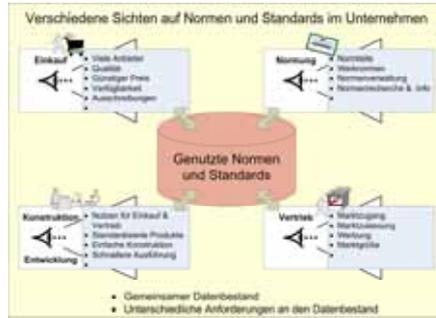
Bild 3 Forderung von Normen und Standards in Ausschreibungen

Die Interviews ergaben, dass es zwei Varianten gibt, wie mit Normen und Standards in Ausschreibungen und Aufträgen verfahren wird. In Variante I (**Bild 3** links) wird bereits in der Ausschreibung auf alle zu erfüllenden Normen und Standards eingegangen. Es werden sowohl einzuhaltende allgemeine Forderungen, wie Qualitätsmanagementsystem (QMS) nach DIN EN ISO 9001 gestellt oder Generalklauseln verwendet als auch alle konkreten Normen und Standards für die einzelnen Komponenten eines Auftrages festgehalten. Bei Erteilung des Auftrages wird dann im Pflichten- und Lastenheft entweder auf die Ausschreibung verwiesen oder die Forderung nochmals wiederholt.

In Variante II (**Bild 3** rechts) werden in der Ausschreibung nur Generalklauseln genannt bzw. allgemeine Normen und Standards gefordert. Erst bei der Auftragsvergabe werden dann im Pflichtenheft und im Lastenheft sämtliche Forderungen konkretisiert.

1.2 Studie 2007

Die im Jahr 2006 begonnene Basisuntersuchung wurde im Jahr 2007 fortgesetzt, mit dem Ziel die im Vorjahr getroffenen Aussagen durch eine Industriebefragung zu verifizieren sowie in der Befragung verschiedene Bereiche der Normung zu beleuchten. Zusätzlich sollten Handlungsempfehlungen für die Industrie, das DIN und andere Verbände sowie die Politik aufgestellt werden, um den Umgang mit



Normen und Standards zu verbessern und die Mitarbeit an der Normung erstrebenswerter zu machen. Mitarbeiter verschiedener Unternehmensbereiche haben oft sehr unterschiedliche Sichten auf Normen und Standards (Bild 4). Auf diesem Hintergrund wurde der Fragebogen in fünf Teile untergliedert. Neben einem allgemeinen Teil, den jeder

Bild 4 Sichten auf Normen und Standards

Befragte beantworten soll, wurden speziell die Geschäftsbereiche Einkauf (I), Konstruktion & Entwicklung (II), Vertrieb (III) und Normung (IV) angesprochen (Bild 5).

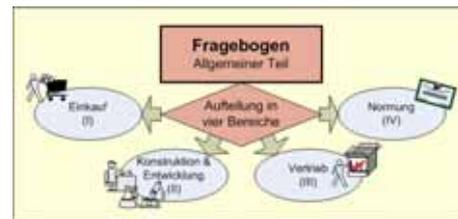
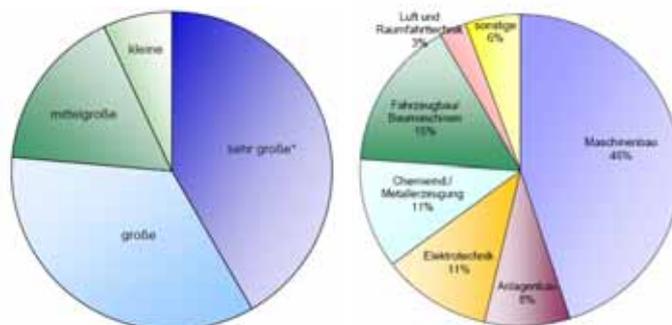


Bild 5 Aufteilung der Fragebögen

Von etwa 1000 über die Fragebogenaktion informierten Unternehmen haben 78 geantwortet. Bild 6 (links) gibt eine Übersicht über die Verteilung der Unternehmensgrößen, Bild 6 (rechts) über die Branchen, denen die beteiligten Unternehmen angehören.

Die Auswertung der Umfrage zeigt teils deutlich die Unterschiede zwischen kleinen, mittelgroßen und großen Unternehmen. So arbeiten kleinere Unternehmen z.B. nur gelegentlich in Normungsgremien mit und



* sehr große nachträglich ermittelt im Internet

Bild 6 Unternehmensgröße (links) und Branchen (rechts) der beteiligten Unternehmen

Unternehmens- kategorie	Zahl der Mitarbeiter	Umsatz	oder	Bilanz Σ
groß	≥ 250	> 50 Mio. €		> 43 Mio. €
mittelgroß	< 250	≤ 50 Mio. €		≤ 43 Mio. €
klein	< 50	≤ 10 Mio. €		≤ 10 Mio. €

Tabelle 1: KMU Definition 2003/361/EG

überprüfen seltener ihre Normen auf Aktualität. Zwischen den einzelnen befragten Abteilungen Einkauf, Konstruktion & Entwicklung, Vertrieb und Normung sind unterschiedliche Ansichten im Bereich der Entscheidung über die Anwendung von Normen und bei der Bewertung verschiedenster Aussagen bezüglich Normen, Standards und

Normung erkennbar.

Die vollständige Auswertung der Umfrage wird dem DIN in Form eines Abschlußberichts ausgehändigt. Dieser wird Anfang nächsten Jahres vorliegen. Die Teilnehmer der Umfrage werden über die Ergebnisse informiert.

2 Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Großunternehmen im Allgemeinen einen Innovationsvorsprung gegenüber klein- und mittelständischen Unternehmen (KMU) haben, da sie neue Normen eher begleiten und anwenden und somit das Potenzial das die Normung bietet besser ausnutzen. Dieser Innovationsvorsprung erleichtert den Marktzugang. Bei klein- und mittelständischen Unternehmen führt häufig fehlendes Bewusstsein über den Nutzen der Normung dazu, dass mögliche Vorteile, die die Normung bietet, nicht ausgeschöpft werden können. Darüber hinaus sehen auch Großunternehmen in einigen Belangen Verbesserungspotenziale.

Aus dem aus der Gesamtuntersuchung abgeleiteten Handlungsbedarf wurden Handlungsempfehlungen formuliert, die Grundlage für folgende Projekte sein können.

3 Literatur

- /1/ N, N.: Innovation mit Normen und Standards (INS), Aufgabengebiet; www.ins.din.de
- /2/ Bormann, E.; Kramer, W.; Müller, N.: Innovation mit Normen und Standards, Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards; Institutsmittteilung Nr. 31, IMW Clausthal 2006
- /3/ Müller, N.; Bormann, E.; Kramer, W.: Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards; Innovation mit Normen und Standards; DIN Mitteilungen März 2007, Beuth, Berlin 2007
- /4/ Müller, N.; Bormann, B.; Kramer, W.: Bericht zum Projekt Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards, IMW Clausthal 2006

Produktdatenmanagement (PDM) in der Lehre



Miehe, A.

Produktdatenmanagement ist eine kritische Komponente in der globalen Zusammenarbeit von Unternehmen und macht die Komplexität heutiger Produkte überhaupt erst beherrschbar. Um Studenten einen ersten Eindruck von den Möglichkeiten von PDM Software zu verschaffen, planen das Institut für Informatik (IfI) und das IMW gemeinsam zwei Praktika mit je 2 SWS auf Basis der Siemens Software TeamCenter.

Product data management is a critical enabler for global collaboration and the management of today's complex products. In order to allow students a first impression of PDM software, the department of informatics (IfI) and the IMW jointly plan two labs on the basis of Siemens' TeamCenter software.

1 PDM – Was ist das?

Wer in der Übung „PDM und Workflow in der Produktentwicklung“ war, der hat gelernt: „Der Begriff Produktdatenmanagement (PDM) umfasst alle Organisationsaufgaben, die sich auf die anforderungsgerechte und wirtschaftliche Erfassung, Bereitstellung und Archivierung von Produktdaten beziehen, die im Verlauf des gesamten Produktlebenszyklus entstehen und benötigt werden.“ /1/ Alles klar?

Eine weit weniger exakte, dafür aber umso anschaulichere Beschreibung ist: PDM ist das SAP der Ingenieure.

Während SAP seine Wurzeln in der Betriebswirtschaft hat, sind die ersten PDM-Systeme aus den Dokumentenverwaltungsprogrammen von CAD-Systemen entstanden und haben ihre Stärken vor allem im technischen Bereich. Auf ihre Funktionen wird im Folgenden noch eingegangen.

Doch zunächst noch ein paar Worte zur Terminologie: Zunächst war die Abkürzung Engineering Data Management (EDM) gebräuchlich. Dann kam PDM, inzwischen hört man auch die Begriffe Product Lifecycle Management (PLM) und Product Lifecycle Collaboration (PLC).

Bild 1 verdeutlicht die Zusammenhänge. /1/

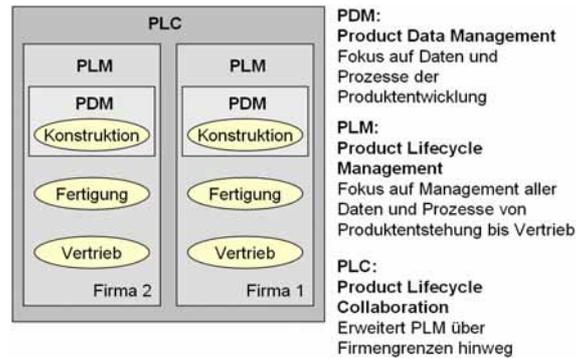


Bild 1: Terminologie beim Produktdatenmanagement

Was macht ein PDM System denn nun in der Praxis? Dies unterscheidet sich von Hersteller zu Hersteller, ständig werden neue Funktionen hinzugefügt. Trotzdem gibt es eine Reihe von Funktionen, die praktisch jedes PDM-System bietet. **Bild 2** gibt dazu einen Überblick. /1/



Bild 2: Die Funktionen eines PDM-Systems im Überblick

Zum besseren Verständnis nun einige Beispiele:

- **Produktstruktur-, Varianten- und Versionsmanagement**
Diese Funktionen liefern Antworten auf die Frage, wann welches Bauteil in welcher Version und Baugruppe verbaut wurde und wie die verschiedenen Baugruppen voneinander abhängen. Per Knopfdruck können die verschiedensten Stücklisten generiert werden. Anpasskonstruktionen können mit wenig Aufwand durchgeführt werden.

- **Workflow-Management**
Die Konstruktion in Deutschland, die Fertigung in Taiwan und die Holding sitzt in Kanada? Um den immensen Kommunikationsaufwand in geordnete Bahnen zu lenken bestimmt das Workflow-Management durch vordefinierte Regeln, wer wann etwas an welchem Teil ändern darf und wie diese Änderungen freigegeben werden.
- **Dokumentenmanagement**
Ein „Daten-Tresor“ für meine Office und CAD Dateien? Stimmt! Es können alle möglichen elektronischen Daten verwaltet werden, etwa die zu einer Elektronik-Baugruppe zugehörige Firmware genauso wie das NC-Fräsprogramme für die Achsen. Das PDM System regelt die Zugriffsrechte und stellt sicher, dass der Nutzer immer aktuellste Version zur Verfügung hat – weltweit. Moderne PDM-Systeme besitzen direkte Schnittstellen in die Anwendungen, z.B. bekommt das CAD-Programm neue Menüpunkte, mit denen direkt aus der CAD-Anwendung Funktionen des PDM-Systems aufgerufen werden können. 
- **Klassifikation**
Die Standardisierung von Teilen oder die Verwendung von Normteilen birgt ein enormes Einsparpotential. Die Klassifikation hilft, ähnliche Teile schnell zu finden.
- **Projektmanagement**
In diesem Punkt tun sich PDM Systeme noch vergleichsweise schwer, häufig ist ein „Projekt“ nicht viel mehr als eine virtuelle Sammelmappe für projektbezogene Daten. Trotzdem: PDM-Systeme helfen, anhand vergangener Projekte Abschätzungen zu treffen, wie sich Zeiten und Kosten für ähnliche Projekte verhalten werden.

Letztlich handelt es sich immer wieder um dieselben Daten. Die Aufgabe des PDM Systems besteht darin, jedem Benutzer genau die Sicht auf diese Daten zur Verfügung zu stellen, die er zur Erledigung seiner Aufgabe benötigt.

2 PDM – Die Perspektiven



Der Markt für PDM-Software wächst stetig. Nach CIMdata soll das Marktvolumen im Jahre 2006 20,1 Milliarden US-Dollar betragen haben, im Jahr 2011 sollen es schon mehr als 30 Milliarden US-Dollar sein /2/. Wenn man berücksichtigt, dass sich diese Zahlen zu etwa einem Drittel auf Software und zu zwei Dritteln auf Dienstleistungen auftei-

len /3/, dann wird deutlich, dass in diesem Markt hervorragende Entwicklungsmöglichkeiten auch und gerade für Hochschulabgänger bestehen. Der Autor kann aus eigenen Erfahrungen bestätigen: Die Firmen suchen fast schon verzweifelt geeignete Kandidaten, der Markt ist leergefegt.

PDM ist für einen Maschinenbaustudenten, der die Arbeitsweise in der Industrie nicht kennt, zunächst einmal ein sehr abstraktes Thema. Daten sortieren und durch die Gegend schieben, darin soll der Mehrwert liegen? Tatsächlich sind aber gerade Maschinenbauer mit Informatik-Kenntnissen sehr gesucht, da sie die Arbeitsweise der Konstrukteure verstehen und gleichzeitig ein Gefühl dafür haben, wie diese Arbeitsweisen in Software abzubilden sind.



Für die TU Clausthal ist PDM also in mehrfacher Hinsicht ein interessantes Thema: Es fördert die Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, bietet interessante Forschungsgebiete und gibt Studenten bei entsprechender Qualifikation hervorragende Chancen im Arbeitsmarkt. Daher ist es nur konsequent, PDM Kenntnisse im Rahmen des Studiums zu vermitteln, etwa durch die Vorlesung „Rechnerintegrierte Produktentwicklung“ oder durch ein PDM-Praktikum, beides Veranstaltungen, die am IMW regelmäßig gehalten werden.

3 PDM in der Lehre

Das IMW bietet seit Jahren ein PDM Praktikum auf der Basis von Eigner PLM 5.0 an. Leider haben sich im Laufe der Zeit einige Herausforderungen ergeben, welche zu lösen waren:

- Eigner PLM 5.0 stammt aus dem Jahre 2002 und wurde für Windows 2000 ausgelegt. Die Clients laufen inzwischen auf Windows XP, was zu Inkompatibilitäten führt.
- Der Server läuft immer noch auf Windows 2000. Da im IMW inzwischen auch hier Windows XP der Standard ist, führt dies zu erheblichem administrativen Mehraufwand.
- Für Eigner PLM 5.0 existiert nur eine Schnittstelle zum CAD Programm CATIA. In der Lehre wird aber ProEngineer verwendet, d.h. den Studenten kann die PDM/CAD Kopplung nicht zufriedenstellend gezeigt werden.
- Ein Update auf eine neuere Version ist nicht durchführbar, da die Eigner PLM Produktlinie bereits vor Jahren vom Markt verschwunden ist.

Aus dieser Ausgangssituation ergab sich, dass ein neues Produkt für die nächsten Praktika gesucht werden sollte.

Erste Gespräche mit dem Ifl ergaben, dass dort das Produkt Agile Advantage bereits im Einsatz ist, ein für den Mittelstand konzipiertes PDM-System. Gemeinsame Analysen der Funktionen ergaben folgende Defizite:

- Agile Advantage unterstützt Klassifikation nur mit hohem administrativem Aufwand.
- Variantenmanagement ist praktisch nicht sinnvoll darstellbar.
- Keine Integration mit ProEngineer.



Damit schied Agile Advantage als mögliches PDM-System für das PDM-Praktikum am IMW aus. Doch auch das Ifl war unzufrieden mit Agile Advantage, da es kein Customizing erlaubt, also die Erweiterung der Funktionalität durch Integration selbstgeschriebener Programme.

Weitere Marktrecherchen ergaben, dass auch andere Produkte für den Mittelstand nicht die für Forschung und Lehre benötigten Funktionen liefern. Es blieb also nichts anders als eine echte „Enterprise“ Lösung, die sonst nur bei Großfirmen zum Einsatz kommen.

Der administrative Aufwand solcher Lösungen ist jedoch erheblich höher als bei einem Eigner PLM 5.0 oder Agile Advantage und ist für ein Institut alleine nur schwer zu tragen.

Ein Lösungsansatz war schnell gefunden: Eine Kooperation zwischen dem Ifl und dem IMW. Die wesentlichen Eckpunkte sind:

- Das Ifl stellt die Rechnerplattform und administriert die Lösung.
- Das IMW führt für beide Institute ein Basis PDM-Praktikum mit 2 SWS im Stil des bisherigen PDM-Praktikums des IMW durch.
- Das Ifl führt ein Programmierpraktikum für PDM mit weiteren 2 SWS durch, welches auf dem IMW-Teil aufbaut.



Stand heute, also im November 2007, steht das IMW in intensiven Verhandlungen mit Siemens bezüglich des Einsatzes von TeamCenter 2007. Alle Beteiligten sind zuversichtlich, die Verträge bis zum Ende des Jahres zu unterzeichnen und bereits im März 2008 ein Praktikum auf Basis des neuen PDM-Systems anbieten zu können.

4 Zusammenfassung



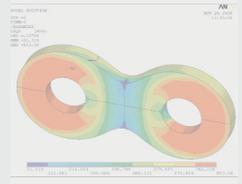
Der Markt für PDM Software wächst seit Jahren kontinuierlich und bietet hervorragende Betätigungsfelder sowohl für die Forschung als auch für Berufsanfänger. Das am Ifl laufende Agile Advantage und das am IMW betriebene Eig-

ner PLM 5.0 genügen nicht den aktuellen Anforderungen und sollen daher durch ein gemeinsames System auf Basis Siemens TeamCenter 2007 ersetzt werden. Die erforderlichen Verträge mit Siemens sollen dieses Jahr unterzeichnet werden um TeamCenter ab 2008 im Lehrbetrieb einsetzen zu können.

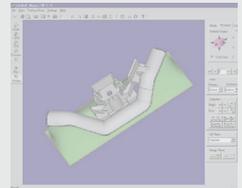
5 Literatur

- /1/ Müller, N.: Rechnerintegrierte Produktentwicklung: Übung „PDM und Workflow in der Produktentwicklung“. Clausthal-Zellerfeld, 2007
- /2/ http://www.inventor-magazin.de/index.php?page=news-show_neu.php3&naechster=11515
- /3/ http://www.unigraphics.de/ueber_uns/presse/coverage/pdf/2005/juli/eDM-rep_2_05_PDM_Marktstudie.pdf

Konstruktion und Berechnung
von Maschinenelementen



Konstruktionsmethodik und
rechnerunterstützte
Produktentwicklung



**Systementwicklung, Versuchstechnik
und Maschinenakustik**



Lehre und Institutsbetrieb



Hochschule und Kontakte



Grundlast aus Windstrom

Dietz, P.; Rolshofen, W.; Schäfer, G.

Die Arbeitsgemeinschaft Windenergie der TU Clausthal hat in Zusammenarbeit mit Wirtschaftsunternehmen ein Konzept entwickelt, um die Netzanbindung bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung der Windkraftanlage zu erleichtern. In diesem Ansatz ist der Verbund unterschiedlicher Energieressourcen, wie Wind, Schwachgas aus der Nordsee und Kavernen als lokale Energiespeicher, vorgesehen.

A work group comprising institutes at the TU Clausthal and industrial companies has developed a concept for avoiding the need to provide for additional capacity onshore by means of other methods. Thus, base load power could be supplied from an offshore wind park in the North Sea to the grid system on the mainland.



1 Einleitung

Erneuerbare Energien sollen längerfristig ohne Subventionen wettbewerbsfähig sein. Unter dieser Annahme der Bundesregierung ist eine Strategie zur Windenergienutzung auf See im Rahmen der Nachhaltigkeitsstrategie aufgestellt worden.

Um mittelfristig bis zum Jahre 2010 eine Leistung von 2000 bis 3000 MW zu erreichen, sind unterschiedliche Voraussetzungen seitens der Investoren von Offshore-Windparks und der Stromwirtschaft erforderlich, wie z.B. ausreichende Seekabel-Kapazitäten und eine Anbindung an das Festlandnetz /1/. Alle Maßnahmen für dieses Ziel müssen umwelt- und natur- sowie volkswirtschaftlich verträglich sein und schrittweise erfolgen. Ein Kernpunkt bei diesem Plan ist die Frage der Netzanbindung.

„Die Erkenntnisse aus dem Teil I der dena-Netzstudie für das Windausbauszenario des Jahres 2020 zeigen, dass mit den von der Projektsteuerungsgruppe gesetzten Annahmen und Rahmenbedingungen eine Systemlösung zur Integration des Windstroms nicht erarbeitet werden konnte“ /2/. Aus diesem Grund hat eine Arbeitsgemein-

schaft bestehend aus Instituten der Technischen Universität Clausthal und Industrieunternehmen ein Konzept entwickelt, um die Netzanbindung bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung der Windkraftanlage durch andere Verfahren zu erleichtern.

In diesem Konzept ist der Verbund unterschiedlicher Energieressourcen wie Wind, Schwachgas aus der Nordsee und Kavernen als lokale Energiespeicher vorgesehen.

2 Neues Konzept zur Netzanbindung

Die Windenergie unterliegt einer witterungsabhängigen Erzeugung, d.h. die Stromerzeugung ist starken tages- und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen, was große Auswirkungen auf den Netzbetrieb hat. Um eine ausgeglichene Leistungsbilanz zu erhalten, sind Regelleistungen für den Ausgleich der Windeinspeisung erforderlich. In **Bild 1** ist für eine Woche beispielhaft der Lastverlauf eines Höchstspannungsnetzes gezeichnet /3/.

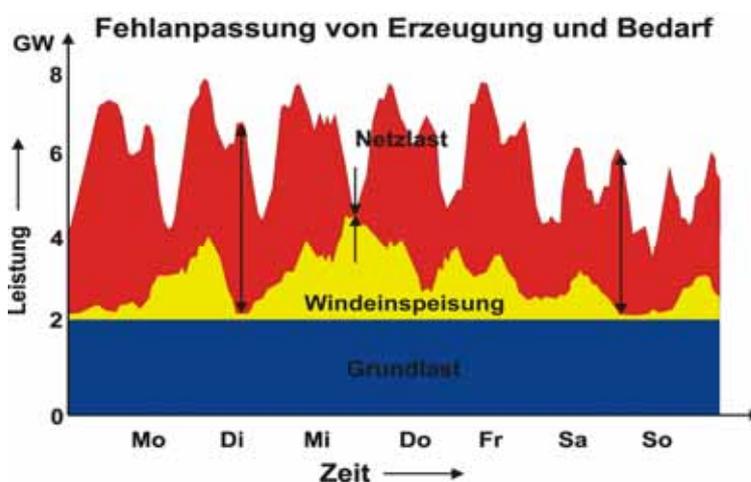


Bild 1: Netzlasterzeugung und eingespeiste Windleistung /3/.

Der Netzbetreiber passt den schwankenden Bedarf durch unterschiedliche Kraftwerksleistung an, was zu enormen Fehlanpassungen führt.

Die Voraussetzungen für Offshore-Windparks sind eine geeignete elektrische Anbindung an das Festlandnetz, um die Vorhaltung zusätzlicher Netzkapazität an Land zu vermeiden. Die Rahmenbedingungen für einen solchen Ausbau müssen umwelt- und volkswirtschaftlich verträglich sein.

Zusammenfassend gilt, dass sich folgende Nachteile (s. **Bild 1**) der Offshore-Windenergie auf einen notwendigen Netzausbau auswirken:

- Windfluktuation im Netz (d.h. Schattenkraftwerke)
- Ungünstige Leitungsausnutzung
- Überlastung des Übertragungsnetzes

Doch durch die Integration unterschiedlicher Ressourcen zur Netzanbindung kann eine gute Ausnutzung der elektrischen Übertragungsleitung gewährleistet werden. Das Clausthale Konzept (s. **Bild 2**) sieht vor, dass die Schwierigkeiten für einen Offshore-Windpark, wie die tages- und jahreszeitlichen Schwankungen der Windenergie und folglich die Vorhaltung der Reserven für den Netzbetrieb hinsichtlich Frequenz- und Spannungshaltung (Vorrangregelung), gelöst werden.

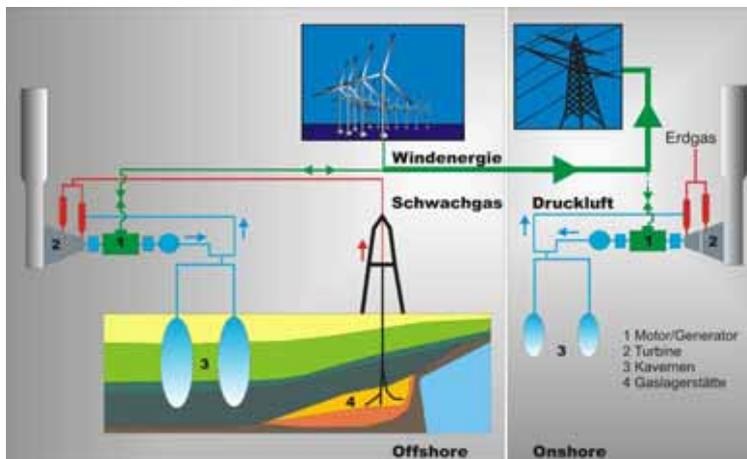


Bild 2: Integration unterschiedlicher Energiequellen zur Grundlastversorgung auf dem Festland durch ein Offshore-Verbundkraftwerk auf Basis erneuerbarer Energien.

Das bedeutet, dass die fluktuierende Windenergie-Produktion gleichmäßiger nutzbar werden soll, durch

- Absorption von Überschuss-Leistung in Zeiten starken Windaufkommens bei gleichzeitig geringer Last durch Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke und die zeitversetzte Erzeugung bei hoher Nachfrage und/oder
- Beistellung einer windunabhängigen Energiequelle durch Verstromung von Erdgas, um bei fehlendem Wind weiterhin Energie erzeugen zu können.

Aufgrund des hohen Stickstoffgehaltes sind die Schwachgasvorkommen der Nordsee unwirtschaftlich für einen Betrieb von Onshore-Gaskraftwerken, doch könnten diese vor Ort verwendet werden um eine Gasturbine zu betreiben. Bei nicht ausreichender Stromerzeugung aus Windenergie könnte so ein Ausgleich durch ein Gasturbinen-Kraftwerk erfolgen. Außerdem würde eine mit Druckluft und/oder dem heißen Abgas (Stickstoff und CO_2) betriebene Kaverne die Ausnutzung von Offshore-Windenergie optimieren.

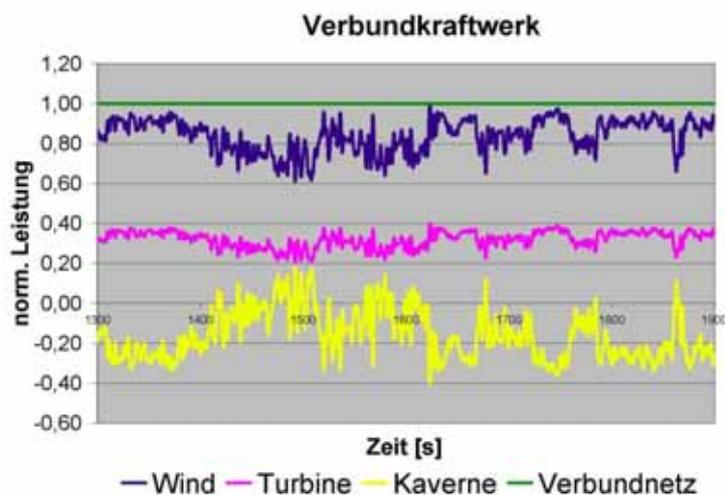


Bild 3: Normierte Leistung eines Offshore-Verbundkraftwerkes über die Zeit dargestellt. Trotz Fluktuation der Windenergie kann eine konstante Leistung in das Verbundnetz abgegeben werden, die sich als Summe aus den einzelnen Komponenten ergibt.

Mit einem integrierten Einsatz von Windkraft, Kavernenbau, Gaslagerstätten, Schmutzgasverstromung und Gaskraftwerk kann eine regenerative Energieerzeugung Offshore erfolgen, so dass das Verbundnetz mit Grundlast von der Nordsee versorgt wird (s. **Bild 3**).

Somit wäre durch den Verbund von Windkraft, Kavernen und Schwachgaslagerstätten eine Grundlast aus Windstrom möglich.

3 Verbundkraftwerk

Ein solches Offshore-Verbundkraftwerk ist mit seinen Komponenten in dem **Bild 4** als Schaltschema zu erkennen.

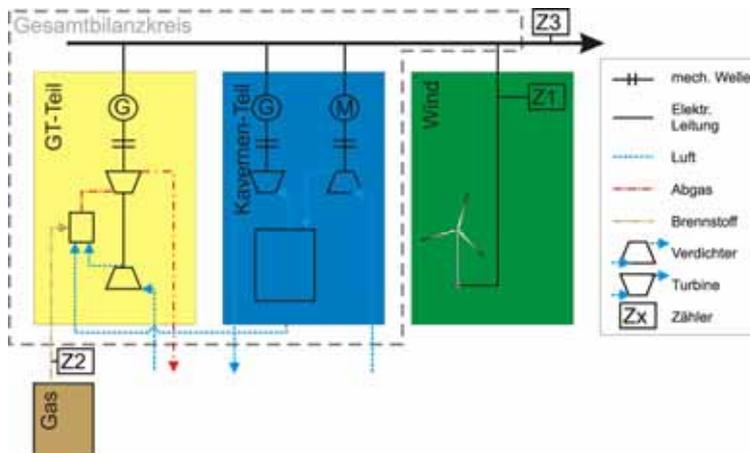


Bild 4: Schaltschema des Offshore-Verbundkraftwerks.

Der Verbund führt zur Vergleichmäßigung der Energieverfügbarkeit und Steigerung des Stromertrages aus Windenergie bei gleichzeitiger Senkung der Kosten für den Energietransport und der Gewährleistung der Netzstabilität.

4 Partner des Konzeptes

Die Arbeitsgruppe Windenergie der TU Clausthal besteht aus den folgenden Instituten, die unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Peter Dietz im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit eine technische und wirtschaftliche Projektstudie durchführen.

- Institut für Aufbereitung und Deponietechnik (IFA)
- Institut für Erdöl- Erdgastechnik (ITE)
- Institut für Energieverfahrens- und Brennstofftechnik (IEVB)
- Institut für Elektrische Energietechnik (IEE)

- Institut für Wirtschaftswissenschaft (WiWi)
- Institut für Maschinenwesen (IMW)

Unterstützt wird das Konzept durch Herrn Prof. Haubrich, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW), RWTH Aachen durch Nutzung des Kraftwerks- und Übertragungsnetz-Simulators, sowie das Ingenieurbüro DEEP Underground Engineering GmbH, Bad Zwischenahn bzw. KBB Underground Technologies GmbH, Hannover und durch apl. Prof. Dr.-Ing. K. Runge, OECOS GmbH.

5 Zusammenfassung

Die Arbeitsgemeinschaft Windenergie der Technischen Universität Clausthal hat in Zusammenarbeit mit Wirtschaftsunternehmen ein Konzept entwickelt, das Grundlast aus Windstrom ermöglicht, indem unterschiedliche Ressourcen, wie Schwachgas aus der Nordsee und Kavernen als lokale Energiespeicher, vorgesehen sind.

Dies führt durch gleichmäßige Energieverfügbarkeit zu einer Steigerung des Stromertrages aus Windenergie bei gleichzeitiger Senkung der Kosten und Gewährleistung eines umwelt- und naturverträglichen Ausbaus.

(Weitere Informationen: <http://www.windenergie.tu-clausthal.de/>.)

6 Literatur

- /1/ Strategie der Bundesregierung zur Windenergienutzung auf See- im Rahmen der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung, Januar 2002.
- /2/ Deutsche Energie-Agentur: Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahre 2020 (dena-Netzstudie), Berlin, Februar 2005.
- /3/ Crotagino, F., Leonhard, W.: Druckluftspeicher-Gasturbinen Kraftwerke zum Ausgleich fluktuierender Windenergie-Produktion, 2003.

Universelle Schneidengeometrien zur Hausmüllzerkleinerung

Seitz, T.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Entwicklung einer transportablen und kompakten Schneidmühleneinheit zur Zerkleinerung von Hausmüll“ wurden verschiedene Schneidengeometrien und Schnittparameter, die bei der Zerkleinerung von Hausmüll zum Einsatz kommen sollen, auf ihre Eignung zum universellen Einsatz überprüft.



Within the research-project „Development of a portable and compact cutting-mill for conditioning of domestic waste“ several geometries of cutting edges and cutting parameters were verified for its general use in cutting domestic waste.

1 Einleitung

Hausmüll lässt sich, wie in **Bild 1** dargestellt, als ein höchst heterogenes Gemisch verschiedenster Wertstoffe, mit unterschiedlichsten Eigenschaften (spröde, zäh, hart, weich,...) beschreiben, die einzeln betrachtet, entsprechend spezialisierte Schneiden- und Schnittparameter erfordern. Die angestrebte gemeinsame Zerkleinerung soll nicht nur eine Volumenkomprimierung und bessere Förderfähigkeit des entstehenden Granulates, sondern auch eine wirkungsvollere automatische Separation der einzelnen enthaltenden Wertstoffe für eine Weiterverwendung als Rohstoff bzw. Energiequelle ermöglichen. Dies kann die heutzutage praktizierte, häufig unzureichende Trennung der Wertstoffe im Haushalt ersetzen und gleichzeitig die Qualität der einzelnen Stoffgruppen erhöhen.

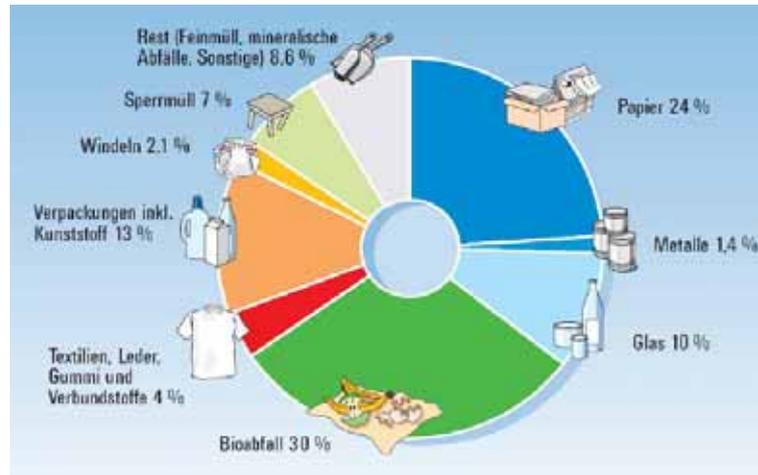


Bild 1: Zusammensetzung von Hausmüll /1/

2 Versuchsstand

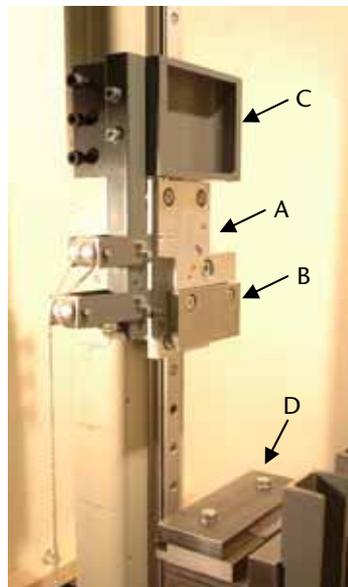


Bild 2: Fallschlagwerk

Zur Durchführung der Versuche wurde ein Versuchsstand konstruiert und gefertigt. Dieser Versuchsstand (**Bild 2**) wurde als Fallschlagwerk konzipiert und besteht aus den Fallschlitten (A) mit daran befestigter, auswechsel- und winkelverstellbarer Schneide (B), der durch eine Linearführung senkrecht hinabfallen kann. Zur kontrollierten Auslösung dient die höhenverstellbare Haltevorrichtung (C). Die Probe wird im Probenhalter (D) eingespannt, der zur Einstellung des Schneidspaltes horizontal verschiebbar ist.

Da bei einem Probenwechsel die übrigen Versuchsgrößen nicht verändert werden, können somit verschiedene Versuchsproben unter gleichbleibenden Bedingungen untersucht werden. Das Fallschlagwerk besitzt in der momen-

tanen Konfiguration folgende technische Daten:

- Fallhöhe 2400 mm
- Gewicht Schlitten 1,45 kg
- Messerabstand 0-5mm
- Wechseltmesser
Momentan 85° und 15°, 57 HRC
- Schnittwinkel 0°- 45°
- Schnittgeschwindigkeit 0-7 m/s
- Schnittenergie 0-35 J

3 Probenauswahl und Versuchsdurchführung

3.1 Probenauswahl

In Anlehnung an die Zusammensetzung von Hausmüll in /1/ sind aus handelsüblichen, repräsentativen Materialien Proben hergestellt worden, die dann für Einzelversuche zur Verfügung standen. Dabei ist die Betrachtung feuchter Materialien nicht sinnvoll. Diese stellen weniger eine Anforderung an die Schnittparameter, als dass sie durch ihre veränderten Verklumpungseigenschaften bei der später zu betrachtenden Komprimierungs- und Fördertechnik zu berücksichtigen sind. Ziel der durchgeführten Versuche war es, einen definierten Einzelschnitt zu untersuchen. Die Proben hatten dabei die Abmaße 60mm x15mm und wurden einlagig betrachtet (**Bild 3**). Überprüft wurden folgende Materialien:

- Papier 80g/m², Wellpappe
- Weissblech 0,2 mm,
Stahlblech 0,5 mm
- Spülschwamm
- Nylontuch
- Gummi(-handschuh)
- Aluminiumfolie/-schale
- PE-Folie
- Zellstoff (Küchenpapier)
- PP (Getränkebecher)
- Glas 5 mm
- Styropor (Schale)

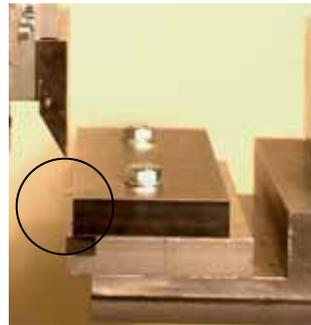


Bild 3: Einspannung der Probe

3.2 Versuchsdurchführung

Grundlage für die Versuchsdurchführung bildeten Parameter, die bereits ähnlich durch Powitz /2/ verwendet wurden.

Dies sind im Einzelnen:

- Messerabstand 0,2 mm und 0,4 mm
- Klinge 85° und 15°
- Schnittwinkel 0°, 10°, 20°, 30°

Die Fallhöhe wurde dabei schrittweise von 100 mm steigend um jeweils 100 mm erhöht und der Schnitt qualitativ bewertet (erfolgreich/nicht erfolgreich). Die jeweils notwendige niedrigste Fallhöhe für einen erfolgreichen Schnitt wurde dokumentiert und später ausgewertet.

4 Auswertung und Ergebnisse

Die qualitative Bewertung des Schnittergebnisses ermöglicht eine Aussage, bei welcher (Mindest-)Schnittgeschwindigkeit ein einwandfreies Schnittresultat zu erwarten ist. Dabei zeigten sich typische negative Ereignisse, die kein zufriedenstellendes Ergebnis zur Folge hatten.

Dies sind im Einzelnen:

- Umklappen der Probe durch das Messer bei dünnen Materialien sowie geringen Fallhöhen, großem Schneidspalt und kleinen Schnittwinkeln
- Steckenbleiben des Messers bei dicken Proben mit hoher Festigkeit, geringen Fallhöhen und kleinen Schnittwinkeln
- Ausfransen der Schnittfläche, bzw. Längsspaltung der Probe bei hohen Schnittwinkeln und geringen Fallhöhen

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse ist es notwendig, die ermittelten Mindestfallhöhen in Schnittgeschwindigkeiten umzurechnen. Durch den lotrechten Fall des Schlittens und der unbelasteten, spielfreien Linearführung werden hierbei Reibungsverluste vorerst vernachlässigt. Der Prüfstand ermöglicht es aber auch eine Geschwindigkeitsdifferenzmessung nachzurüsten. Die so ermittelten Geschwindigkeiten lassen dann für jedes Parameterfeld eine Aussage zu, welche Mindestgeschwindigkeit zu wählen ist, um eine möglichst große Variation von Materialien zufriedenstellend zu zertrennen. Es hat sich herausgestellt, dass positive Ergebnisse bei weiterer Steigerung der Geschwindigkeit nicht zu negativen Erscheinungen neigen.

Weiterhin gab es Materialien, die bei den vorgegebenen Einstellungen auch bei höchsten Geschwindigkeiten kein positives Resultat zeigten. Hier ist anzunehmen, dass auch eine weitere Geschwindigkeitssteigerung über die Fähigkeiten des Fallschlagwerkes hinaus keine Veränderung bringen wird.

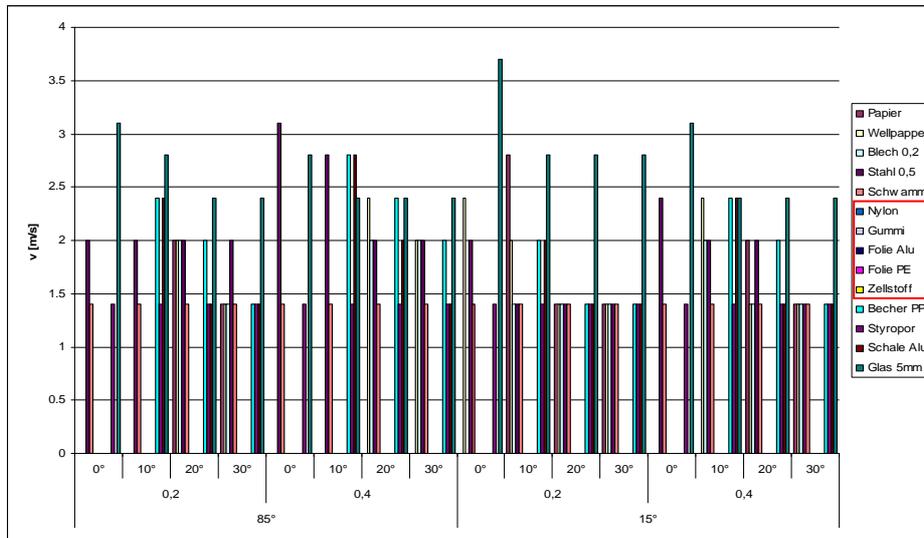


Bild 4: Auswertung der Versuchergebnisse

Wie in Bild 4 erkennbar ist, ergeben sich die jeweils besten Resultate bei geringen Schneidspalten und hohen Schnittwinkeln (0,2 mm Spalt, 30°). Der Anschlag der Klinge, 85° oder 15°, hat einen bemerkenswert geringen Einfluss auf die Resultate. Welchem Winkel hier der Vorzug gegeben wird, hängt hauptsächlich von dem zu erwartenden Vorkommen sehr fester Materialien (Stahl, Glas, etc.) ab. Hier werden stark angeschliffene Klingen (15°) über die Betriebsdauer zu einem höheren Verschleiß neigen. Während der Versuche war allerdings an sämtlichen Klingen kein nennenswerter Verschleiß festzustellen.

Die in **Bild 4** separat markierten Materialien ließen sich bei den gewählten Einstellungen nicht zerschneiden. Hier wurde versucht, die Materialien zu schichten, bzw. den Schneidspalt zu verkleinern. So konnten durchaus noch akzeptable Ergebnisse erreicht werden. Allerdings zeigten besonders die sehr zähen Materialien (PE-Folie, Gummi) die Tendenz, sich stark in die Länge zu zerren. Weiterhin bleibt zu diskutieren, in wie fern die gewählten Parameter für den späteren Einsatz in einer Schneidmühle noch praxisgerecht sind. Eine höhere La-

genanzahl würde hier durchaus noch der Packung der einzelnen Materialien in einem heterogenen Gemisch entsprechen. Allerdings wird eine Verkleinerung des Schneidspaltes auf einen gleitenden Schnitt (Berührung von Schneide und Gegenschneide) nicht realisierbar sein. Dem erwähnten Zerren der sehr zähen Materialien wird sich mit den Einsatz gezahnter statt glatt geschliffener Messer begegnen lassen. Erfreulich ist die Tatsache, dass nur recht geringe Schnittgeschwindigkeiten notwendig sind. Dies wird die spätere Geräuschemissionen einer Schneidmühle wesentlich begrenzen und geringere Schall-dämmmaßnahmen notwendig machen als bei höheren Schnittgeschwindigkeiten.

5 Zusammenfassung

Das am IMW entwickelte Fallschlagwerk ermöglicht eine Untersuchung von standardisierten Proben unter gleichbleibenden Randbedingungen. Eine Aufrüstung mit für weiterführende Experimente notwendiger Mess- und Analysetechnik ist problemlos möglich. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zeigen, dass bei dem Großteil der Materialien ein zufriedenstellendes Schnittergebnis bei relativ geringen Schnittgeschwindigkeiten erreichbar ist. Die problematischen Materialien erfordern eine genauere Optimierung der Messergeometrie (Zahnung) die bei der Weiterentwicklung zur Schneidmühle berücksichtigt und überprüft werden muss.

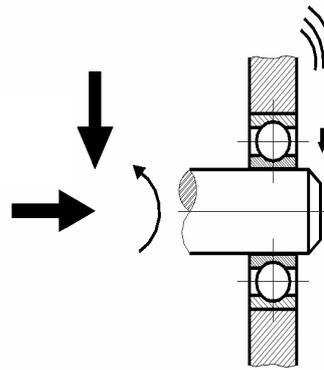
6 Literatur

- /1/ http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/entsorgung_von_siedlungs_und_gewerbeabfaellen/doc/37704.php
- /2/ Powitz, H.: Untersuchung der Zerkleinerung von Kunststoffen mit einem Pendelschlagwerk. TU Clausthal, 2004

Modellierung und Messung des Übertragungsverhaltens von Wälzlagern

Kruk, R.; Thoden, D.

Die Ermittlung des Körperschallübertragungsverhaltens von Lagerungen spielt für die akustische Simulation von Maschinen und Anlagen eine entscheidende Rolle. Um die dafür nötigen Kenndaten zu ermitteln, ist es nötig, passende theoretische Modelle zu entwickeln und anhand von Versuchen zu verifizieren. Dazu ist ein Prüfstand erstellt worden, mit dem sich bei unterschiedlichsten Betriebs- und Umgebungsparametern das Körperschallübertragungsverhalten messen lässt.



The knowledge of the performance of structure-borne noise of bearings is essential for the acoustical simulation of machinery and equipment. In order to get the needed characteristics suitable theoretical models have to be developed and verified by experimental tests. Therefore a test site was designed and built up to measure the acoustical performance under different operating parameters.

1 Einleitung

Heutzutage werden hohe Anforderungen an rotierende Teile von Maschinen gestellt. Besonders wichtig sind die dynamischen Eigenschaften der Teile, die Einfluss auf das Arbeitsgeräusch, die Lebensdauer und dynamischen Kräfte haben. Bei Lagern ist auch die Betriebszustandsüberwachung wichtig, weil damit rechtzeitig Informationen zu Austausch und Wartung der Maschine gewonnen werden können.

Dieser Artikel soll eine Methode darstellen, um theoretische Modelle zu verifizieren und in Zukunft weiter zu entwickeln, damit es möglich wird, spezielles Konstruktionswissen zur Maschinenakustik in den früheren Phasen des Produktentstehungsprozesses einzusetzen. Dies gilt für Maschinenelemente wie z.B. Getriebe und rotierende Wellen, die durch wechselnde Anregungen dynamische Kräfte erzeugen, die meistens unerwünschte Auswirkungen auf den Betrieb haben und die Lebensdauern verringern können.

2 Theoretische Arbeiten an Modellen von Wälzlagern

Die mathematische Beschreibung der in Maschinen auftretenden physikalischen Ereignisse ist bei der Entwicklung und Konstruktion sehr nützlich. Solche theoretischen Modelle liefern wichtige Informationen für den Konstrukteur noch vor der Fertigung eines Prototyps, sie beschleunigen die Entwicklungszeit und bringen eine erhebliche Kostenersparnis für den gesamten Konstruktionsprozess. Solche Modelle sind in vielen Bereichen der Technik im Einsatz, so auch in der Maschinenakustik. Mit ihnen wird es möglich mit einer gewissen Genauigkeit Eigengeräusche (Sound Engineering) oder Eigenfrequenzen bereits in der Entwicklung zu bestimmen. Diese Modellierungsansätze gelten auch für Lager. Am IMW wurden bereits einige Arbeiten durchgeführt, in denen solche Modelle verwendet wurden.

Eines dieser Modelle ist das von Richter /4/, es wurde in der Programmierumgebung MATLAB umgesetzt.

In dem Modell werden folgende Betriebsparameter für Bestimmung der Hertz'schen Pressung im Wälzlager benutzt: statische Belastung (axial, radial), Drehzahl (Kreiselmoment, Fliehkraft) und geometrische Abmaße. Darüber hinaus werden die Schmierbedingungen (Art des Öls) und die Betriebstemperatur betrachtet.

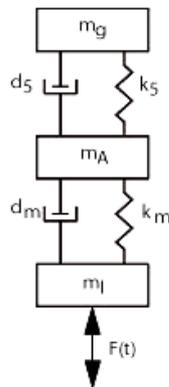


Bild 1: Lagermodell mit drei Freiheitsgraden /4/

Das Ergebnis der Simulation sind Steifigkeiten und Dämpfungen. Die Steifigkeiten werden für den Kontakt zwischen Wälzelement und Innen- oder Außenring des Lagers für alle Wälzkörper bestimmt. Zur Bestimmung der Dämpfungen werden Schmiereinflüsse berücksichtigt, die Werkstoffdämpfung wird als deutlich kleiner angenommen und deswegen vernachlässigt.

Diese berechneten Werte lassen sich dann zur Berechnung in einem Lagermodell einsetzen, wie es in **Bild 1** zu sehen ist.

Das System mit drei Freiheitsgraden besteht aus den drei Massen (m_G – Gehäusemasse, m_A – Außenringmasse, m_I – Innenringmasse), die mit Feder- und Dämpferelementen verbunden sind. Die Dämpfung d_5 und Steifigkeit k_5 wurden empirisch ermittelt (siehe /4/). Die Faktoren d_m und k_m werden simuliert und iterativ im Modell berechnet.

Die Steifigkeit k_m stellt eine vereinfachte gesamte Lagersteifigkeit dar und wird aus der Lagersteifigkeit k_g und der vereinfachten Schmierfilmsteifigkeit k_{pl} zwischen den beiden Laufbahnen unter Vernachlässigung der Wälzkörpermasse berechnet. Die Schmierfilmsteifigkeiten k_{pl} beider Laufbahnen werden in dem Fall als Parallelschaltung betrachtet. Die Zusammenstellung der Steifigkeit lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$k_m = \frac{1}{\frac{1}{k_{pl,i}} + \frac{1}{k_{pl,o}}} + k_g$$

Hier ist k_g ein Verhältnis von statischer Last F_r und Verschiebung y_r (beide in radiale Richtung):

$$k_g = \frac{F_r}{y_r}$$

Die Schmierfilmsteifigkeiten zwischen innerer ($k_{pl,i}$) und äußerer ($k_{pl,o}$) Laufbahn und Wälzelement werden nach folgender Formel bestimmt /4/:

$$k_{pl} = E_{öl} \frac{l}{h} \left(2b - \sqrt{\frac{2}{\gamma_3}} \cdot \gamma_4 \right)$$

Bei der Berechnung der Dämpfung d_m wird die Schmierfilmdämpfung auf den beiden Laufbahnen unter Vernachlässigung der Werkstoffdämpfung des Wälzlagermaterials berücksichtigt. Analog zur Steifigkeit wird hier folgendes Modell angewendet:

$$d_m = \frac{1}{\frac{1}{d_{pl,i}} + \frac{1}{d_{pl,o}}}$$

Die Schmierfilmdämpfung für die innere $d_{pl,i}$ und äußere $d_{pl,o}$ Laufbahn wird wie folgt berechnet:

$$d_{pl} = E_{öl} \frac{l}{h} \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2}{\gamma_3}} \cdot \gamma_5$$

Dabei gelten für die γ_3 , γ_4 , γ_5 und b

$$\gamma_3 = 12 \frac{\eta \omega}{h^2 E_{\text{Öl}}}$$

$$\gamma_4 = \frac{\tanh\left(\frac{2b}{2} \sqrt{\frac{\gamma_3}{2}}\right) \cos^{-2}\left(\frac{2b}{2} \sqrt{\frac{\gamma_3}{2}}\right) + \tan\left(\frac{2b}{2} \sqrt{\frac{\gamma_3}{2}}\right) \cosh^{-2}\left(\frac{2b}{2} \sqrt{\frac{\gamma_3}{2}}\right)}{1 + \tanh^2\left(\frac{2b}{2} \sqrt{\frac{\gamma_3}{2}}\right) \tan^2\left(\frac{2b}{2} \sqrt{\frac{\gamma_3}{2}}\right)}$$

$$\gamma_5 = \frac{\tanh\left(\frac{2b}{2} \sqrt{\frac{\gamma_3}{2}}\right) \cos^{-2}\left(\frac{2b}{2} \sqrt{\frac{\gamma_3}{2}}\right) - \tan\left(\frac{2b}{2} \sqrt{\frac{\gamma_3}{2}}\right) \cosh^{-2}\left(\frac{2b}{2} \sqrt{\frac{\gamma_3}{2}}\right)}{1 + \tanh^2\left(\frac{2b}{2} \sqrt{\frac{\gamma_3}{2}}\right) \tan^2\left(\frac{2b}{2} \sqrt{\frac{\gamma_3}{2}}\right)}$$

$$b = \sqrt{\frac{8F_k(1-\mu^2)}{\pi \sum \rho E}}$$

Die Größen l und b beschreiben hierbei die Schmierspaltfläche und h die Spaltdicke (**Bild 2**).

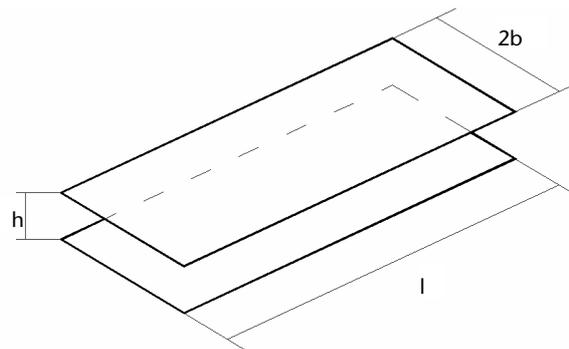


Bild 2 :Das Plattenmodell eines Schmierspaltens /4/

Die Größe F_K ist die Kraft im Hertz'schen Kontakt, die in dem Modell iterativ berechnet wird. $\sum \rho$ stellt die Krümmungssumme der kontaktierenden Flächen aus der Hertz'schen Theorie dar.

Als weitere Werte für die Dämpfungsberechnung wird die Kreisfrequenz ω der rotierenden Welle, die dynamische Viskosität η des

Schmiermittels in $\left[\frac{Ns}{m^2}\right]$ und dessen Elastizitätsmodul $E_{öl}$ benötigt.

E und μ bezeichnen E-Modul und Querkontraktionszahl der Wälzkörper- und Lagerringmaterialien.

Mit diesem Modell wurde nach der Implementierung in MATLAB ein Rillenkugellager mit 60 mm Wellendurchmesser berechnet. Die ermittelten Steifigkeiten und Dämpfungen sind in **Bild 3** und **Bild 4** zu sehen.

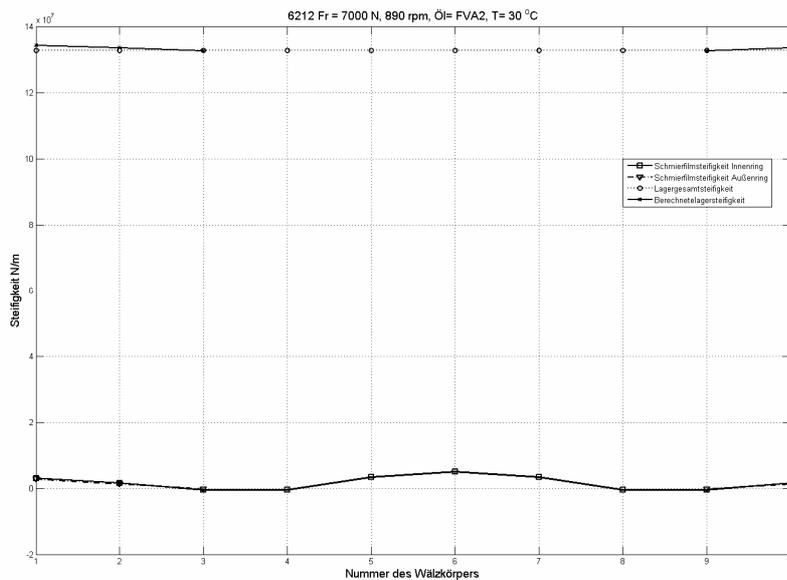


Bild 3: Berechnete Steifigkeiten: $k_{pl,i}$, $k_{pl,o}$, k_g , k_m

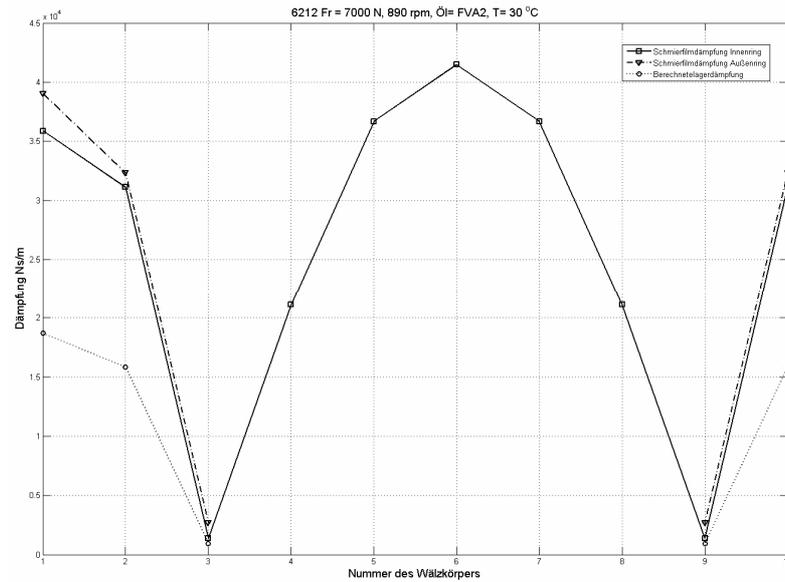


Bild 4: Berechnete Dämpfungen: $d_{pl,ir}$, $d_{pl,or}$, d_m

Die dargestellten Ergebnisse sind hier als theoretische Einleitung zu den experimentellen Arbeiten dargestellt. Sie werden später mit gemessenen Werten verglichen und verifiziert. Das Ziel der gesamten Arbeit ist es, den Stand des theoretischen Wissens so nah wie möglich an die Realität zu bringen. Zu diesem Zweck werden praktische Versuche zum Lagergeräusch auf einem Prüfstand durchgeführt, der im nächsten Kapitel vorgestellt wird.

3 Aufbau des Prüfstandes und Messmethode

Der für die Messungen eingesetzte Lagerprüfstand besteht aus zwei Hauptbaugruppen, dem Antrieb und der gleitgelagerten Hauptwelle. Sie sind durch eine Membrankupplung verbunden, damit beide Seiten biegeweich entkoppelt sind und die Körperschallübergang vom Antrieb zum Versuchsobjekt am anderen Ende der Hauptwelle unterbunden wird. Der Prüfstand ist in **Bild 5** mit den beiden großen Gleitlagergehäusen zu sehen.



Bild 5: Gesamtansicht des Lagerprüfstands

Die Anlage ist im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten am IMW entworfen und gebaut worden. Mit diesem Prüfstand lassen sich unterschiedliche Betriebsparameter für Lager wie Drehzahl und Last in radialer und axialer Richtung genau einstellen. Durch den Einsatz eines Frequenzrichter gespeisten Elektromotors mit 75 kW und Planetengetriebe gibt es die Möglichkeit zur stufenlosen Drehzahleinstellung bis zu 5000 U/min. Diese Grenze ergibt sich aus der Antennengeometrie der verwendeten Telemetrie, die bei der Messdatenerfassung eingesetzt wird. Die aktuellen Lastrichtungen hängen von der

Art des Versuchslagers ab, grundsätzlich ist der Lagerprüfstand so konzipiert und ausgelegt, dass Lasten radial in der Größe bis 80 kN und axial bis 20 kN auch kombiniert aufgebracht werden können. Die Radiallast besteht aus einem statischen Anteil in der genannten Höhe und einem überlagerten dynamischen Anteil bis 1 kN, der von einem elektromagnetischen Schwingerreger (Shaker) aufgebracht wird. Dieser kann in einem Frequenzbereich bis 9 kHz betrieben werden. Neben den Lasten lassen sich die Schmierbedingungen in Form von Lagerbetriebstemperatur und Öldurchflussmenge einstellen.

Um akustische Eigenschaften von Lagern zu messen, wird das Objekt in eine Platte eingepresst, die als Gehäuse betrachtet wird. Mit unterschiedlichen Ausführungen dieser Lagerplatte kann so der Einfluss von Passung und Umgebungssteifigkeit untersucht werden. Die Anregung durch den Shaker breitet sich als Körperschall in der Platte aus und erreicht die dort angebrachten Sensoren. Die Sensoren befinden sich über dem Lagersitz in zwei Richtungen (parallel und senkrecht zur Anregungsrichtung) auf beiden Seiten der Platte. Der Körperschall wird durch das Lager (Außenring, Wälzelement, Innenring) zur Welle und den darauf aufgeklebten Sensoren geleitet. Das Messsignal der Welle wird zum Rekorder telemetrisch übertragen. Es werden zwei Arten von Sensoren verwendet. Die relative Dehnung wird mit piezokeramischen Dehnungssensoren aufgenommen. Die Beschleunigung wird mit ICP-Aufnehmern erfasst. Beide Sensorarten liefern bis in den unteren Ultraschallbereich lineare Messsignale.

Plattenseitig sind jeweils ein Beschleunigungs- und Dehnungssensor paarweise angebracht, wohingegen auf der Welle die Beschleunigungen stirnseitig und die Dehnungen in eingefrästen Taschen hinter dem Lagersitz gemessen werden (**Bild 6**). Das Übertragungsverhalten von Platte und Welle wird durch gesonderte Messungen ermittelt und aus dem späteren Ergebnis herausgerechnet.

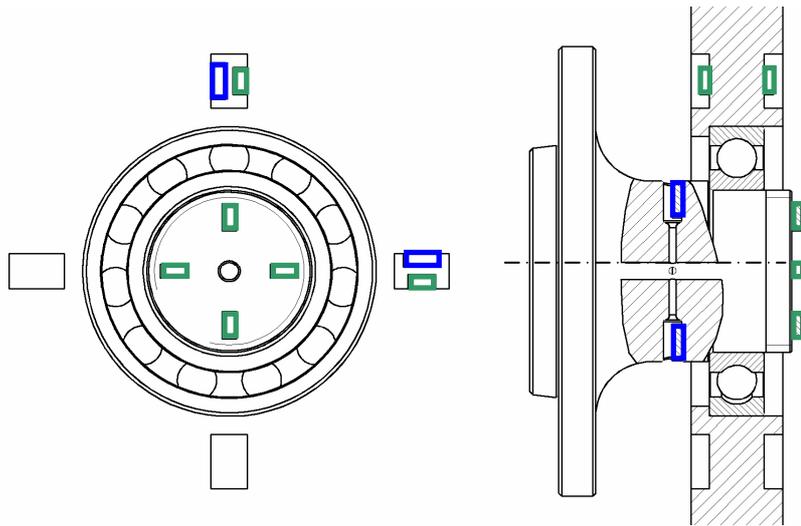


Bild 6: Positionierung von Sensoren in dem Lagerprüfstand für Erfassung von akustischen Lagereigenschaften (— Dehnungssensoren, — Beschleunigungssensoren)

Während einer Messung werden die Betriebsparameter (Drehzahl, Last) und die Messsignale aus 8 Dehnungssensoren und 8 Beschleunigungsaufnehmern digital aufgezeichnet. Der eingesetzte Rekorder ermöglicht Aufnahme in einem Echtzeitbetrieb von insgesamt 32 Kanälen mit einer Samplerate bis 102 kHz. Zusätzlich wird bei dem Versuch die Verkippung der Platte mittels Messuhren kontrolliert und protokolliert. Diese Verkippung kann dabei als zusätzlicher Messparameter verwendet werden.

In der derzeitigen Konfiguration können zwei Größen an Wälzlagern und eine Gleitlagergröße gemessen werden. Durch den modularen Aufbau ist es aber jederzeit möglich, den Prüfstand auf andere Lagergeometrien umzurüsten, hierbei muss nur darauf geachtet werden, dass die Sensoren noch angebracht werden können.

4 Zusammenfassung

Die laufenden Versuche in IMW werden für die Bestimmung der akustischen Eigenschaften von Wälz- und Gleitlagern durchgeführt. Die im **Kapitel 3** erwähnte Konzeption des Prüfstandes ermöglicht einen re-

lativ einfachen und kostengünstigen Umbau zwischen verschiedenen Lagertypen.

Der Lagerprüfstand erlaubt durch die Möglichkeit der einfachen Parametereinstellung nicht nur die Anwendung im Lagerakustikbereich sondern auch bei der Untersuchung von Lebensdauern oder Betriebszustanddiagnosen.

Es ist möglich das System weiter sowohl für neue Arten von Messobjekten als auch mit zusätzlichen Sensoren auszurüsten.

5 Literatur

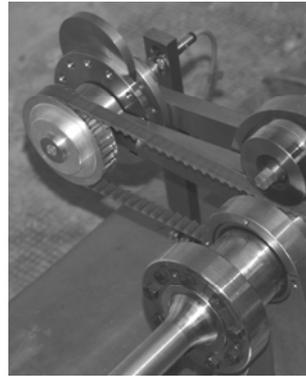
- /1/ Seidel, E.: Wirksamkeit von Konstruktion zur Schwingungs- und Körperschalldämmung in Maschinen und Geräten
- /2/ Kollmann, F. G.; Schösser T. F.; Angert R.: Praktische Maschinenakustik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- /3/ Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall. Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
- /4/ Richter, H. P.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Körperschalleitung von Wälzlagern in Maschinen. Darmstadt 1989

Erweiterte Prüfstandskapazitäten im IMW

Korte, T.; Lau, P.; Schäfer, G.; Schwarzer, T.

Die Ausstattung des Institutes für Maschinenwesen ist in diesem Jahr erneut erweitert worden. Es sind vier neue Prüfstände zur Untersuchung dynamischer Lasten in Betrieb genommen worden.

The Institute of Mechanical Engineering has already several different test rigs at its disposal which allow the analysis of components under dynamical loads. Within this year this stock grew by four new test rigs.

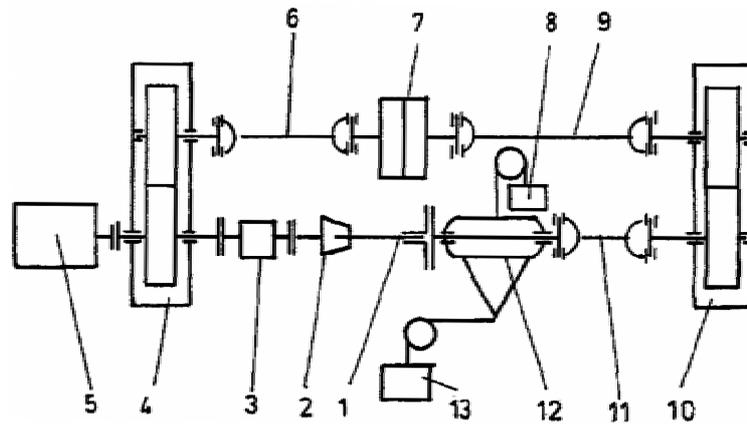


1 Verspannprüfstand mit Umlaufbiegeeinrichtung

Neben den bewährten Verspannprüfständen des IMW wurde ein weiterer Prüfstand nach dem Verspannprinzip in Betrieb genommen, der bei statischer Torsionsbelastung die Aufbringung einer konstanten Umlaufbiegebelastung ermöglicht. Dieser Prüfstand wurde von der Technischen Hochschule Darmstadt aus der ehemaligen Professur Raab übernommen.

1.1 Prinzip

Grundsätzlich besteht der Prüfstand aus einem mit zwei Stirnradgetriebenen geschlossenen mechanischen Verspannstrang zur Aufbringung der statischen Torsion (**Bild 1**). Der Nutzen dieses im IMW in verschiedenen Prüfständen realisierten Konzeptes besteht darin, dass der Antriebsmotor nur noch die Leistung aufbringen muss, die als Verlustleistung zum Erreichen und Aufrechterhalten der Rotation notwendig ist. Dadurch kann die Leistungsaufnahme gegenüber der Leistung im Prüfstrang auf einen Bruchteil gesenkt werden.



- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1 Prüfteil | 2 Spanneinrichtung (Festlager) |
| 3 Torsions- und Drehzahlmesswelle | 4 Stirnradgetriebe |
| 5 Antriebsmotor | 6 Gelenkwelle |
| 7 Verspanneinrichtung | 8 Ausgleichsgewicht |
| 9 Gelenkwelle | 10 Stirnradgetriebe |
| 11 Gelenkwelle | 12 Biegemomenteinleitung (Loslager) |
| 13 Gewicht zur Erzeugung der Biegebelastung | |

Bild 1: Prinzip des Verspannprüfstandes mit Biegeeinrichtung /1/

Die Biegebelastung in der Prüfverbindung wird, ähnlich der Aufbringung in Biegeprüfmaschinen, querkräftfrei aufgebracht. Dabei hängt das Loslager (12) gewichtskompensiert durch ein Gegengewicht (8) im Prüfstrang. Das Prüfteil wird zwischen Festlager (2) und Loslager eingespannt. Das Loslager kann um seinen Schwerpunkt durch einen Hebel mit Umlenkmechanismus verkippt werden, was in dem Prüfteil eine konstante Biegebelastung erzeugt. Die Gelenkwelle (11) kompensiert dabei die Verkipfung und die axiale Bewegung des Loslagers. Das eingeleitete Biegemoment kann über Hebelgesetze oder über eine Referenzmessung mit Dehnungsmessstreifen berechnet werden. Das statische Drehmoment und die Drehzahl des Prüfstrangs werden kontinuierlich durch eine Drehmomentmesswelle (3) ermittelt.

Bild 2 zeigt die Biegemomenteinleitung bei eingebautem Prüfteil. Zu sehen ist die aufgehängte Loslagerung zur Einbringung der Biegebelastung. Daran unten angebracht ist der Hebel zum Verkippen der Lagerung.

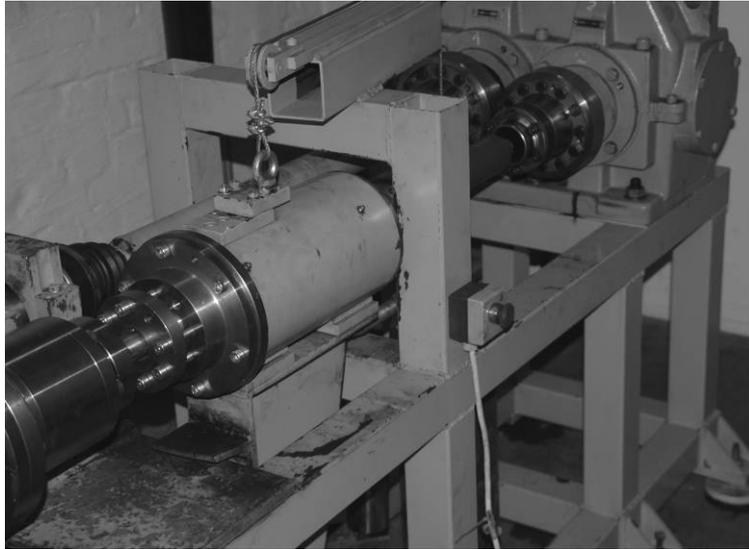


Bild 2: Loslagerung zur Einbringung der konstanten Biegebelastung

1.2 Leistung

Der Prüfstand verfügt zurzeit über folgende Leistungsmerkmale:

- statisches Drehmoment im Prüfstrang: 500 Nm
- maximales umlaufendes Biegemoment: 1.500 Nm
- maximale Drehzahl des Prüfstranges: 1.200 1/min
- Prüffrequenz für umlaufende Biegebelastung: 20 Hz

2 Torsionsschwingprüfstand

In der Institutsmitteilung Nr. 31 wurde ein neues Prüfstandskonzept zur Aufbringung von dynamischer Torsionsbelastung vorgestellt. Der Prüfstand wurde erweitert und aufgrund seiner Vorteile ein zweites Mal realisiert.

2.1 Prinzip

Der Antriebstrang mit Wellen, Membrankupplungen und Spannvorrichtungen ist am einen Ende über den Prüfling mit einem Lagerbock

verbunden ist. Das andere Ende ist in einem Hebel über eine Torsionsfeder gelagert. Zwischen den Lagerstellen sind an der Welle zwei Hebelarme angebracht, an deren Enden sich zwei gleichsinnig rotierende Unwuchtmassen befinden. Die Unwuchtmassen werden dabei von einem Elektromotor durch eine biegsame Welle angetrieben. Ihr synchroner Lauf wird durch einen Zahnriemenantrieb erreicht. **Bild 3** zeigt eine Detailansicht des Torsionsantriebs.

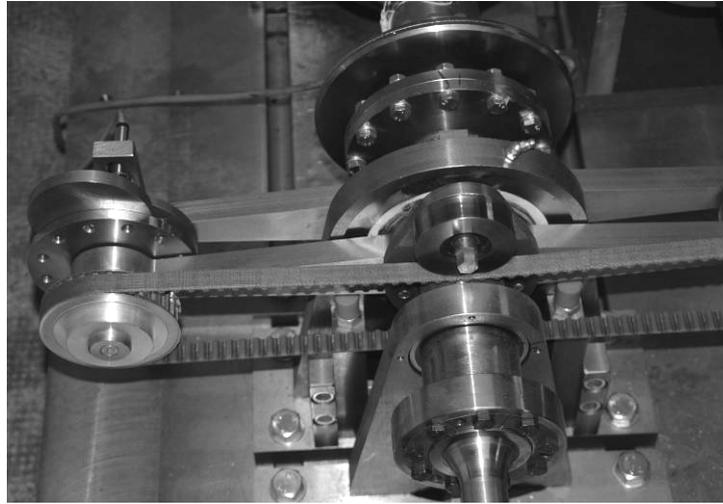


Bild 3: Detail Torsionsantrieb mit Unwuchtmasse

Die Rotation der Unwuchten erzeugt im Antriebsstrang eine wechselnde, querkräftfreie Torsion. Um verschiedene Mittenspannungsverhältnisse realisieren zu können, wird der Antriebsstrang über den Hebel mittels einer Spindel statisch vorgespannt. Im Prüfbetrieb wird diese statische Vorspannung überlagert von der dynamischen Torsion, hervorgerufen durch die rotierenden Massen. Die Drehzahl und damit das dynamische Drehmoment sind durch einen Frequenzumrichter stufenlos einstellbar. Über eine Drehmomentmesswelle wird kontinuierlich das Drehmoment gemessen und aufgezeichnet.

Bild 4 zeigt den Gesamtaufbau des Torsionsprüfstandes. Es sind zwei gleiche Prüfstände auf einer Grundplatte angeordnet. Zu erkennen ist der Hebel zur Aufbringung der statischen Last (1), die Torsionsfeder (2) und die Hebel mit den rotierenden Massen (3). Der Vorteil von Prüfständen nach dem Unwuchtprinzip liegt in dem sehr geringen Energieverbrauch bei hohen Lasten. Der Antriebsmotor überwindet die Lagerreibung und beschleunigt die Unwuchtmassen im Leerlauf.

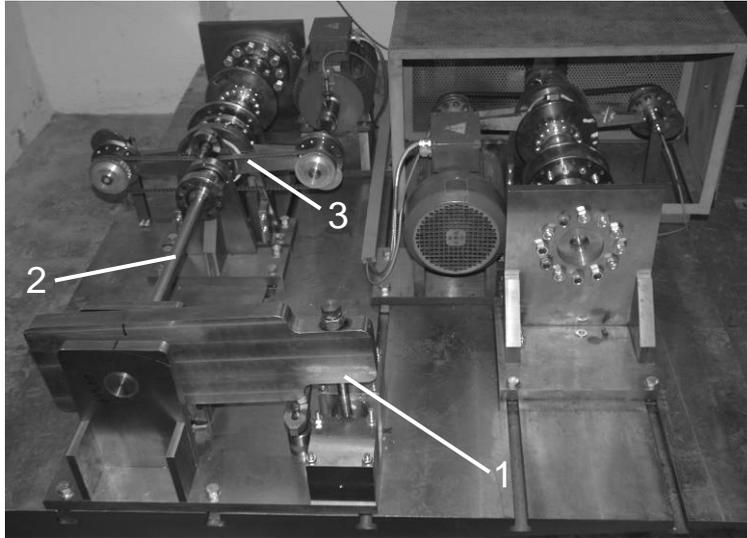


Bild 4: Torsionsprüfstand

Ein Anriss in der Probe verursacht ein Absenken des Torsionswiderstandsmomentes des Prüfstranges, was im Betrieb zu einer Erhöhung des Ausschlagwinkels der dynamischen Torsionseinrichtung führt. Durch einen Näherungsschalter wird dieser Ausschlag überwacht, so dass sich der Prüfstand automatisch ausschalten lässt. Über Variation der Parameter Drehzahl, Vorspannung und Unwuchtmasse lassen sich verschiedene Verhältnisse von Prüffrequenz, Torsionsbelastung und Mittelspannungsverhältnis einstellen.

2.2 Leistung

Der Prüfstand verfügt zurzeit über folgende Leistungsmerkmale:

- maximales Drehmoment 3.000 Nm
- typische Prüffrequenz 35 Hz
- Mittelspannungsverhältnis stufenlos einstellbar

3 Torsionsprüfstand 30 kNm

In Anlehnung an das Prüfstandskonzept eines bereits im Institut vorhandenen Torsionsprüfstands ($T_{max} = 7,5 \text{ kNm}$) wurde ein neuer

Prüfstand aufgebaut, welcher dynamische Bauteiluntersuchungen unter rein wechselnder oder schwellender Drehmomentbelastung bis zu einem maximalen Prüfmoment von 30 kNm erlaubt. Mit diesem Prüfstand ist das IMW in der Lage Lebensdauer- und Gestaltfestigkeitsuntersuchungen an Antriebselementen, sowie Welle-Nabe-Verbindungen in einem weit aus größerem Drehmomentbereich durchzuführen, als es bislang möglich war. Der Aufbau dieses Prüfstands war nur mit der Unterstützung eines langjährigen Industriepartners möglich, bei dem sich das Institut in diesem Rahmen auch noch mal bedanken möchte.

3.1 Prinzip

Das **Bild 5** zeigt den gesamten Prüfstand mit der angeschlossenen Messtechnik.

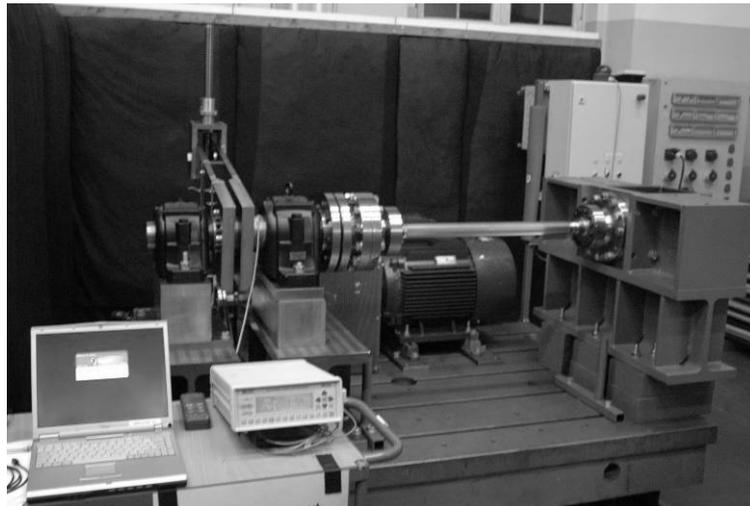
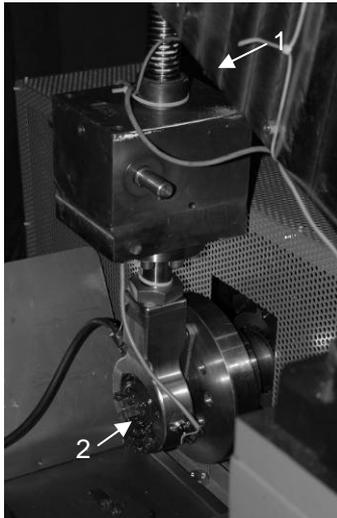


Bild 5: Torsionsprüfstand 30 kNm

Das Prüfmoment bei diesem Konzept wird mit Hilfe eines mechanischen Hebelsystems erzeugt. Über eine Hubspindel (**Bild 6, 1**) werden die gewünschten Mittellasten aufgebracht und exzentrische Bohrungen (**Bild 6, 2**) an einem Kurbeltrieb lassen eine Variation der Drehmomentamplituden zu. Durch diesen modularen Aufbau können dynamische Drehmomentbelastungen von maximal 30 kNm schwellend oder wechselnd erreicht werden. Die Prüffrequenz beträgt aufgrund des verwendeten Riemengetriebes konstant 2 Hz.

Die Steuerung des Prüfstands erfolgt über eine speicherprogrammierbare Steuerung, welche auch im Falle eines Probenbruchs den Versuchslauf sofort abbricht.



Wesentlicher Vorteil dieses Aufbaus ist die vereinfachte Anbringung der Messtechnik an nicht rotierenden Teilen. Zur Einstellung und Online-Erfassung der Prüflasten sind zwei Torsions-Dehnungsmessstreifen auf der Hauptwelle des Prüfstands appliziert. Über einen externen Messverstärker mit angeschlossenem PC erfolgt eine kontinuierliche Erfassung der Messsignale mit entsprechender Verarbeitung.

Bild 6: Hubspindel und Kurbeltrieb

3.2 Leistung

Der Prüfstand verfügt zurzeit über folgende Leistungsmerkmale:

- maximales Drehmoment 30 kNm
- konstante Prüffrequenz 2 Hz
- max. Prüflingslänge 950 mm
- Mittellast und Amplitude stufenlos einstellbar

4 Umlaufbiegeprüfstand

Bereits seit mehreren Jahren verfügt das Institut über einen Prüfstand, der seit seinem Bau für verschiedenste statische und dynamische Bauteiluntersuchungen unter Biegebelastung eingesetzt wurde. Da eine Erweiterung der Prüfstandskapazität in diesem Bereich erforderlich wurde, der Prüfstand sich in der Vergangenheit als zuverlässig erwiesen hatte und außerdem einen einfachen, Platz sparenden und flexib-

len Aufbau aufwies, wurde ein weiterer, identischer Prüfstand nach dem gleichen Konzept verwirklicht.

4.1 Prinzip

Der Prüfling wird über eine feste Verbindung mit der zweifach gelagerten Antriebswelle (siehe **Bild 7**) einseitig eingespannt. Mit Hilfe der über seinem freien Ende angeordneten Verspannvorrichtung wird die Querkraft aufgebracht und über ein Wälzlager auf den Prüfling übertragen. Zur Querkraftmessung ist eine Kraftmessdose im Kraftfluss integriert. Für die Überwachung während des Betriebs wird ein optischer Sensor genutzt, der im Fall eines Bruchs die Abschaltung des Prüfstands vornimmt – zur Erkennung extrem starken Verschleißes kommt außerdem ein Temperaturfühler zum Einsatz.

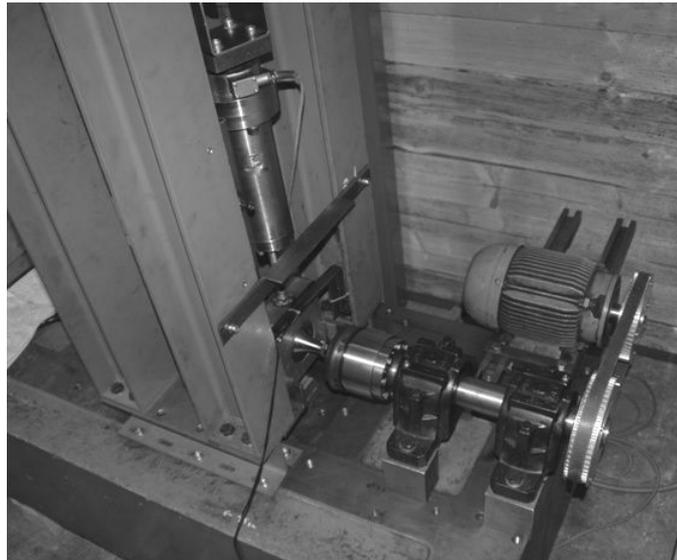


Bild 7: Umlaufbiegeprüfstand mit Blick auf die Antriebswelle

4.2 Leistung

max. Querkraft:	5000 N
max. Prüflingslänge:	300 mm
Prüffrequenzbereich:	5 bis 50 Hz

5 Ausblick und Zusammenfassung

Neben diesen vier bereits in Betrieb genommenen Prüfständen konnte das Institut als Industriesachspende einen weiteren umfangreichen Prüfstand für den Forschungsschwerpunkt Antriebselemente erhalten, dessen Aufbau im Lauf des Jahres 2008 abgeschlossen wird. Der Prüfstand ist als Verspannprüfstand für Gelenk- und Abtriebswellen sowie mechanisch angetriebene Ventiltriebe geeignet. Er kann für Festigkeits- und Lebensdauererprobungen sowie dynamische Messungen an rotierenden, Kraft übertragenden Bauteilen, wie An- und Abtriebsstrang, Gelenkwellenkomponenten usw. verwendet werden. Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist die Kennlinienaufnahme von Kupplungen. Er erlaubt eine Drehmomentverspannung bei 4000 U/min mit bis zu 2000 Nm an Antriebselementen mit bis zu 1800 mm Länge.

Zusammenfassend können wir also für das zurückliegende Jahr über eine zukunftsorientierte Erweiterung unseres Prüffeldes für Antriebselemente, speziell im Bereich der Welle-Nabe-Verbindungen berichten, die wir auch im neuen Jahr weiter führen wollen. Unsere wesentlichen Ziele sind dabei die betriebstypische Belastungssimulation bei gleichzeitig energieoptimiertem Versuchsbetrieb. Für die dargestellte erfolgreiche Verfolgung dieses Ziels möchten wir uns bei den durch Sachspenden beteiligten Industrieunternehmen und unserer institutseigenen Werkstattmannschaft bedanken, die all die „kleinen Anpassarbeiten“ unermüdlich umsetzt.

6 Literatur

- /1/ Lauster, S.: Konstruktion einer Prüfmaschine für Umlaufbiegeversuche mit überlagerter statischer Torsion, Studienarbeit, Technische Hochschule Darmstadt, 1989



Antriebstechnik von Liebherr.

**Großwälzlager
Azimutantriebe
Pitchantriebe**



Liebherr-Werk Biberach GmbH
Postfach 16 63
D-88396 Biberach an der Riss
Tel.: +49 7351 41-0
Fax: +49 7351 41-22 25
www.liebherr.com

LIEBHERR
Die Firmengruppe

Messung an Lüfterrädern

Korte, T.; Kruk, R.; Rolshofen, W.

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit der Firma Howden Ventilatoren wurden am Institut für Maschinenwesen Schwingungsuntersuchungen an unterschiedlichen Lüfterrädern erfolgreich durchgeführt

In collaboration with Howden Ventilatoren the Institute of Mechanical Engineering tested vibration behaviour of different fans successfully.



1 Einleitung

Das Institut für Maschinenwesen (IMW) verfügt über eine umfangreiche messtechnische Ausstattung mit Schwingungsaufnehmern, Dehnungsmesstechnik und entsprechender Telemetrie, so dass auch an rotierenden Bauteilen Messungen durchgeführt werden können. Bedingt durch diese Ausstattung kam es in diesem Jahr zu interessanten Projekten; u.a. die experimentelle Beanspruchungsermittlung an Rotorstrukturen.

In Zusammenarbeit mit der Howden Ventilatoren GmbH aus Heidenheim wurden Industrielüfter für Tunnelbelüftungen untersucht. Die Versuche konnten aufgrund der Baugröße der Lüfter und der umgewälzten Luftmenge nicht auf dem Schleuderprüfstand des IMW durchgeführt werden. Sie fanden vor der Versuchshalle auf dem ehemaligen Bundeswehrgelände Tannenhöhe in Clausthal statt.

2 Lüfteruntersuchung

Im Rahmen der Messungen sind zwei Lüfter untersucht worden, die jeweils mit APR- bzw. APA-Schaufeln bestückt waren. Das Versuchsprogramm bestand daher aus zwei Abschnitten, die durch das Institut für Maschinenwesen durchgeführt wurden. Nachfolgend werden die jeweiligen Versuchsabschnitte im Detail erläutert.

2.1 Lüfter 1 (APR-Schaufel)

Der Lüfter wurde auf einem Gestell montiert und inklusive Motor angeliefert, dessen maximale Drehzahl beträgt 1500 1/min bei einer

Leistung von 45 kW. Da die Lüfter wie im Auslieferungszustand betrieben werden sollten, wurde kein Frequenzumrichter eingesetzt. Das **Bild 1** zeigt den gesamten Aufbau, der ebenfalls eine Drosselklappe mit Verstelleinheit umfasst. Mit dieser können unterschiedliche Betriebszustände erzeugt werden.

Auf dem Gehäuse sind drei einachsige Beschleunigungsaufnehmer angebracht worden (s. **Bild 2**), die im Betrieb die jeweiligen Schwingungen aufzeichnen. Außerdem sollte in Umfangsrichtung die Spannung in den Halbschalen, die als Nabe der Lüfterwelle dient, durch Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen werden. Hierzu sind an vorgegebenen Stellen vier DMS angebracht worden (s. **Bild 3**, rechts).

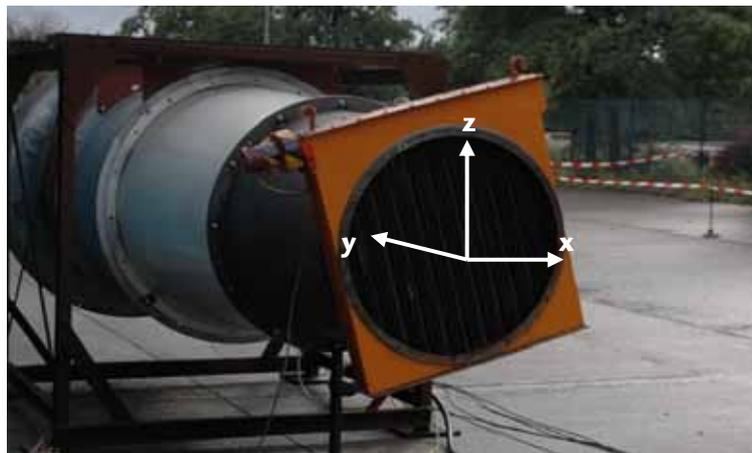


Bild 1: Gestell mit Lüftergehäuse, Konus und Drosselklappe, die verstellbar ist und unterschiedliche Strömungszustände ermöglicht.

Position	Name (Serien-Nr.)	Empfindlichkeit [mV/g]	Schwingungs- richtung
L1	PCB_3937	20,06	X
L2	PCB_3938	18,77	Y
L3	PCB_3939	19,72	Z

Tabelle 1: Sensoren auf dem Gehäuse

2.2 Lüfter 2 (APA-Schaufel)

Um Aussagen zum Schwingungsverhalten der einzelnen Schaufeln zu erhalten, sind zwei Beschleunigungsaufnehmer direkt auf gegenüberliegende Schaufeln geklebt worden (s. **Bild 3**, links). Dies waren ein einachsiger und ein dreiachsiger Sensor, der nur in zwei Richtungen aktiv war (tangential zur Schaufel PCB_29894_Y und axial in Strömungsrichtung PCB_29894_Z).

Position	Name (Serien-Nr.)	Empfindlichkeit [mV/g]	Schwingungsrichtung
L4	PCB_25674	99,8	axial (Y)
L5	PCB_29894_Y	9,7	tangential
L5	PCB_29894_Z	10,1	axial (Y)

Tabelle 2: Sensoren direkt auf einer Schaufel



Bild 2: Sensorpositionen der einachsigen Beschleunigungsaufnehmer auf dem Gehäuse.

Bei dieser Untersuchung wurden ebenfalls die Sensoren an den Positionen L1, L2 und L3 aus den Versuchen zu Lüfter 1 verwendet.



Bild 3: Sensorposition des einachsigen (L4) und dreiachsigen (L5) Beschleunigungsaufnehmer direkt auf der Schaufel (linke Spalte). DMS Position 1 und 2 sowie 3 und 4 auf der Halbschale zur Spannungsermittlung und Flansch zur Aufnahme des Telemetriesenders (rechte Spalte).

3 Ergebnisse

Während der Versuche wurde beobachtet, wie sich das Signal der Sensoren bei veränderten Betriebszuständen verhält. Dargestellt sind in **Bild 4** die Zeitsignale der Beschleunigungsaufnehmer (L1, L2, L3) auf dem Gehäuse und das DMS-Signal von den Halbschalen. Deutlich ist zu Erkennen wie Spannung und Beschleunigung ansteigen nachdem der Lüfter eingeschaltet wurde.

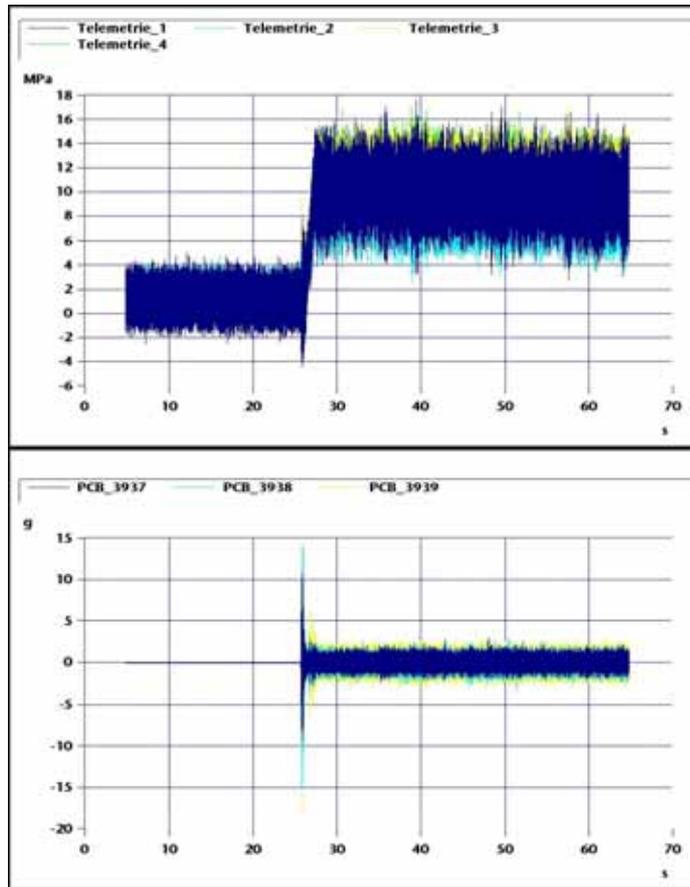


Bild 4: Zeitsignal der vier DMS (Telemetrie_1 bis Telemetrie_4) auf der Halbschale, sowie der einachsigen Beschleunigungsaufnehmern (PCB_3937, PCB_3938 und PCB_3939) auf dem Gehäuse während des Einschaltvorgangs des Lüfters.

Außerdem wurde aus den Beschleunigungen der Sensoren, welche sich direkt auf einer Schaufel befanden, das Amplitudenspektrum für einen Frequenzbereich von 0-2500 Hz ermittelt, um Aussagen zum Schwingungsverhalten zu machen (s. Bild 5). In diesem Versuchslauf ist nicht nur der Einschaltvorgang sondern auch das Abschalten des Lüfterbetriebs deutlich zu erkennen.

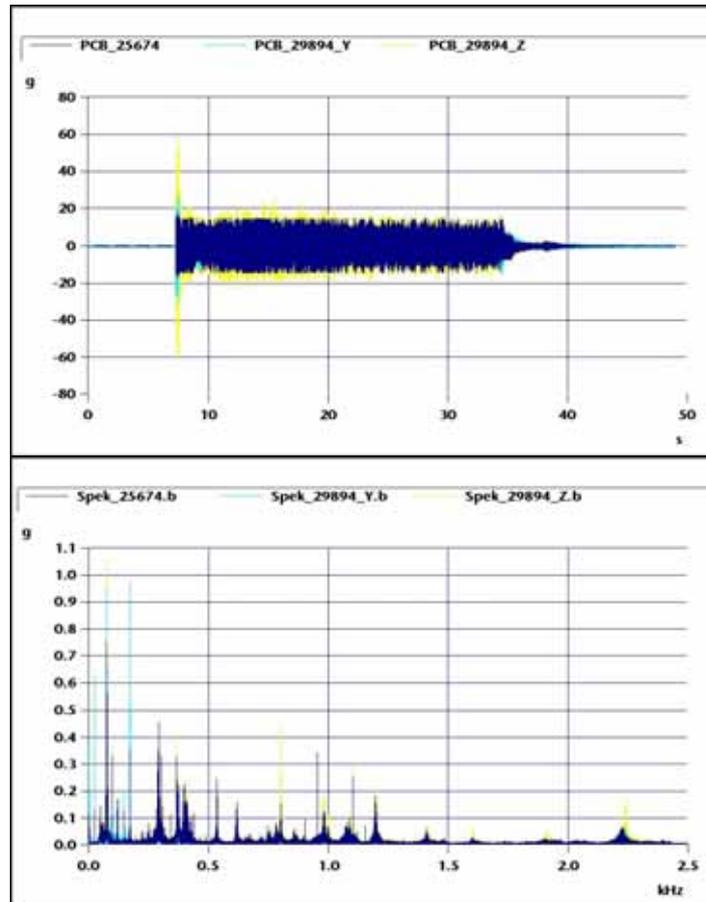


Bild 5: Beschleunigungssignale der Sensoren, die auf der Schaufel befestigt waren (PCB_25674, PCB_29894_Y und PCB_29894_Z), und das entsprechende Amplitudenspektrum für einen Frequenzbereich von 0 - 2500 Hz.

4 Zusammenfassung

Insgesamt lässt sich feststellen, dass jeder veränderte Betriebszustand in den Sensorsignalen zu erkennen ist. Neben den Schwingungsfrequenzen der Lüfterschaukeln ist auch eine Zu- bzw. Abnahme der Sensorsignale aufgrund des Ein- bzw. Ausschaltvorgangs zu beobachten.

Betrachtungen zum Schwingungsverhalten von Rechteckplatten

Dietz, P.; Rolshofen, W.; Schäfer, G.

Das Institut für Maschinenwesen (IMW) erforscht im Rahmen eines EU Forschungsprojektes einen Ansatz zur Schalllokalisierung in Festkörpern. Dabei wurde das Schwingungsverhalten von Rechteckplatten theoretisch, experimentell und durch numerische Simulation untersucht. Die übereinstimmenden Ergebnisse erklären die Beobachtungen als Eigenschwingung.



Within the scope of an EU research project, the Institute of Mechanical Engineering investigates an approach to localise acoustic sources in solids. Therefore, vibration behaviour of rectangular plates has been examined theoretically, experimentally and by numerical simulation. Consistent results exemplify observations as natural oscillation.

1 Einleitung

Im Rahmen der Forschungstätigkeit des Institutes für Maschinenwesen (IMW) im EU Projekt „Tangible Acoustic Interfaces for Computer-Human Interaction (TAI-CHI)“ wird eine Methodik zur Schalllokalisierung in Festkörpern entwickelt /1, 2/.

Der Hintergrund für diese Aktivität ist, wie der menschliche Tastsinn mit Computeranwendungen verknüpft werden kann. Physikalische Objekte bzw. deren komplexe Oberflächen sollen als natürliche berührbare Benutzerschnittstellen funktionieren, die auf der Basis festkörperakustischer Signale eine Verbindung zwischen virtueller und realer Welt herstellen.

Der entwickelte Algorithmus ist anhand experimenteller Versuche überprüft und anschließend systematisch optimiert worden. Im Nachfolgenden wird über die Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von Rechteckplatten berichtet, die dazu durchgeführt wurden.

2 Versuchsaufbau und Messdatenerfassung

Bei dem verfolgten Ansatz werden Beschleunigungsaufnehmer auf eine Rechteckplatte (s. **Tabelle 2**) aufgebracht, um das Berühren bzw. Klopfen auf die Platte zu lokalisieren. Dabei hat sich mehrfach die Charakteristik des Schwingungsverhaltens wie in **Bild 1** dargestellt. Dort sind aus den gemessenen Beschleunigungen im berechneten Amplitudenspektrum mehrere lokale Maxima zu beobachten. Diese befinden sich ungefähr bei den Frequenzen: 156 Hz, 272 Hz, 391 Hz, 467 Hz (nicht markiert), 581 Hz und 684 Hz.

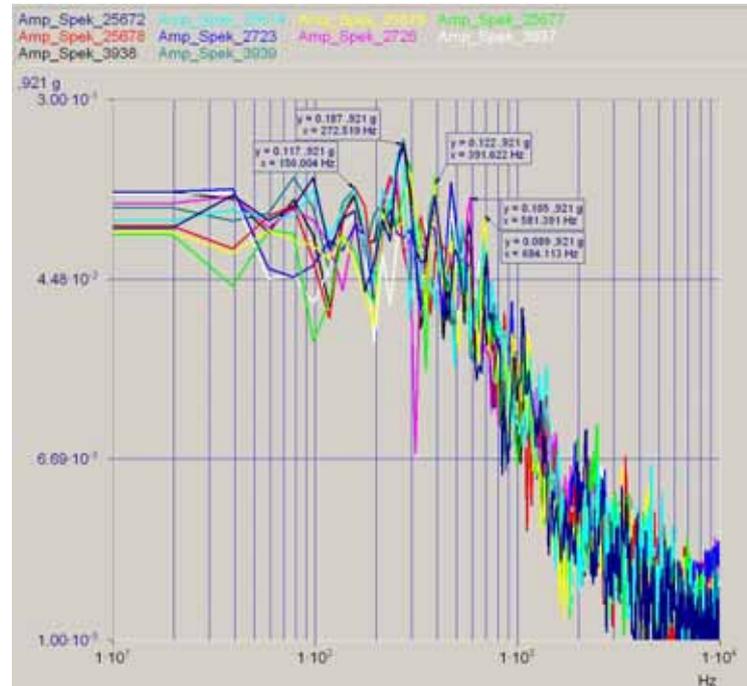


Bild 1: Aus den Beschleunigungssignalen berechnete Amplitudenspektren, wobei diese durch ein gleitendes Fenster über viele Spektren gemittelt wurden. Auffallend sind einige lokale Maxima.

Um diese Beobachtung gegenüber der Schwingung einer Rechteckplatte abzugrenzen, wurde das Schwingungsverhalten weiter untersucht.

2.1 Biegeschwingungen von Rechteckplatten

Ausgehend von dem Modell des Einmassenschwingers kann das Körperschallverhalten einfacher Strukturen beschrieben werden.

Als Platte wird eine Struktur bezeichnet, deren Wanddicke deutlich geringer ist als deren Ausdehnung. Die Plattendicke h wird über die Gesamtfläche, welche durch die Seitenlängen a und b aufgespannt wird, als konstant angenommen. Wird ein solcher Körper an seiner Oberfläche zu Schwingungen angeregt, so bilden sich unterschiedliche Wellenarten aus. An dieser Stelle soll das Augenmerk nur auf die „Lamb-Wellen“ gelegt werden /3/, die aus der Überlagerung von Druck- und vertikalen Scherwellen entstehen und in plattenförmigen Körpern beobachtet werden, wenn die Wellenlänge $\lambda \gg h$ die Plattendicke ist.

Hierbei muss beachtet werden, ob die Oberseite der Platte symmetrisch oder asymmetrisch zur Unterseite schwingt. In der Literatur /4, 5/ lassen sich für diese Arten auch die folgenden Bezeichnungen finden: Dehnungswelle (symmetrisch) bzw. Biegungswelle (asymmetrisch). Die weiteren Ausführungen beziehen sich immer nur auf die asymmetrischen Lamb-Wellen und für die Herleitung der Wellengleichung sowie der Randbedingungen sei auf andere Publikationen verwiesen /6, 7/.

Mit den entsprechenden Voraussetzungen der Kirchhoffschen Plattentheorie lautet die Bewegungsgleichung der ungedämpften Platte:

$$\underbrace{B\Delta w}_{\text{Steifigkeits-}} + \underbrace{\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}}_{\text{Trägheits-}} = \underbrace{p(x, y, t)}_{\text{äußere Kraft}} \quad (1)$$

Mit B ist die Biegesteifigkeit der ungedämpften Platte, mit w die Durchbiegung und ρ die Dichte sowie die Flächenlast p definiert.

B lässt sich mit dem Elastizitätsmodul E und der Querdehnungszahl μ wie folgt berechnen.

$$B = \frac{Eh^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \quad (2)$$

Mit den Randbedingungen, die die Lagerung der Platte beschreiben,

- eingespannt
- frei gestützt
- kräftefrei

ergibt sich eine Lösung für (1), die durch die Anfangsbedingungen zum Zeitpunkt $t=0$ ergänzt werden.

Die freien Schwingungen der Rechteckplatte ergeben sich durch eine Lösung der homogenen Bewegungsgleichung aus (1). Es lässt sich zeigen s. /8, 9/, dass für die Eigenfrequenzen einer homogenen, frei gestützten (allseitig gelenkig gelagerte) Platte gilt:

$$f_{m,n} = \frac{\omega_{m,n}}{2\pi} = \frac{\pi}{2} \cdot \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right] \cdot \sqrt{\frac{B}{\rho h}} \quad (3)$$

Die Lösungsfunktionen für die freie Schwingung der Rechteckplatte werden als Eigenfunktionen bezeichnet, welche die Eigenschwingungen der Platte (s. **Bild 2**) angeben und deren Eigenkreisfrequenz $\omega_{m,n}$ sich nach (3) berechnen lässt. Mit m und n wird die Ordnung dieser Eigenfunktionen benannt.

Man bezeichnet die Bereiche mit Erhebung bzw. Tal der Eigenfunktion als „Bauch“ und die Gebiete, die den Wert Null annehmen, als Knotenlinie.

2.2 Dispersion

Ein bedeutender Effekt bei der Betrachtung von Schwingungen in Festkörpern ist das Auftreten von „Dispersion“, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist frequenzabhängig. Aus dem Zusammenhang zwischen Wellenlänge λ und Kreisfrequenz ω ergibt sich für die Phasengeschwindigkeit c_B der Welle unter Berücksichtigung von

$$c = \lambda \cdot f = \lambda \cdot \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\omega}{k} \quad \text{bzw.} \quad k_{m,n} = \pi \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (4)$$

$$c_B = \sqrt{\omega} \cdot \sqrt[4]{\frac{B}{\rho h}} \quad (5)$$

Streng genommen gilt dies nur für unendliche harmonische Schwingungen. Da sich diese im beobachteten Fall (s. **Bild 1**) aus unterschiedlichen Sinus- bzw. Cosinusschwingungen zusammensetzen lässt, haben die jeweiligen Frequenzanteile eine unterschiedliche Geschwindigkeit. In **Bild 3** sind sowohl die Wellenlänge als auch die Phasengeschwindigkeit gegen die Frequenz aufgetragen. Diese Dispersionskurven sind in Zusammenarbeit mit dem Laboratoire Ondes et Acoustique (LOA), Paris, entstanden und enthalten zum Vergleich das dispersionsfreie Medium Luft bei 20 °C.

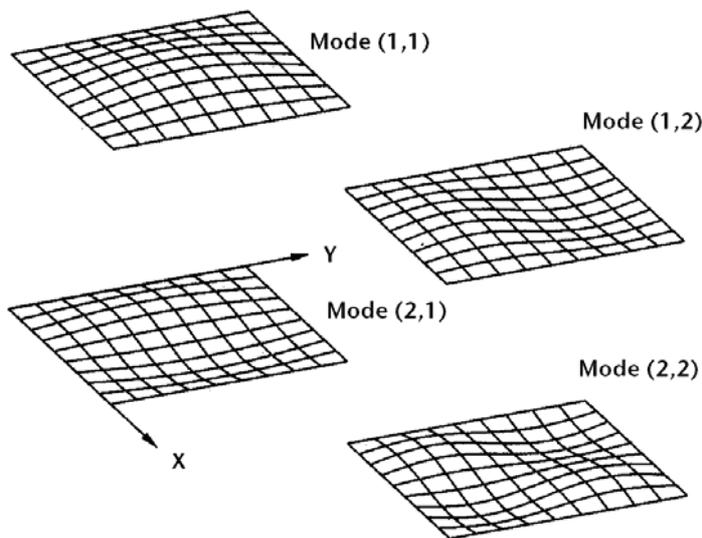


Bild 2: Eigenfunktionen einer allseits gelenkig gelagerten Platte, wobei z.B. die Angabe Mode (2,1) bedeutet $m=2$ und $n=1$ nach /8/.

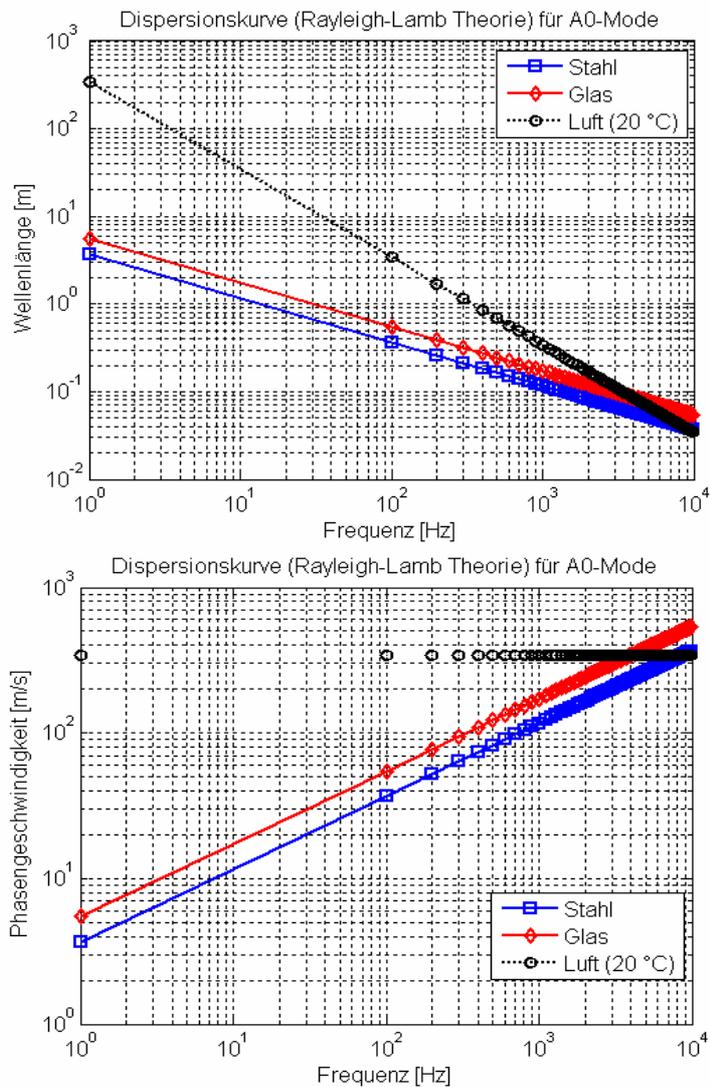


Bild 3: Dispersionskurven für die Rechteckplatten aus Stahl und Glas (s. **Tabelle 1** und **2**) im Vergleich zum dispersionsfreien Medium Luft (bei 20 °C). Wellenlänge über Frequenz (oben) sowie Phasengeschwindigkeit über Frequenz (unten).

2.3 Verwendete Platten aus Stahl und Glas

Während der Untersuchung wurden unterschiedliche Geometrien und Materialien eingesetzt. Beispielhaft werden hier eine Platte aus Stahl und Glas mit den entsprechenden Kennwerten aus **Tabelle 1** und **2** diskutiert.

Material	Seitenlänge „a“ [m]	Seitenlänge „b“ [m]	Plattendicke „h“ [m]
Stahl	0,600	0,400	0,0014
Glas	0,436	0,332	0,0028

Tabelle 1: Abmessungen für die verwendeten Rechteckplatten

Material	Elastizitätsmodul „E“ [N/m ²]	Querdehnungszahl „μ“	Dichte „ρ“ [kg/m ³]
Stahl	$2,181 \cdot 10^{11}$	0,310	8.392
Glas	$0,845 \cdot 10^{11}$	0,201	2.569

Tabelle 2: Werkstoffdaten von Stahl und Glas (experimentell ermittelt)

In **Tabelle 3** und **4** sind die ersten Eigenfrequenzen für die jeweilige Platte dargestellt, die nach (3) berechnet wurden. Neben dieser Berechnung wurden noch zwei weitere Ansätze zur Ermittlung der Eigenfrequenzen verfolgt, die im nächsten Abschnitt vorgestellt werden.

$f_{m,n}$	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5
m = 1	30,7	94,6	200,9	349,9	541,4
m = 2	59,1	122,9	229,3	378,2	569,7
m = 3	106,4	170,2	276,6	425,5	617,0
m = 4	172,6	236,4	342,8	491,7	683,2
m = 5	257,7	321,5	427,9	576,8	768,3

Tabelle 3: Die ersten Eigenfrequenzen $f_{m,n}$ für Stahlplatte in Hz

$f_{m,n}$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
$m = 1$	107,4	312,1	653,4	1131,2	1745,5
$m = 2$	224,7	429,4	770,7	1248,5	1862,8
$m = 3$	420,2	625,0	966,2	1444,0	2058,4
$m = 4$	693,9	898,7	1240,0	1717,8	2332,1
$m = 5$	1045,8	1250,6	1591,9	2069,7	2684,0

Tabelle 4: Die ersten Eigenfrequenzen $f_{m,n}$ für Glasplatte in Hz

2.4 Chladnische Klangfiguren und numerische Simulation

Mit Hilfe eines Verfahrens, welches auf Chladni zurückgeht, gelingt es mit einfachen Mitteln, einen optischen Eindruck von ruhenden und schwingenden Stellen eines Festkörpers zu erzeugen. „Man bestreut vor der Erzeugung eines bestimmten Tones den Resonanzkörper mit feinem Sand, der dann beim Schwingen von den sich bewegenden Stellen weggefegt wird und sich an Stellen der Ruhe ansammelt“ /10/. Im oberen Teil von **Bild 4** ist der Aufbau dieser Experimente nach Chladni zu sehen.

Dort ist eine Glasplatte frei hängend durch elastische Bänder und Saugfüße über einem Lautsprecher befestigt. Dieser wird über einen Verstärker mit einem Frequenzgenerator verbunden, wo in Zehntelfrequenzstufen die jeweiligen Anregungen eingestellt werden können. Auf der Platte ist zur Orientierung ein quadratisches Gitter gezeichnet. Vor jedem Versuch wird auf den Platten feiner Quarzsand verstreut, der sich in diesem Fall zu zwei Linien in Längsrichtung anhäuft.

Der gleiche Versuchsaufbau wurde auch bei der Stahlplatte verwendet (s. **Bild 5**), wobei dort die elastische Aufhängung durch vorhandene Bohrungen erfolgte.

Außerdem wurde mit den Parametern der jeweiligen Platte eine numerische Simulation mit FEM durchgeführt. Dabei ist von keiner Einspannung der Platte ausgegangen worden und die Lösungen beschreiben die einzelnen Moden der Plattenschwingung. Beispielhaft sind diese im unteren Teil von **Bild 4** und **5** dargestellt.

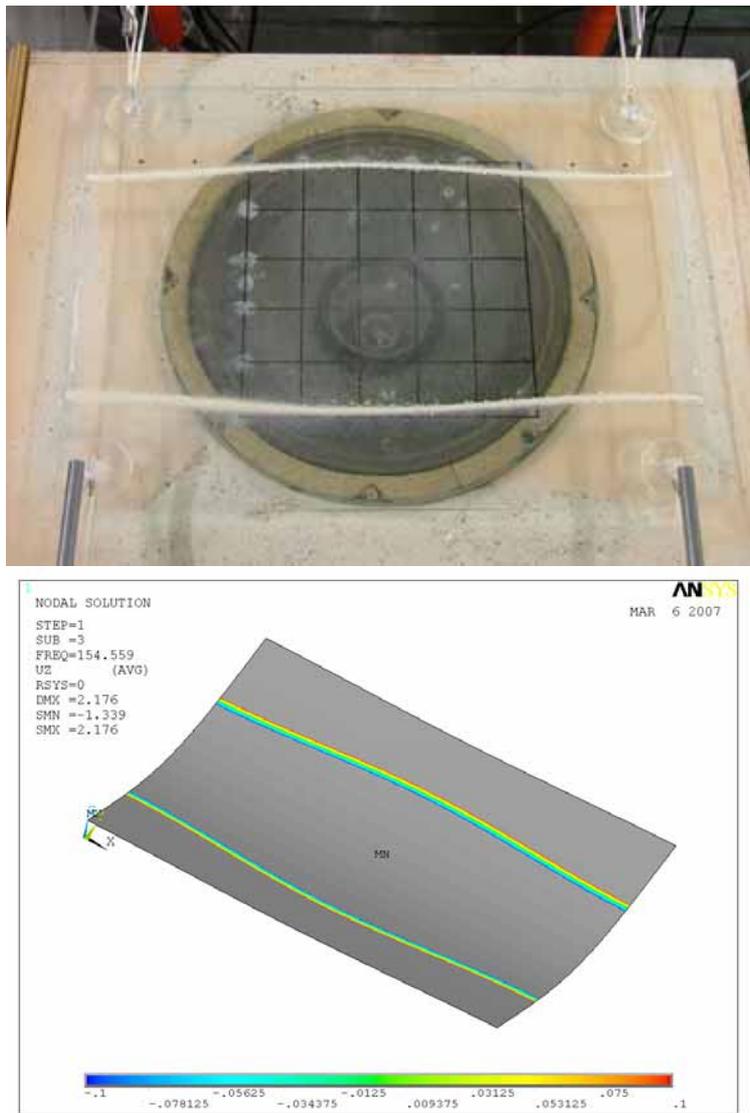


Bild 4: Versuchsaufbau zur experimentellen Bestimmung der Eigenschwingungen einer Glasplatte (oben) sowie Simulationsergebnis für die entsprechenden Materialparameter (unten).

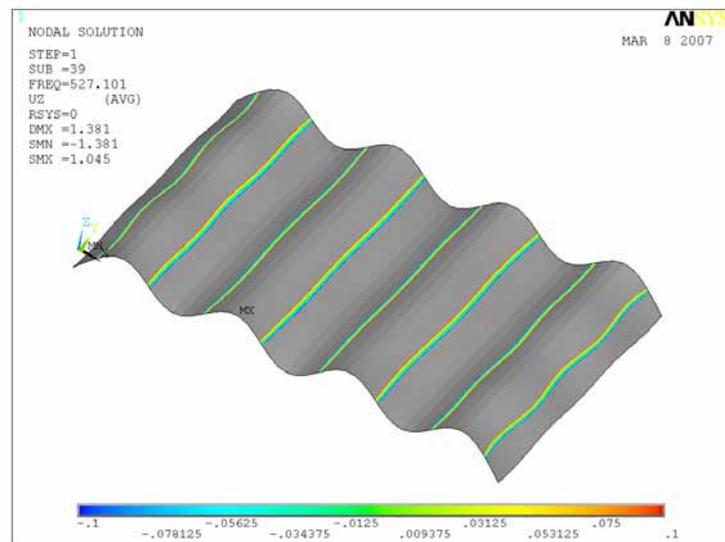
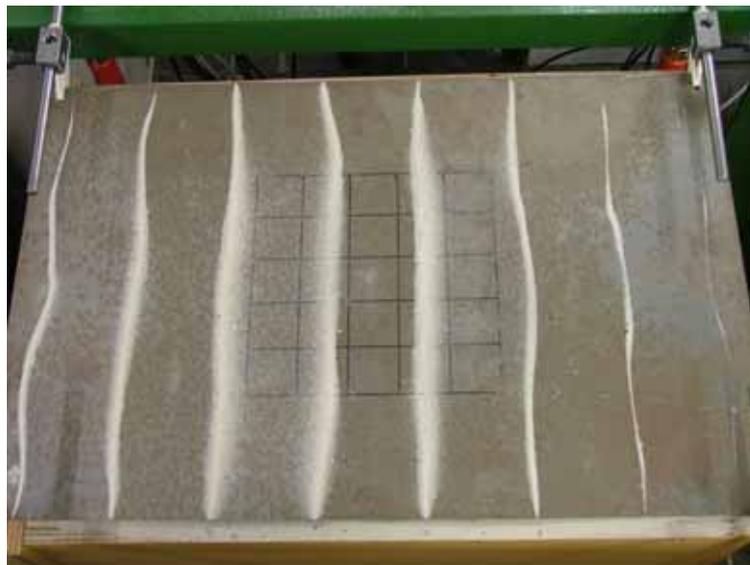


Bild 5: Versuchsaufbau zur experimentellen Bestimmung der Eigenschwingungen einer Stahlplatte (oben) sowie Simulationsergebnis für die entsprechenden Materialparameter (unten).

Die Chladnische Klangfigur der Glasplatte ist bei einer Anregung von 143 Hz entstanden und die gleiche Mode lässt sich in der Simulation bei 154 Hz beobachten. Die dargestellten Ergebnisse für die Stahlplatte sind 581 Hz und 527 Hz in der Simulation.

Der Unterschied in der zugehörigen Anregungsfrequenz lässt sich durch abweichende Annahmen des Modells zum Experiment erklären; einerseits die Randbedingungen durch die Aufhängung und andererseits die experimentelle Bestimmung der Elastizitätsparameter. Der Frequenzabstand bleibt bei anderen ermittelten Moden konstant, was diesen systematischen Einfluss nachweist. Angemerkt sei an dieser Stelle aber ebenfalls, dass neben der Befestigung auch die Lage der Anregung, sowie die „Tonhöhe“ einen Einfluss auf die Klangfiguren haben.

Interessanterweise konnte für eine Vielzahl der Eigenfrequenzwerte nach der **Tabelle 3** und **4** bei nahezu gleicher Frequenz im Experiment als auch der Simulation eine Schwingungsmoden bestimmt werden. Durch diese gute Übereinstimmung lässt sich die Schwingungscharakteristik aus **Bild 1**, wie sich vermuten ließ, auf das Eigenschwingungsverhalten von Rechteckplatten zurückführen. Sicherlich kommt es bei einer Vielzahl von Moden zu einer Überlagerung, da diese oft an gleichen oder benachbarten Frequenzen auftreten. Trotzdem tauchen in dem ermittelten Amplitudenspektrum nur einige bedeutungsvolle Schwingungen auf. Welche Vorteile sich daraus für den Algorithmus der Lokalisierung ergeben bzw. welcher Einfluss sich daraus auf die Anordnung der Sensoren herleiten lässt, ist zurzeit noch Gegenstand weiterer Untersuchung.

Erfolgreich konnten die theoretischen Angaben aus der Literatur durch einen experimentellen Aufbau und eine numerische Simulation überprüft werden. Unter Berücksichtigung der entsprechenden Voraussetzungen stimmen die Untersuchungen gut überein.

3 Zusammenfassung

Innerhalb der Erforschung eines Algorithmus zur Schalllokalisierung in Festkörpern ergab sich die Notwendigkeit, das Schwingungsverhalten von Rechteckplatten genauer zu untersuchen. Daher wurden, ausgehend von theoretischen Berechnungen der Literatur zu Biegeschwingungen in Rechteckplatten, experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen eingesetzt. Zusätzlich wurde der Effekt der Dispersion bei den eingesetzten Materialien bestimmt.

Insgesamt lässt sich unter Berücksichtigung der entsprechenden Voraussetzung durch jedes durchgeführte Verfahren das beobachtete Schwingungsverhalten der Rechteckplatten ermitteln.

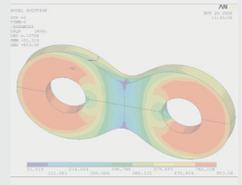
4 Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des EU FP6 IST Projektes „Tangible Acoustic Interfaces for Computer-Human Interaction (Project Ref.: 507822)“ durchgeführt. Die Unterstützung durch die Europäische Kommission sowie der Kollegin Guillemette Ribay (LOA) und der Kollegen Jan Lukas Hilgermann (IMW) und Sergej Mamaschew (IMW) wird dankbar anerkannt.

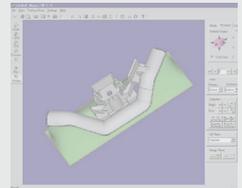
5 Literatur

- /1/ <http://www.taichi.cf.ac.uk/>
- /2/ Rolshofen, W.; Dietz, P.; Schäfer, G.: Application of Tangible Acoustic Interfaces in the Area of Production Control and Manufacturing. J. Jacko (Ed.): Human-Computer Interaction, Part II, HCII 2007, LNCS 4551, pp. 920–925, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, ISBN: 978-3-540-73106-1.
- /3/ Lamb, H.: On Waves in an Elastic Plate. Proc. of the Roy. Soc. of London, Series A, pp. 114-128, London 1917.
- /4/ Bergmann, L.: Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1949.
- /5/ Trendelburg, F.: Einführung in die Akustik. Springer-Verlag Berlin Göttingen Heidelberg 1961, Dritte Auflage, Erlangen 1960.
- /6/ Szabó, I.: Höhere Technische Mechanik. Fünfte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo 1985.
- /7/ Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996.
- /8/ Kollmann, F.; Schösser, T.; Angert, R.: Praktische Maschinenakustik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, ISBN: 3-540-20094-0.
- /9/ Storm, R.: Kompendium Maschinenakustik Teil 1: Maschinenakustik – Grundlagen. Studienskript, typographys GmbH, Darmstadt 2006.
- /10/ Scheminzky, F.: Die Welt des Schalles, Verlag „Das Bergland-Buch“, Salzburg 1943.

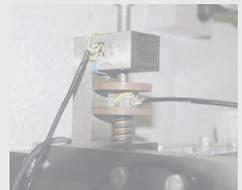
Konstruktion und Berechnung
von Maschinenelementen



Konstruktionsmethodik und
rechnerunterstützte
Produktentwicklung



Systementwicklung, Versuchstechnik
und Maschinenakustik



Lehre und Institutsbetrieb



Hochschule und Kontakte



eLearning am IMW

Schäfer, G.

eLearning beschreibt heute ein sehr weites Feld von Bildungsangeboten, -formen und -aktivitäten. Das Institut für Maschinenwesen ist in einzelnen Bereichen, deren Wirksamkeit relativ direkt bei den Studierenden spürbar wird tätig. Dazu zählen offline-Angebote zum Blended Learning, die gesamte Studienorganisation und auch kleine Hardware-Realisationen.

Nowadays, eLearning means a plenty of tools and features. The IMW implemented a few of these which are most beneficial for our students, like Blended Learning, Learning Management Systems and special customised hardware solutions.



1 Einleitung

Das Institut für Maschinenwesen (IMW) ist seit vielen Jahren aktiv in der Lehr- und Lernunterstützung durch neue Medien. Bereits in der ersten Phase des niedersächsischen Projekts ELAN war die TU Clausthal u.a. mit dem IMW eingebunden und hat neben einer Hardware-Grundausstattung bereits mehrere Basis-eLearning-Module erstellt. (<http://www.elan.tu-clausthal.de/>)

2 eLearning Angebot zum Technischen Zeichnen

Die inzwischen wieder erfreulich angestiegenen Studierendenzahlen einerseits und die dicht gedrängten Stundenpläne andererseits führen bei den Studierenden zu dem Wunsch einzelne Studieninhalte selbstständig und zeitlich ungebunden vertieft vor- und nachzubereiten. Wesentlich ist dabei natürlich eine zwischenzeitliche Selbstkontrolle um den eigenen Kenntniszuwachs überprüfen zu können. Diese grundsätzlichen Meinungsäußerungen unserer Studierenden und die detaillierte Auswertung der Lehrevaluationen der letzten Semester ergab ein konkretes Anforderungsprofil für die sinnvolle Bereitstellung von eLearning-Inhalten. Der Bereich des Technischen Zeichnens ist durch den starken Normenbezug gekennzeichnet und unterliegt damit einem kontinuierlichen inhaltlichen Wandel, der zur Pflege aktueller Lehrunterlagen erhebliche Personalkapazitäten bindet. Vor diesem Hintergrund wurde auf das im Rahmen einer Hochschulkooperation

entwickelte Produkt *pronorm* der Universität der Bundeswehr in Hamburg zurückgegriffen. *pronorm* ist auf der Lernplattform *ilias* implementiert. Durch die gemeinsame Nutzung des *pronorm*-Systems ergeben sich für die beteiligten Hochschulen deutliche Synergieeffekte. Neben den reinen zeichnerischen Fachinhalten sind auch Erweiterungen bis in den Bereich der Maschinenelemente enthalten. Die spezifische Nutzung an den einzelnen Hochschulen ist dabei flexibel, so dass wir unsere verbindlichen Anteile auf den Bereich des Technischen Zeichnens begrenzt haben und den darüber hinaus gehenden Anteil informativ zugänglich machen.

Die Studierenden erhalten zur Lehrveranstaltung ein Kurzschrift in gedruckter Version als Auszug aus dem elektronischen *pronorm*-Skript und zu den Übungen entsprechende Hinweise auf Referenzkapitel im Skript. Über die integrierten Selbsttests ist eine effektive Vorbereitung am eigenen PC-Arbeitsplatz möglich. Für die Präsenzübungen stehen den Studierenden die gesamten elektronischen Skripte am Arbeitsplatz über einen integrierten Monitor zur Verfügung. Da unsere ersten Zeichenübungen tatsächlich noch mit Stift, Geodreieck, Zirkel und Zeichenplatte durchgeführt werden, haben wir uns für eine flächenbündige Integration des Bildschirms in die bestehende Tischstruktur entschieden, siehe **Bild 1**.



Bild 1: Prototyp blended-learning-Präsenzarbeitstisch

Da es einen solchen Arbeitstisch nicht fertig zu kaufen gibt, wurde in Zusammenarbeit mit einem Tischler zunächst ein Prototyp hergestellt. Die finale Ausführung in der benötigten Anzahl von 22 Stück

wird mit Beginn des Jahres 2008 bereit stehen und nur noch einen passgenauen Monitorausschnitt haben. Die Vorversuche mit dem Prototypen waren für die Ausrichtung des Monitors unter den teilweise zum Blenden neigenden Beleuchtungsverhältnissen notwendig.

3 Learning Management

Neben den an einzelnen Lehr- und Übungsveranstaltungen orientierten eLearning Aktivitäten ist das IMW mit seinen Vertretern in den zentralen Hochschulgremien zur IT- und Mediennutzung in der Planung des Studienablaufs von der Immatrikulation über Stundenplanerstellung, Praktikumsanmeldungen, Prüfungsanmeldungen, Leistungsübersichten bis hin zum Alumni-Management involviert. Im vergangenen Jahr wurden zu diesem Ablauf am Institut folgende Arbeitspakete behandelt und teilweise auch schon in studentisch nutzbare Anwendungen überführt.

- Anmeldung zu allen Studiumsveranstaltungen im zentralen Lern-Management-System (studIP), dazu Einrichtung eines Anmeldeterminals im Bereich der klassischen „Schwarzen Bretter“ (**Bild 2**). Die Studierenden können dadurch sowohl von zuhause als auch im gewohnten Institutsbereich die Anmeldung zu teilnehmerbeschränkten Laboren vornehmen und sich in einzelnen Übungsgruppen selbst organisieren. Dies wird für die TZ-Gruppen rege genutzt und erlaubt den Studierenden auch jederzeit einen Einblick in ihre Prüfungsteilleistungen.
- Auf- und Ausbau des WLAN-Netzes im Institutsgebäude einschließlich Hörsaal.
- Zeitlich unbeschränkter Zugang zu den Rechnerarbeitsräumen und Gruppenarbeitsräumen über die persönliche Studierendenkarte. In den letzten Semestern hat der Anteil kleinerer selbstorganisierter Lerngruppen stark zugenommen. Diesem Trend und dem damit verbundenen Bedarf an geeigneten Räumen ist das IMW mit seinen Seminarräumen und die Hochschule in der zentralen Bibliothek und Mensa durch Einrichtung eines zentralen Schließsystems nachgekommen.



Bild 2: Anmelde- und Infoterminal im Foyer des IMW

4 Blended Learning

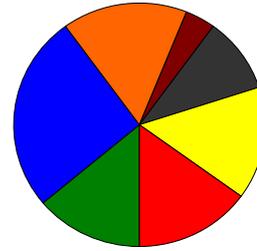
Da die TU Clausthal grundsätzlich eine Präsenz-Universität ist, haben wir im IMW vor einigen Jahren den Weg des „Blended Learning“ gewählt und damit großen Zuspruch bei den Studierenden gefunden. (<http://www.uni-protokolle.de/nachrichten/id/114460/>) Die Vorlesungen sind trotzdem gut besucht und die Studierenden nutzen die eLearning-Vorlesungsmodule zur Nacharbeit, Prüfungsvorbereitung und bei einzelnen krankheitsbedingten Ausfällen.

Weiterführende Ideen für die Nutzung dieser Lernplattform bestehen in der fachsprachlichen Begleitung von Lehrveranstaltungen speziell für internationale Austauschstudierende im Sinne einer Propädeutik.

5 Zusammenfassung

Mit den verschiedenen einzelnen Aktivitäten im eLearning-Umfeld konnte das IMW in den letzten Jahren einen mit den Studierenden abgestimmten neuen Weg beschreiten. Zahlreiche positive Rückmeldungen von Studierenden bestätigen, dass die Lernunterstützung durch neue Medien der Ausbildung zugute kommt. Grundsätzlich wird hier der „Student Centered“-Ansatz mit teilweise pragmatischen Lösungen verfolgt. Unumstößlicher Maßstab bleibt bei all den Weiterentwicklungen das wissenschaftliche Ausbildungsziel, dem alle Aktivitäten zuarbeiten müssen.

Duales modularisiertes Masterstudienangebot Maschinenbau / Mechatronik



Sambale, B.

Die Aufgabe des 3jährigen Projekts „Entwicklung und Akkreditierung von dualen modularisierten Masterstudienangeboten im Bereich Maschinenbau / Mechatronik unter Anwendung eines Leistungspunktesystems“ besteht in der Entwicklung solcher Studienangebote an den beteiligten Hochschulen unter Einbeziehung des Kompetenzzugewinns durch die berufliche Praxis der Studieninteressierten, wobei bei der TU Clausthal besonderes Augenmerk auf Meister/Meisterinnen und staatlich geprüfte Techniker/Technikerinnen gelegt wird, die gemäß der Änderungen im Niederländischen Hochschulgesetz vom 24.07.2002 eine allgemeine Hochschulreife besitzen. Dazu soll das tertiäre Weiterbildungsangebot diesen speziellen Gesichtspunkten durch „offene Curricula“ Rechnung tragen. Auf den Erfahrungen mit existierenden Aufbau-, Ergänzungs- und Weiterbildungsstudiengängen aufbauend, können durch Einsatz von Modularisierung und Leistungspunkten flexible und individuelle duale Studienangebote auf Basis des Europäischen Qualifikationsrahmens (EQF) aufgezeigt und umgesetzt werden.

The task of this triannual project is the design of a dual university Masterstudy program in the field of mechanical engineering and mechatronics with inclusion of existing competences which are gained through vocational education and praxis. The Technical University of Clausthal focuses hereby especially on German „Meister/Meisterinnen“ and „staatlich geprüfte Techniker/Technikerinnen“, who are allowed to study according to the “Niederländischen Hochschulgesetz” from 24.07.2002.

1 Einleitung

Durch die Bologna-Erklärung im Jahr 1999 wurde ein europaweiter Reformprozess gestartet, der bis zum Jahre 2010 einen einheitlichen Hochschulraum in Europa (EHEA) schaffen soll. Dabei fordert der Paragraph 19 des Hochschulrahmengesetzes (HRG) die Umstrukturierung der Diplom-Studiengänge in Bachelor- und Master-Studiengänge. Diese muss besonderen Kriterien unterliegen und mit Sorgfalt geschehen, denn anders als das frühere Vordiplom ist der Bachelor ein eigenständiges berufsqualifizierendes, wissenschaftliches Studium, das zu einem Abschluss führt und somit nicht einfach aus dem

vorherigen System übertragbar ist. Deshalb wurde die gesamte Struktur überdacht und neu überarbeitet, wobei das Studienangebot modularisiert und mit Leistungspunkten versehen werden musste (§9 HRC). Zudem sollte eine Entscheidung getroffen werden, wie viele Semester für das Bachelorstudium gewählt werden sollen. Die Regelstudienzeiten für Bachelor- und Masterstudiengänge betragen mindestens drei höchstens vier Jahre für die Bachelor-Studiengänge und mindestens ein und höchstens zwei Jahre für die Masterstudiengänge (§ 19 HRC). Bei konsekutiven Studiengängen beträgt somit die Gesamtregelstudienzeit höchstens fünf Jahre.

2 Projektablauf

2.1 1. Projektabschnitt

Als erster Projektpunkt stand im Vordergrund, die Voraussetzungen für diesen neuen Studiengang zu schaffen, so unter anderem eine Ermittlung des Bildungsbedarfs auf den Gebieten Maschinenbau und Mechatronik ausgehend von der Erneuerungsrate des Wissensumfanges und der allgemeinen Entwicklung des künftigen Ingenieurbedarfs, sowie Kompetenzen für Studienprofile zu bestimmen und Learning Outcomes zu definieren.

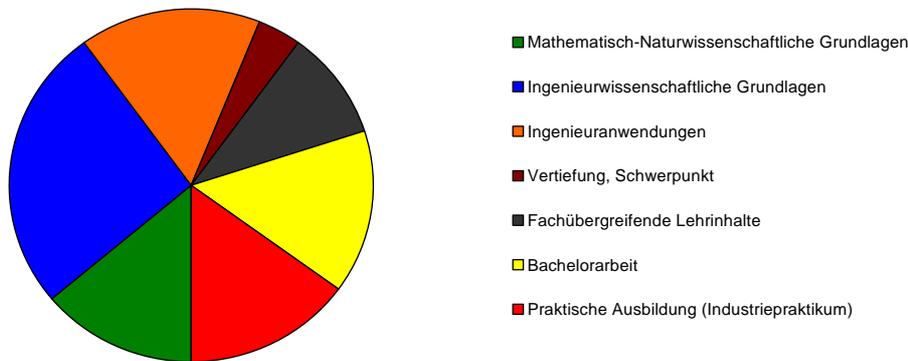


Bild 1: Kompetenzbereiche im Bachelorstudium Maschinenbau/Mechatronik

Betrachtet man die einzelnen Kompetenzbereiche eines wie in **Bild 1** dargestellten Beispielcurriculums eines Maschinenbau-Bachelor-Studienganges, so könnten gut 50% der Curricula schon durch Vorleistungen abgedeckt, bzw. in der Industrie abgeleistet werden (**Bild 2**).

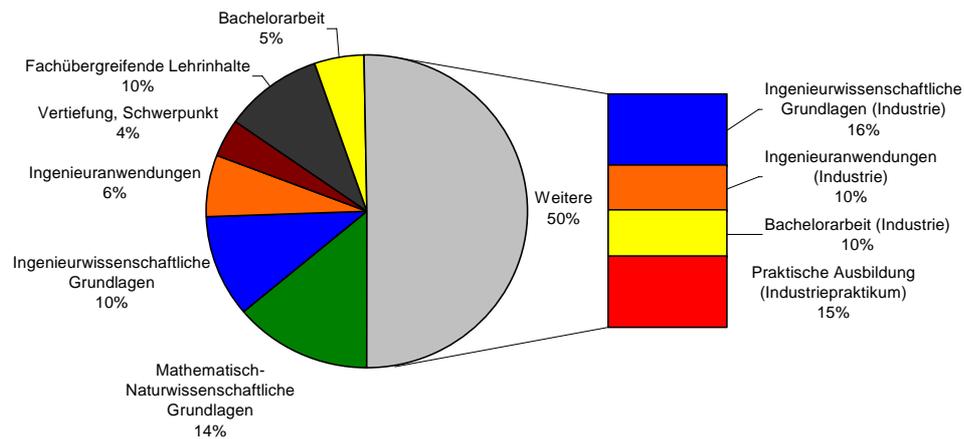


Bild 2: Kompetenzanteile auf vorgelagerten berufspraktischen Ausbildungsanteilen

So wären z.B. im Bereich „Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen“ Fächer wie Technische Mechanik, Strömungsmechanik, Technische Thermodynamik, Elektrotechnik u. Elektronik, Werkstofftechnik u. Chemie, Mess- und Regelungstechnik, etc. durch den Meister/Technikerberuf je nach Arbeitsgebiet schon teilweise (oder sogar vollständig) abgedeckt.

Dieses kann z.B. sehr klar am Modul Produktentwicklung dargestellt werden, wobei die verschiedenen fachabhängigen Kompetenzen, wie Fachwissen, Fachmethodik und –ethik hier folgendermaßen gefordert sein könnten:

- Fachwissen:
 - Technisches Zeichnen
 - Konstruieren (funktions- und fertigungsgerecht)
 -
- Fachmethodik:
 - Systematisches Konstruieren und Berechnen
 -
- Fachethik:
 - Produktsicherheit
 - Produktkosten
 -

Fachunabhängige Kompetenzen, die in diesem Modul gefordert werden könnten unter anderen sein:

- Zeit- und Projektplanung bei Durchführung einer Konstruktionsarbeit
- Erläuterung dieser in englischer Sprache
- ...

Ein Industriemeister hat die meisten Bereiche hiervon schon in seinem täglichen Arbeitsleben und seiner Meisterprüfung abgedeckt.

Ein ähnliches Bild bietet sich im Curriculum des Masterstudienganges. Hierbei entsprechen die in der Industrie ableistbaren Kompetenzen jedoch einem weit geringeren Umfang von ca. 35%.

Dieses begründet sich darin, dass im Masterstudiengang eine fachliche Vertiefung, entweder im ursprünglichen Kernfach des Bachelorstudiums oder in einem anderen Fach (z.B. andere technisch-naturwissenschaftliche Fächer, Wirtschaftswissenschaften etc.) erreicht werden soll, mit besonderem Schwerpunkt auf

- die Vorbereitung, selbstständig wissenschaftliche Methoden zu entwickeln und in der beruflichen Praxis anzuwenden
- die Kompetenz in der Anwendung wissenschaftlicher Methoden in der Praxis zu vertiefen
- die Befähigung zur Entwicklung von Lösungskonzepten für die Praxis auf der Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse
- die Beherrschung von abstrakten, analytischen über den Einzelfall hinausgehenden und vernetzten Denken und
- die Fähigkeit, sich schnell, methodisch und systematisch in Neues, Unbekanntes einzuarbeiten.

Die Anrechnung solcher außeruniversitär erworbenen Kompetenzen ist jedoch kompliziert: Da im Rahmen des Bologna-Prozesses alle universitär erworbenen Abschlüsse miteinander vergleichbar sein sollen, müssen auch außeruniversitär erworbene Qualifikationen, sollten sie für das Studium angerechnet werden, nach gleich bleibenden Kriterien bewertet werden. Dieses wird auch im KMK-Beschluss, vom 28.06.2002 deutlich dargestellt: Die allgemeinen Voraussetzungen für die Anerkennung außeruniversitär erworbener Qualifikationen sind

- Hochschulzugangsberechtigung,
- Gleichwertigkeit nach Inhalt und Niveau,
- Überprüfung der qualitativ inhaltlichen Kriterien für die Anrechnung im Rahmen der Akkreditierung und

- einer Grenze für den Ersatz von Studienleistungen durch außerhalb erworbene Fähigkeiten und Kenntnisse, festgelegt auf 50%.

Die sich nun stellende Frage ist, wie man nun diese außeruniversitär erworbenen Qualifikationen bewertet und anrechnet. Ist eine Einstufungsprüfung notwendig oder existiert auch eine andere Möglichkeit?

Hierzu findet man in der Erklärung von Kopenhagen vom 30. November 2002 und in der Maastricht-Konferenz vom 13.-16.12.2004 europaweite Reformen zur beruflichen Bildung, unter anderem:

- Entwicklung eines offenen und flexiblen Europäischen Qualifikationsrahmens (EQF)
- einheitlicher Transparenzrahmen für Qualifikationen und Kompetenzen (EUROPASS)
- Entwicklung und Einführung eines europäischen Leistungspunktesystems für die Berufsbildung (ECVET)
- bessere Zugänglichkeit der Daten über die Berufsbildung

Das Leistungspunktesystem ECVET (European Credit System for Vocational Education and Training) soll die außeruniversitär erworbenen Kompetenzen nach folgenden Kriterien bemessen (Umrechnungsbedingungen nach Rahmenvorgaben der KMK):

- 1 Jahr = 45 Lernwochen = 1800 Zeitstunden = 60 ECVET
- Mindestlernzeit pro Modul = 5 ECVET
- Volle Punktwerte:
Arbeitsprozesse, die nach Lernzielen gestaltet sind (z.B. betriebliche Ausbildungszeiten)
- Halbe Punktwerte:
Arbeitsprozesse, die nicht nach Lernzielen gestaltet sind (z.B. Berufstätigkeit) soweit die Berufspraxis für Fortbildungsgänge vorausgesetzt wird (z.B. Industriemeisterlehrgang)
- Leistungspunkte der Niveaustufen 1 und 2 werden bei fachlicher Übereinstimmung für die Niveaustufen der Higher Education Area (Stufen 3 bis 6) zu 50% angerechnet

Sowohl das Leistungspunktesystem ECVET, der EQF (European Qualification Framework) als auch der EURO-PASS sind aber noch nicht umgesetzte Systeme, die also noch nicht zur Beurteilung der außeruniversitären und ggf. non-formalen Kompetenzen genutzt werden können. Es existieren aber schon unterschiedliche Ansichten zu Umrechnung und Nutzung der ECVET für das ECTS-System: So geht der

KWB (Positionspapier zu ECVET/ECTS, 2005) von einer Verzahnung von Berufs- und Hochschulbildung bis hin zur Kompatibilität von ECVET- und ECTS-Punkten aus, auf EU-Ebene wird davon gesprochen, einen Transfer von ECVET in das ECTS-System bis zum Jahr 2010 zu ermöglichen (Kopenhagen Prozess TH-1).

Somit ergab sich innerhalb dieses Projekts die Überlegung, in wie weit ECVET-Punkte zu ECTS-Punkten in passenden Studienfächern umgewandelt werden könnten.

In einem Gespräch zwischen der Akkreditierungsgesellschaft ASIIN und der TU Clausthal vom 22.10.2005 sprach sich Herr Dr. Wasser gegen eine „einfache Umwandlung“ von ECVET zu ECTS aus. Er erklärte, dass für eine Akkreditierung eine formale Prüfung durch die Universität zur Anerkennung der ECVET unumgänglich sei. Jede(r) Student(in), egal durch welchen Weg er/sie zur Hochschulreife gekommen sei, müsste seine/ihre Leistungen in derselben Art und Weise von einer Hochschule abgeprüft bekommen. Ähnlich wird es auch im schon angesprochenen KMK-Beschluss vom 28.06.2002 ausgedrückt: Die Anrechnungsentscheidung wird immer von der entsprechenden Hochschule ausgeübt, wobei die pauschalisierte Einstufung, die dieser Beschluss auch ermöglicht, aufgrund der zu erfüllenden Voraussetzungen nur im Rahmen einer konkreten Kooperation zwischen einer Hochschule und einer beruflichen Bildungseinrichtung mit konkret abgestimmten Bildungsinhalten erfolgen kann, so dass eine Einzelfallprüfung entfällt.

2.2 2. Projektabschnitt

Als nächster Projektpunkt standen dann die nächsten Schritte auf dem Weg zum neuen Studiengang auf dem Plan, so unter anderem die Ausarbeitung der Curricula nach Inhalt und Struktur. Für die Kopplung innerhalb des dualen Studienangebots, war dabei der Gesichtspunkt praxisgerechter Flexibilität beim Erwerb der erforderlichen Qualifikation unter Berücksichtigung der differenzierten Vorkenntnisse und das Quantifizieren der Lehrleistungen der Universitäten und der Industrie durch die Einführung eines Leistungspunktesystems (ECTS) auf Grundlage von Lehr-/Lernmodulen zu beachten.

Meister/Meisterinnen und staatlich geprüfte Techniker / Technikerinnen bringen zusätzlich zu den informellen auch noch eine große Anzahl formal erworbener Kompetenzen mit zum Studienbeginn. So belegen sie unter anderem Fortbildungsmaßnahmen und durchlaufen mehrere Prüfungen in staatlichen Institutionen. Diese Maßnahmen werden meist in der örtlichen HWK (Handwerkskammer) und in von der IHK (Industrie- und Handelskammer) zertifizierten Ausbildungsorganisationen, z.B. der REFA (Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung), abgeleistet.

Diese Institutionen bieten sich für einen Kooperationsvertrag und damit einer Übernahme der dort erworbenen Kompetenzen an, durch:

- Umfassende Rahmenstoffpläne mit Lernzielbeschreibungen.
- Kleingliedrige Darstellung der Lernziele und Prüfungsinhalte.
- Meisterprüfungsausschüsse besitzen erstmals eine bundeseinheitliche Verordnung für das Zulassungs- und Prüfungsverfahren /1/ (Meisterprüfungsverfahrensordnung vom 01.01.2002).
- Handlungsorientierte, auf das Ziel hin formulierte Anwendungstaxonomie (siehe **Tabelle 1**).
- Abnahme der Prüfung nicht in „Fächern“, sondern durch drei komplexe Situationsaufgaben, deren Kerninhalt jeweils aus einem Handlungsbereich (Technik - Organisation – Führung und Personal) besteht. (Reform der Industriemeister-Prüfung 1998):
 - Ausrichtung an den betrieblichen Situationsaufgaben
 - zwei komplexe, praxisnahe Aufgaben je vier Stunden
 - Fachgespräch: Erörterung dritte Aufgabe
- Die Inhalte aus den Themengebieten Technik, Organisation und Personalführung sind in jeder Aufgabe enthalten und miteinander kombiniert

Taxonomie-Ebene	Beschreibung der Taxonomie-Ebene	Zugeordnete Begriffe der Anwendungstaxonomie
Wissen (Kenntnisse)	Erwerb von Kenntnissen, die notwendig sind, um Zusammenhänge zu verstehen	beherrschen (kognitiv), kennen, überblicken
Verstehen (Zusammenhänge)	Erkennen und Verinnerlichen von Zusammenhängen, um komplexe Aufgabenstellungen und Problemfälle einer Lösung zuführen zu können	analysieren, begründen, beurteilen, bewerten, einordnen, einsehen, erfassen, erkennen, festlegen, feststellen, strukturieren, unterscheiden, vergleichen, verstehen, zuordnen
Anwenden (Handlungen)	Fähigkeit zu sach- und fachgerechtem Handeln, das aus dem Verstehen der Zusammenhänge resultiert	anwenden, ausüben, auswählen, beachten, beherrschen (praktisch), durchführen, einleiten, fördern, mitwirken, planen, skizzieren, umsetzen, etc.

Tabelle 1: Taxonomie der Lernziele laut Rahmenstoffplan zum Industriemeister Metall [2]

Entscheidend für die Bewältigung der Aufgabenstellung ist nicht nur das hinreichende Fachwissen in den einzelnen Qualifikationsschwerpunkten, sondern die Fähigkeit zum Wissenstransfer und zur Verknüpfung der erworbenen Qualifikationen.

Die in diesen Institutionen erworbenen Kompetenzen sind also gut nachvollziehbar dokumentiert, zertifiziert und unterliegen einer bundeseinheitlichen Qualitätskontrolle.

Wenn man die Taxonomie der Lernziele aus **Tabelle 1** mit dem Qualifikationsrahmen für deutsche Hochschulabschlüsse auf Bachelor-Ebene (siehe **Tabelle 2**) vergleicht, erkennt man, dass diese ähnliche Bedingungen stellen und somit Vergleiche innerhalb der erbrachten Leistungen vereinfachen. Die Kategorien „Wissen und Verstehen“ bzw. „Wissen“ und „Verstehen“, beschreiben die zu erwerbenden Kompetenzen (Learning Outcomes) in Bezug auf den fachspezifischen Wissenserwerb (Fachkompetenz). Die Kategorien „Können“ bzw. „Anwenden“ beschreiben die Kompetenzen, die einen Absolventen dazu befähigen, Wissen anzuwenden (Methodenkompetenz), und einen Wissenstransfer zu leisten. Darüber hinaus finden sich hier die kommunikativen und sozialen Kompetenzen wieder.

Wissen und Verstehen	Können (Wissenserschließung) Absolventen haben folgende Kompetenzen erworben	Formale Aspekte
Wissensverbreiterung Wissen und Verstehen von Absolventen bauen auf der Ebene der Hochschulzugangsberechtigung auf und gehen über diese wesentlich hinaus. Absolventen haben ein breites und integriertes Wissen und Verstehen der wissenschaftlichen Grundlagen ihres Lerngebietes nachgewiesen.	Instrumentale Kompetenz <ul style="list-style-type: none"> • ihr Wissen und Verstehen auf ihre Tätigkeit oder ihren Beruf anzuwenden und Problemlösungen und Argumente in ihrem Fachgebiet zu erarbeiten und weiterzuentwickeln. 	Zugangsvoraussetzungen <ul style="list-style-type: none"> • Hochschulzugangsberechtigung • entsprechend den Länderregelungen zum Hochschulzugang für beruflich qualifizierte Bewerber ohne schulische Hochschulzugangsberechtigung
Wissensvertiefung Sie verfügen über ein kritisches Verständnis der wichtigsten Theorien, Prinzipien und Methoden ihres Studienprogramms und sind in der Lage ihr Wissen vertikal, horizontal und lateral zu vertiefen. Ihr Wissen und Verstehen entspricht dem Stand der Fachliteratur, sollte aber zugleich einige vertiefte Wissensbestände auf dem aktuellen Stand der Forschung in ihrem Lerngebiet einschließen.	Systemische Kompetenzen <ul style="list-style-type: none"> • relevante Informationen, insbesondere in ihrem Studienprogramm zu sammeln, zu bewerten und zu interpretieren • daraus wissenschaftlich fundierte Urteile abzuleiten, die gesellschaftliche, wissenschaftliche, und ethische Erkenntnisse berücksichtigen; • selbständig weiterführende Lernprozesse zu gestalten 	Dauer (einschl. Abschlussarbeit) 3, 3,5 oder 4 Jahre (180, 210 oder 240 ECTS Punkte) Abschlüsse auf der Bachelor-Ebene stellen den ersten berufsqualifizierenden Abschluss dar.
	Kommunikative Kompetenzen <ul style="list-style-type: none"> • fachbezogene Positionen und Problemlösungen zu formulieren und argumentativ zu verteidigen; • sich mit Fachvertretern und mit Laien über Informationen, Ideen, Probleme und Lösungen austauschen; • Verantwortung in einem Team übernehmen. 	Anschlussmöglichkeiten Programme auf Master- (bei herausragender Qualifikation auch direkt auf Promotions-) Ebene, andere Weiterbildungsoptionen
		Übergänge aus der beruflichen Bildung Außerhalb der Hochschule erworbene und durch Prüfung nachgewiesene Qualifikationen und Kompetenzen können bei Aufnahme eines Studiums von der jeweiligen Hochschule durch ein Äquivalenzprüfverfahren in einer Höhe angerechnet werden, die den Leistungsanforderungen des jeweiligen Studiengangs entspricht
Qualifikationsrahmen Bachelor 180, 210, 240 ECTS		

Tabelle 2: Qualifikationsprofil für die Bachelor-Ebene /5/

Gespräche über einen Kooperationsvertrag mit der IHK Hannover laufen bereits. In diesen Gesprächen muss geklärt werden, welche Bereiche durch die angebotenen Fortbildungen abgedeckt werden und welche Module damit ganz oder auch nur teilweise ersetzt werden könnten.

Ein Annerkennungsszenario könnte dann wie folgt aussehen:

Ein/e Antragsteller/in bekommt vor Studienbeginn je nach Studienschwerpunkt einen Anerkennungsbogen (**Bild 4**), auf dem die durch vorher erworbene formelle oder informelle Kompetenzen anzuerkennenden Fächer von ihm/ihr vermerkt werden. Dieser Anerkennungsbogen wird durch Portfolios ergänzt, je anzuerkennendem Fach ein Portfolio. Dieses Portfolio sollte authentische Belege von erbrachten Leistungen (Zeugnisse, Urkunden, etc.) und Erläuterungen des Antragstellers zu den Aufgabengebieten und Tätigkeiten im anzuerkennenden Kompetenzbereich beinhalten. Die Kompetenzbereiche teilen sich in drei Teilbereiche auf, zu denen jeweils ungefähr eine Seite geschrieben werden sollte. Diese Kompetenzbereiche sind: Selbständigkeit und Verantwortung, kommunikative Kompetenz sowie fachliche und berufliche Kompetenz.

Diese Portfolios werden dann durch die entsprechenden Fachdozenten bzw. einem Hochschulgremium geprüft. Je nach erbrachter Art (bei einem Kooperationspartner, formell bei einer anderen Weiterbildungsstelle, informell in einer ehrenamtlichen Tätigkeit o. ä.) und

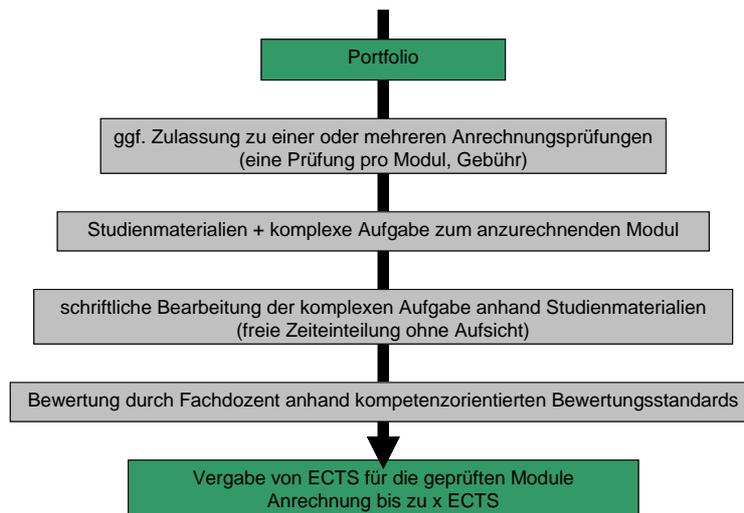


Bild 3: Anerkennungsablauf



Anmeldung zur Anerkennung beruflicher Vorleistungen

TU Clausthal
Adolph-Planck-Straße 29
30775 Clausthal-Zercherfeld

ausgegeben: _____
erfasst: _____

Bitte in blockbuchstaben schreiben!

Persönliche Daten		
Familienname		Vorname
Titel	Geburtsname	
Geburtsort	Tag	Monat
	Jahr	
Vorbereitung auf 'Übalt'		
Stärke		NW
PLZ		Ort
Gewicht	minimale wertchen	M <input type="checkbox"/> W <input type="checkbox"/>
Tourenzahl		
Tourenleitung		
EMail		

Anforderungen: Der Bewerber muss die in der Aufgabenstellung genannten Bedingungen erfüllen. Die Bewerberin muss die in der Aufgabenstellung genannten Bedingungen erfüllen.

Auswahl der zu bewerbenden Ausbildungsstellen	Anzahl der Bewerberinnen	Anzahl der Bewerber

Belegliste: Bitte die Belegnummer mitbringen!

Belegnummer	Belegtitel

Belegliste der zu bewerbenden Ausbildungsstellen:

Ausbildungsstellen	Anzahl der Bewerberinnen

Bild 4: Anerkennungsbogen

Grundlagen (Fortsetzung)	Themenbereich
Mathematische Grundlagen	Techn. Thermodynamik I
Eigenschaften von Stoffen	Techn. Thermodynamik II
Allgemeine Eigenschaften	Ingenieurwissenschaften
Elektrotechnik	Grundlagen
Grundlagen der Elektrotechnik	Techn. Zeichnen/CAD
Mechanik	Maschinenbau
Technische Mechanik I	Maschinenbau I
Technische Mechanik II	Maschinenbau II
Maschinenbau	Maschinenbau III
Maschinenbau I	Maschinenbau IV
Maschinenbau II	Maschinenbau V
Maschinenbau III	Maschinenbau VI

Spezialgebiete	Themenbereich
Ingenieurwissenschaften	Ingenieurwissenschaften

Antrag auf Zulassung: Ich beantrage die Zulassung zum Studium der angegebenen Studiengänge für die von mir gezielte Prüfung. Ich bestätige, dass ich die angegebenen Angaben in diesem Antrag sowie die Ausbildungswahlungen von der relevanten Stelle an der Prüfung ausgetauscht und die Prüfung für nicht bestanden erklärt werden kann.

Sonstige Hinweise: Die Prüfungswahlungen sind nach Erhalt des Gebührenscheins unter Angabe der Rechnungsnummer zu bezahlen.

Datenschutz: Ich bestätige, dass meine persönlichen Daten gespeichert und verwaltet werden dürfen. Die Speicherung der Daten dient auch dem Zweck, Bewerberinnen für die Zulassung auszuwählen.

Erklärung: Ich bestätige die Richtigkeit der Angaben und der Ausbildungsstellen.

 (Ort, Datum) _____
 (Unterschrift)

Qualität der Vorleistung kann im Anschluss eine komplexe Aufgabe (**Bild 3**) oder Einzelprüfung beim Antragsteller angefordert werden. Diese Ausarbeitung der komplexen Aufgabe sollte ca. 7 Seiten umfassen und unter Bezugnahme auf eigene Praxiserfahrungen, Kenntnisse und zusätzliche Unterlagen (Studienmaterialien, Recherche,...) erstellt werden. Eine Ergebnispräsentation und ein anschließendes Fachgespräch sollten am Ende durchgeführt werden. Sowohl das Portfolio als auch die komplexe Aufgabe sollten unter folgenden Bewertungskriterien betrachtet werden:

- fachliches Wissen und Verstehen (wesentlich über Abitur-Niveau),
- instrumentelle Kompetenzen (u.a. Anwendung des Wissens bei einer Problemlösung),
- systemische Kompetenzen (z.B. für die Aufgabe relevante Informationen in den zur Verfügung gestellten Studienunterlagen zu sammeln, zu bewerten und zu interpretieren) und
- kommunikative Kompetenzen (u.a. fachlich angemessene schriftliche Argumentation).

Wenn das Modul es zulässt (z.B. Mathematik), kann anstelle einer komplexen Aufgabe eine Einzelprüfung stattfinden. Diese kann auch innerhalb einer regulären Studienprüfung erfolgen.

Durch diesen recht komplexen Vorgang könnte auch bei Antragstellern mit nicht bei Kooperationspartnern erworbenen Kompetenzen der Nachweis erbracht werden, dass der/die Antragsteller/in über Kenntnisse und Kompetenzen verfügt, die in Bezug auf die Lerninhalte gleichwertig sind zu den Kenntnissen, Kompetenzen und dem Niveau der Lernergebnisse, die im Rahmen des Studiums innerhalb des anzurechnenden Moduls zu erwerben sind.

Durch dieses Verfahren können somit nicht nur Meister/innen und staatlich geprüfte Techniker/innen außeruniversitäre Kompetenzen anerkennen lassen, sondern auch alle anderen gemäß geltendem Niedersächsischen Hochschulgesetz (NHG) hochschulzugangsberechtigten Antragsteller/innen.

3 Ausblick

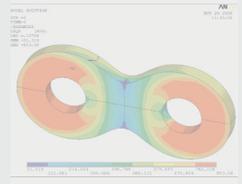
Durch die kürzliche Bildung der NTH (Niedersächsischen Technischen Hochschule) wurde die Einführung von Bachelor- oder Master-Studiengang für Maschinenbau an der TU Clausthal bisher noch nicht eingeführt und die neuere Planung sieht dieses auch erst frühestens im Wintersemester 2008/2009 vor.

Aus diesem Grunde konnte die für das Jahr 2007 vorgesehene Akkreditierung des dualen Studienganges nicht durchgeführt werden. Auch eine Systemakkreditierung kam hierfür nicht infrage. Trotz dieser „Stolpersteine“ besteht der Kontakt mit der IHK Hannover weiterhin und die Umsetzung des Projekts wird weiter fortgeführt. Meister und staatlich anerkannte Techniker können das Anerkennungsverfahren durchlaufen – Leistungen werden jedoch nicht pauschal anerkannt sondern nur individuell.

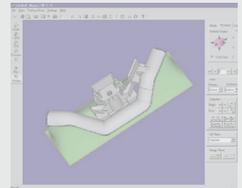
4 Literatur

- /1/ Handbuch für Mitglieder von Prüfungsausschüssen
- /2/ „Qualifizierung für meisterliches Handeln“; Claus Drewes, Gerd Gidion, Dietrich Scholz, Dieter A. Wortmann (Hrsg.)
- /3/ „Handbuch Kompetenzmessung“; Erpenbeck, von Rosenstiel (Hrsg.)
- /4/ KMK-Beschluss 21.04.2005
- /5/ Die Akkreditierung von Bachelor-Master-Studiengängen, Dieter Hannemann

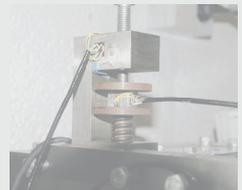
Konstruktion und Berechnung
von Maschinenelementen



Konstruktionsmethodik und
rechnerunterstützte
Produktentwicklung



Systementwicklung, Versuchstechnik
und Maschinenakustik



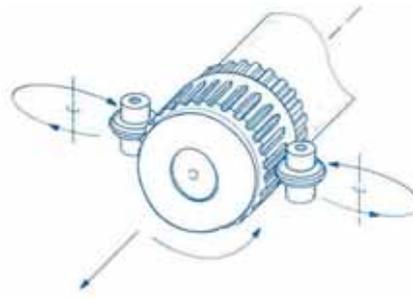
Lehre und Institutsbetrieb



Hochschule und Kontakte



Fertigung von Zahnrädern in metallischen Ringen durch Walzkaltumformung



Labastida, C.

Die Herstellung eines Zahnrades erstreckt sich im Allgemeinen über mehrere Schritte, besonders wenn das spannende Herstellungsverfahren genutzt wird, wo mindestens ein Grobschneid-, Feinschneid-, Härte- und Korrekturverfahren eingesetzt wird. Kaltumformung bietet eine kostengünstige Möglichkeit zur Herstellung, wo viele Verfahren in einem Schritt gefertigt werden können. Die Anwendung erfordert einige Vorüberlegungen oder die Fertigungsergebnisse könnten unzureichend sein. In diesem Artikel wird eine Analyse der Kaltumformung von Zahnrädern in metallischen Ringen vorgeschlagen, die mit Novikov-, Evolventen- und Zykloidalprofilen umgeformt werden.

For the fabrication of a gear, it is needed some necessary steps, specially where material removing methods are been used. Normally, it is necessary a coarse and fine cutting method, although harden and rectification methods. Cold work offers a low cost manufacturing method, where many of these steps can be made in just one. The use of cold work methods need some considerations, otherwise the results could be disastrous. This article gives a proposal for the analysis to cold work applied to gears based in metallic rings, which would be produced with a Novikov-, Evolvente or Cicloidal profile.

1 Einleitung

In diesem Artikel wird über die Simulation einer Zahnherstellung durch Kaltumformung im Längswalzverfahren auf dem äußeren Radius eines metallischen Ringes gesprochen. Dazu wurden im wesentlichen 4 Kenngrößen variiert, d.h. Modul (2-11 mm), Wanddicke (20-75 mm), äußerer Durchmesser (100 – 200 mm) und der Eingriffswinkel; alle diese Variationen wurden für drei unterschiedliche Verzahnungen genutzt (Evolvente-, Novikov- und Zykloidenverzahnungen). Es wurden insgesamt 96 verschiedene Simulationen durchgeführt /1/.

2 V- und hyperbolisches Verhalten

Wenn die Verzahnung durch Kaltumformung gewalzt wird, können zwei Verhalten der Mises-Spannungen, die von der Wanddicke und der Zahnhöhe abhängen, erkannt werden /1/. Das V-Verhalten präsentiert sich, wenn das Verhältnis zwischen Zahnhöhe und Wanddicke größer als ca. 20% ist.

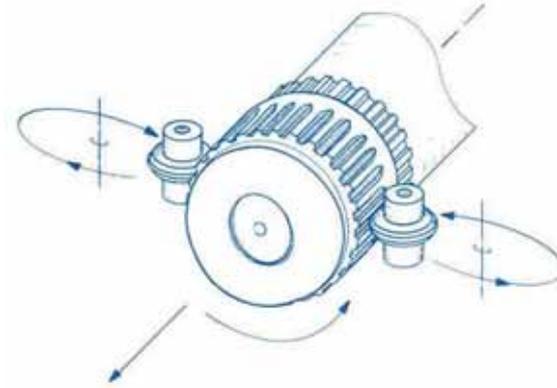


Bild 1: Längswalzkaltumformung

Beim V-Verhalten tritt die größte Spannung in der Nähe der Hauptumformung auf, danach verringert sich die Spannung ohne die Null-Linie zu durchkreuzen, anschließend steigt die Mises-Spannung wieder an [Bild 2].

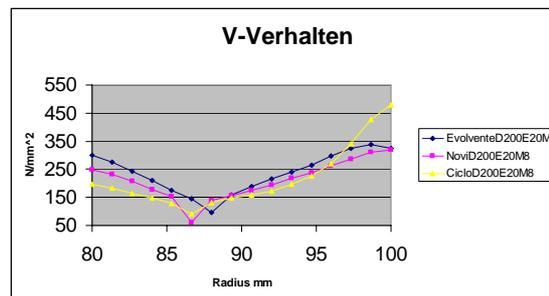


Bild 2: V-Verhalten

Beim V-förmigen Spannungsverlauf sind die Mises-Spannungen hoch am inneren und äußeren Radius und der Verlauf über dem Radius ähnelt einem V.

Beim hyperbolischen Verhalten vermindert sich die Mises-Spannung immer weiter ohne den im V-Verhalten erkannten Anstieg. Die zweite Ableitung am Minimum ergibt sich niedriger als die beim V-Verhalten [Bild 3].

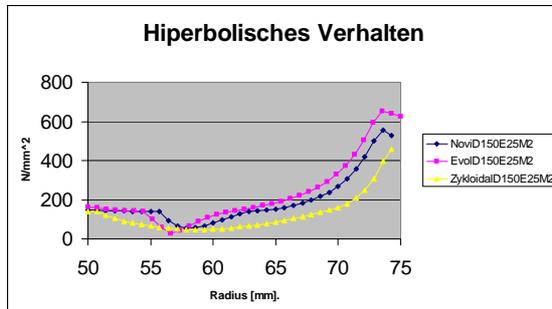


Bild 3: Hyperbolisches Verhalten

Mit einem zweidimensionalen Modell kann man gut das Verhalten der Kaltumformung darstellen, dabei betrachtet man zwei Hauptspannungen, die in radialer und Umfangsrichtung verlaufen. Während der Kaltumformung verhält sich ein Teil des Ringes wie ein belasteter Balken [Bild 4], deswegen gibt es Zugspannungen auf der Gegenseite der Hauptumformungsseite, wo sich Druckspannungen ergeben. Weil es einen Werkstofffluss gibt, werden bleibende Umformungen erzeugt. Diese Vorgänge werden vom Verhältnis Zahnhöhe zu Wanddicke beeinflusst. Je größer das Verhältnis ist, desto größer ist der Einfluss der Biegespannung, d.h. die vom Werkstofffluss erzeugten Spannungen verlieren an Bedeutung.

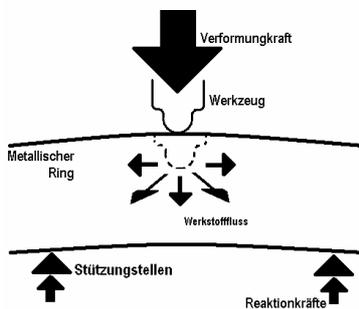


Bild 4: Spannungen werden vom Werkstofffluss und Biegung erzeugt

Die radialen Spannungen werden hauptsächlich vom radialen Werkstofffluss erzeugt. Die Umfangsspannungen hängen vom Werkstofffluss in Umfangsrichtung und Biegung des Ringes ab.

$$\sigma_r = f(\text{radialer Werkstofffluss})$$

$$\sigma_\theta = f(\text{Umfangswerkstofffluss, Biegung})$$

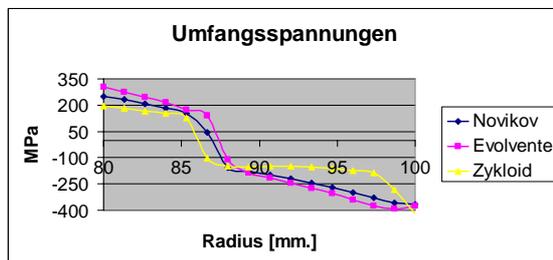


Bild 5: Umfangsspannungen bei V-Verhalten. (Durchmesser 200 mm; Wanddicke 20 mm; Modul 8 mm)

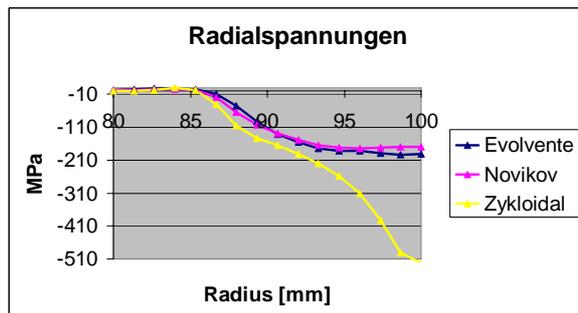


Bild 6: Radialspannungen bei V-Verhalten. (Durchmesser 200 mm; Wanddicke 20 mm; Modul 8 mm)

Beim Zykloidenprofil ist die Spannung im äußeren Radius bedeutungsvoll, weil dieses partikulär Profil wie ein Spannungsverstärker wirkt [Bild 6]. Beim V-Verhalten ist die Schräge am Anfang und Ende der Kurve fast gleich, aber in der Mitte ist sie ganz anders [Bild 5]. Dieses Verhalten ist ähnlich wie das Verhalten in einem belasteten Balken, aber mit einer Verschiebung in der Mitte.

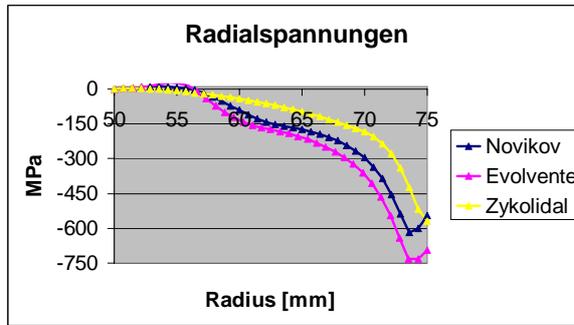


Bild 7: Radialspannungen, hyperbolisches Verhalten (Durchmesser 150 mm; Wanddicke 25 mm; Modul 2 mm)

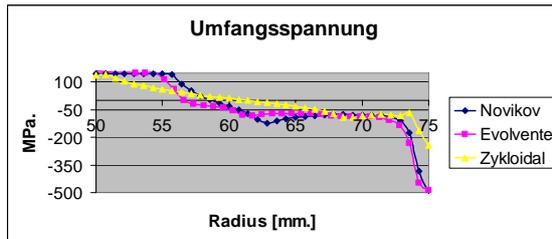


Bild 8: Umfangsspannungen, hyperbolisches Verhalten (Durchmesser 150 mm; Wanddicke 25 mm; Modul 2 mm)

Die maximale Mises-Spannung im Novikov und Evolventen - Profil verringert sich, wenn das Verhältnis zwischen Zahnhöhen und Wanddicke sich erhöht (s. **Bild 9**).

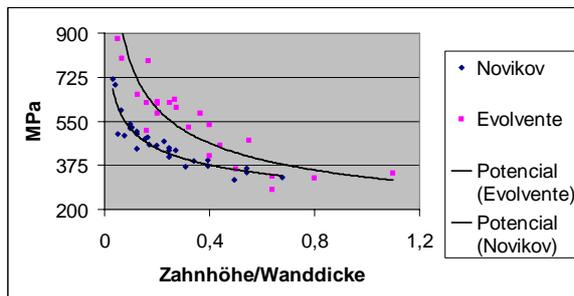


Bild 9: Mises'sche Spannungen, wenn sich das Verhältnis zwischen Zahnhöhen und Wanddicke verändert

3 Misessche Ellipse

Wenn die zweite Hauptspannung als Null betrachtet werden kann, ist die Mises'sche Spannung durch eine Ellipse bestimmt, deren Achsen zur ersten und dritten Hauptspannung gehören.

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_I - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2}{2}}$$

Wenn $\sigma_{II} = 0$, denn:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sigma_I^2 + \sigma_{III}^2 + (\sigma_I - \sigma_{III})^2}{2}}$$

Bild 10 zeigt die Lage der Ellipse beim V-Verhalten. Risse bilden sich am inneren und äußeren Radius der Ringe aus. Am inneren Radius infolge der Zugspannung in Umfangsrichtung und am äußeren Radius wegen der Druckspannung in Radial- und Umfangsrichtung. Die Umfangsspannung ist die erste Hauptspannung und die dritte Hauptspannung ist die Radialspannung im dritten Quadranten. Im ersten Quadranten liegt die erste Hauptspannung, die Umfangsspannung.

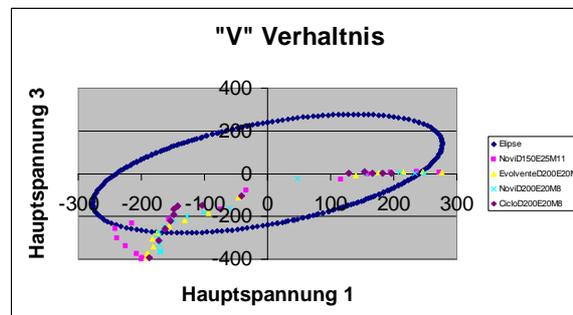


Bild 10: Mises'sche Ellipse bei V-Verhalten

Bild 11 zeigt die Ellipse für hyperbolisches Verhalten. Ein Riss bildet sich nur am äußeren Radius infolge der Druckspannungen in radialer und Umfangsrichtung aus. Die Umfangsspannungen bilden die erste Hauptspannung und die Radialspannungen die dritte Hauptspannung im dritten Quadranten.

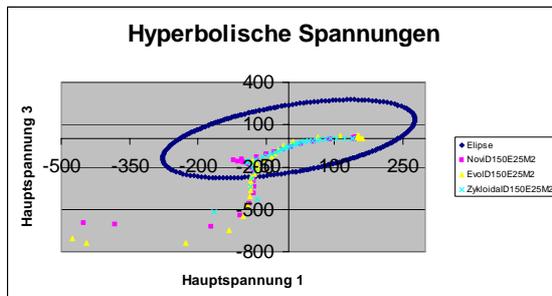


Bild 11: Mises'sche Ellipse bei hyperbolischem Verhalten

Eine Aufteilung der Gesamtverformung in eine Vorverformung und eine Endverformung kann den Fertigungsprozess verbessern /3/. Eine Vorverformung verkleinert den Werkstofffluss, und die Hauptspannungen verschieben sich näher an die Ellipse. Mit FEM-Berechnungen ist es möglich, eine Aussage zur Größe der Vorverformung zu treffen. Es muss angemerkt werden, dass mit den FEM-Berechnungen die Untergrenze der realen Mises'schen Spannungen ermittelt werden können, werden spezielle Randbedingungen eingeführt, kann auch eine Aussage zur oberen Spannungsgrenze erfolgen.

Durch eine Druckkraft in axialer Richtung kann die zweiten Hauptspannungen erhöht und daher eine Steigerung der hydrostatischen Spannungen bewirkt werden. Je höher die hydrostatischen Spannungen, desto niedriger die Mises'schen Spannungen. Werden die drei Hauptspannungen betrachtet, kann noch eine Ellipse gezeichnet werden, dazu ist die dritte Koordinate notwendig, deren Berechnung ist:

$$\sigma_I^N = \sigma_I - \sigma_{II}$$

$$\sigma_{III}^N = \sigma_{III} - \sigma_{II}$$

Eine Minderung der Biegespannung kann durch einen Wechseln der Stützstellen erreicht werden, und außerdem durch eine Vorverformung. Im betrachteten Fall reichen diese Maßnahmen nicht um den Bruch zu vermeiden, ein Axialdruck in der Nähe der Verformung könnte Abhilfe schaffen.

Beim hyperbolischen Verhalten sollte die Vorverformung größer ausfallen als beim V-Verhalten.

3.1 Bruchwahrscheinlichkeit

Die Simulationen wurden mit dem Werkstoff AlMg3, dessen Bruchspannung zwischen 220 – 260 N/mm² liegt, durchgeführt. Wenn solche Grenzwerte in einer Normalverteilung mit ca. 95,45% der Merkmalswerte betrachtet werden, gelten folgende Betrachtungen:

$$\mu = \frac{\sigma_{Bruch\ max} + \sigma_{Bruch\ min}}{2}$$

$$S = \frac{\sigma_{Bruch\ max} - \sigma_{Bruch\ min}}{4}$$

Wobei μ der Mittelwert und S die Standardabweichung bedeuten. Wenn die größte Mises-Spannung angenommen wird, dann ist es möglich die Bruchwahrscheinlichkeit zu berechnen. Für jede Simulation ist eine einzige Zahl notwendig, daher wurde folgende Art der Identifizierung genutzt:

$$e = \ln\left(\frac{D \cdot W}{m^2}\right)$$

Es bedeutet „e“ die identifizierende Zahl, D – Durchmesser, W – Wanddicke, m – Modul, dann wird die Bruchwahrscheinlichkeit durch die normalisierte Gaußsche Verteilung ermittelt:

$$z_e = \frac{\sigma_{Mises,e} - \mu}{S}$$

$$\phi(z_e) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_e} e^{-\frac{z_e^2}{2}} dz_e$$

Bei allen Simulationen war die Bruchwahrscheinlichkeit gleich 100% für alle Lastfälle. Eine zweite negative Hauptspannung bedeutet eine Verschiebung der Mises-Ellipse in den dritten Quadranten. Damit liegen einige der höchsten Mises-Spannungen im plastischen Bereich, die Bruchwahrscheinlichkeit vermindert sich.

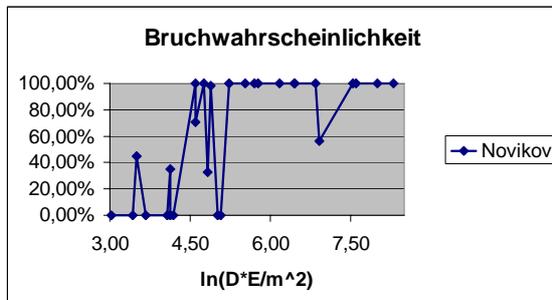


Bild 12: Bruchwahrscheinlichkeit für einen Novikovzahn mit der zweiten Hauptspannung $S_2 = -200 \text{ N/mm}^2$

Ein Maß für die Bruchwahrscheinlichkeit ist der Bereich unter der Kurve (Z_e) (s. **Bild 12**),

$$I = \int_{e_{\min}}^{e_{\max}} \phi(z_e) de$$

I ist eine Zahl zwischen Null und I_{\max} , wobei I_{\max} gleich $e_{\max} - e_{\min}$ ist.

$$I_{\max} = e_{\max} - e_{\min}$$

Wenn alle Variationen eine Null-Wahrscheinlichkeit haben, dann ist „ I “ gleich Null. Ein Vergleich zwischen den verschiedenen Profilen kann durch die normalisierte Zahl „ K “ durchgeführt werden. K ist eine Zahl zwischen 0 und 1, deren Wert aus I/I_{\max} berechnet werden kann.

$$K = \frac{I}{I_{\max}}$$

Das Minimum in **Bild 13** zeigt, wie groß die erfolgte Verbesserung infolge einer drückenden zweiten Hauptspannung ist. Wenn K gleich Null ist, gibt es keine Bruchwahrscheinlichkeit für alle möglichen Variationen. Je höher das Minimum liegt, desto schlechter ist die Verbesserung durch den axialen Druck. Ohne Vorverformung ist die benötigte drückende zweite Hauptspannung sehr hoch, trotzdem zeichnet sich für das Novikov- und Zykloidenprofil eine wichtige Verbesserung ab.

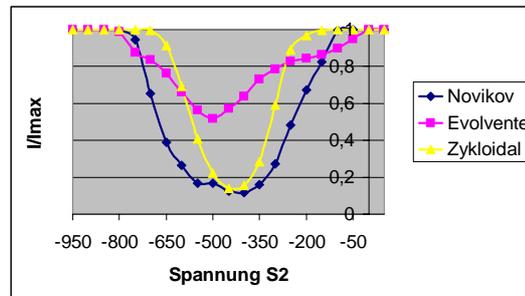


Bild 13: Verbesserung der Bruchwahrscheinlichkeit durch drückende zweite Hauptspannung

4 Fazit

Das Verhalten der Mises'schen Spannungen hängt von den erzeugten Biege- und Werkstoffflussspannungen ab. Ohne Vorverformung ist die Kaltumformung unwahrscheinlich. Ein axialer Druck kann die Umformbedingungen verbessern, aber ohne Vorverformung ist ein sehr hoher Druck erforderlich.

5 Ausblick

Der Vorteil der Kaltumformung liegt in der gleichzeitigen Umformung und Härtung des Werkstücks. Zu klären ist, wie groß die Vorverformung sein muss, um die höchste Härtung bei der kleinsten Umformspannung zu realisieren.

Der gegenwärtige Artikel beschäftigt sich nur mit der Längswalzkaltumformung. Es ist zu klären, wie hydrostatische Spannungen in Quer- und Schrägwalzumformprozessen erzeugt werden.

6 Literatur

- /1/ Labastida, C. Simulación por medio de MEF para la fabricación de dientes por medio de rolado en frío. Tesis, Universidad Panamericana, 2007.
- /2/ Labastida, C. FE-Simulation zur Herstellung von Zahnraden mit Novikov-Profil, Diplomarbeit, TU Clausthal, 2005
- /3/ Dietz, Wächter. Zahnradverbindungen mit Novikovprofil, IMW - Institutsmitteilung Nr. 30 (2005)

Untersuchungen dynamischen Verhaltens von Getrieben mit Standard- und Hoch- verzahnungen



Skoc, A., Wieczorek, A.

Im Maschinenbau spielen heutzutage dynamische Untersuchungen eine große Rolle, sie sind besonders wichtig für Antriebe, die bei Zahnradgetrieben eingesetzt werden. Damit das dynamische Verhalten vom Getriebe in der Bewertungs-, Entwicklungs-, Herstellungs- bzw. Betriebsphase vorausgesehen werden kann, werden Kenntnisse über das dynamische Verhalten von Getrieben und die Ursachen der Intensivierung benötigt. In letzter Zeit weisen Konstrukteure besonderes Interesse an Getrieben mit Hochverzahnung und Verzahnungsfaktor $\varepsilon_a \approx 2,0$ auf. Bisher wurden die dynamischen Eigenschaften von hochverzahnten Getrieben im Vergleich zu anderen Getrieben nicht genug erforscht. In diesem Artikel werden die neuen Versuchsergebnisse dargestellt. In diesen Versuchen sollte ermittelt werden, ob die Hochverzahnung die dynamischen Zahnkräfte reduziert und wie groß der Einfluss bei dem Vergleich mit der Standardverzahnung ist.

In machine designing dynamic phenomenon research was put foreword in the spotlight, mainly it must be related to driving units, where are commonly applied some gear trains. One could foreseen a dynamic state of a gear train in some fazes of valuation, design, manufacturing and exploitation, there is necessary to have a knowledge about dynamical phenomena occurring in a gear train as well as recognition of reasons of their intensification. In recent years important interest of designers is excited by high tooth profile gears with transversal contact ratio 2,0. Some dynamic properties those gears have not been recognized sufficiently in comparison to other gears. In the paper there is presented some experimental results, which were carried out to know, if and how much using high profile tooth some contact forces are decreasing comparatively to standard profile tooth.

1 Einführung

Für die häufig zum Einsatz kommenden Zahnradgetriebe haben die technischen und wirtschaftlichen Merkmale, wie Lebensdauer, Leistung, Wirkungsgrad als auch Zuverlässigkeit eine besondere Bedeutung.

Die Kopplungen mit Antriebsmotor und abtriebsverbundenen Zahnradgetriebe erzeugen ein federelastisches System mit bestimmten Massen, die bei Anregung schwingen. Diese Schwingungen, die selbst auch anregend wirken, entstehen aus äußeren Quellen, wie Antrieb oder Abtrieb, bzw. inneren Teilen von Getrieben und werden durch die ganze Anlage geleitet. Beim Entwurf von Getrieben hat man keinen Einfluss auf äußere dynamische Einflüsse, die die Anregung verursachen können. Doch bestimmte Konstruktions- und Technologische Parameter der entworfenen Getriebe lassen sich so wählen, dass der innere Anregungseinfluss verkleinert wird.

Einer der wichtigsten Gründe der dynamischen Anregung ist die Änderung der Steifigkeit der Verzahnung durch das Variieren der Anzahl der im Eingriff befindlichen Zahnpaare.

Wie die Arbeiten /1-8/ gezeigt haben, kann die Steigerung der Profilüberdeckung eine Lärminderung bringen. Deutlich ist auf **Bild 1** sichtbar, wo die Rechnungsergebnisse der Anregungspegel L_A in Abhängigkeit von Profilüberdeckung und Sprungüberdeckung nach /5/ dargestellt sind.

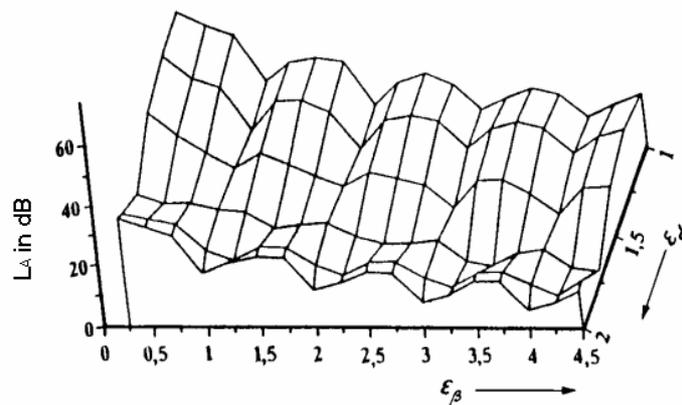


Bild 1: Rechnungsergebnisse des Anregungspegels L_A in Abhängigkeit von der Profilüberdeckung und Sprungüberdeckung nach /5/

In Verbindung mit dargestellten Ergebnissen im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Vergleich dynamischen Verhaltens zwischen Getrieben mit verschiedenen Profilüberdeckungen durchgeführt.

2 Ziel, Bereich und Voraussetzungen der Untersuchungen

Das Ziel der in diesem Artikel vorgestellten Untersuchungen war der Vergleich des dynamischen Verhaltens zwischen Getrieben mit Hochverzahnung (Profilüberdeckung $\approx 2,0$ und $\approx 1,625$) und Getrieben mit Standardverzahnung ($\approx 1,625$). Sie wurden auf einem Prüfstand Typ FZG durchgeführt (**Bild 2**).



Bild 2: Der Prüfstand mit Messgeräten

Der Prüfstand besteht aus folgenden Teilen:

- 2 Beschleunigungsaufnehmer Typ 4335 Bruel&Kjaer mit Ladungsverstärker,
- Analysator – ein Messerfassungssystem, das auf DAQBoard 2005 Iotech basiert.

Das System wird durch ein DasyLAB 6.0 von National Instruments (USA) betrieben.

Die Parameter der untersuchten Zahnräder wurden in der **Tabelle 1** zusammengefasst.

Untersuchungs- räder	h^*	ε_a	c_{gm}	n_E	ζ_f Ritzel/Rad
STS	2,25	1,625	18,26	7857	-2,314/-2,192
WS-3.0	3,0	2,030	16,94	7655	-3,905/-3,904
WS-2.7	2,7·m	1,625	14,04	7132	-2,212/-2,288

Tabelle 1: Parameter der untersuchten Verzahnungen, wobei h^* -Zahnhöhenfaktor, ε_a - Profilüberdeckungsgrad, c_{gm} - mittlere Gesamtfedersteifigkeit, n_E - Resonanzdrehzahl, ζ_f - spezifisches Gleiten (am Fuss).

Als Werkstoff für die Zahnräder wurde Stahl 41Cr4 verwendet und sie wurden wärmebehandelt (verbessert). Alle untersuchten Zahnräder wurden nach der Genauigkeitsklasse Nr. 7 nach DIN 3962 hergestellt. Die Messungen wurden im Frequenzbereich von 89 Hz bis 1300 Hz und mit dem Lastfaktor $Q = 2T/(b \cdot dt^2)$ /9/ von 0,18 bis 0,89 MPa durchgeführt.

Aufgrund gemessener Torsionsbeschleunigungen wurde das dynamische Übermaß N_v ermittelt, welches mit der folgenden Formeln bestimmt wurde:

$$N_v = \frac{M_{din}}{M_{st}} \quad (1)$$

Mit M_{din} – dynamisches Moment, das in der Verzahnung generiert ist,

M_{st} – statische Moment.

3 Versuchsergebnisse

Auf den **Bildern 3-5** sind die festgestellten Verläufe des dynamischen Übermaßes N_v , der Verzahnungen bei den Lastfaktoren $Q = 0,18$; $0,54$ und $0,89$ MPa dargestellt.

Auf den **Bildern 3-5** weist das Getriebe mit der Hochverzahnung WS-3.0 viel niedrigere Werte des dynamischen Übermaßes N_v als die Standardverzahnung auf. Aber man sieht auch bei der Steigerung der Lastmomente, dass der Unterschied zwischen den Verläufen des dynamischen Übermaßes N_v für Hochverzahnung und Standardverzahnung abnimmt.

Das Getriebe mit der Zahnhöhe $h = 2,7$ mm (WS-2.7) weist auch niedrigere Werte des dynamischen Übermaßes N_v als die Standardverzahnung auf. Nur bei einer 1/4 Hauptresonanzfrequenz zeigt dieses Ge-

triebe höhere Werte des dynamischen Übermaßes N_v als die Standardverzahnung.

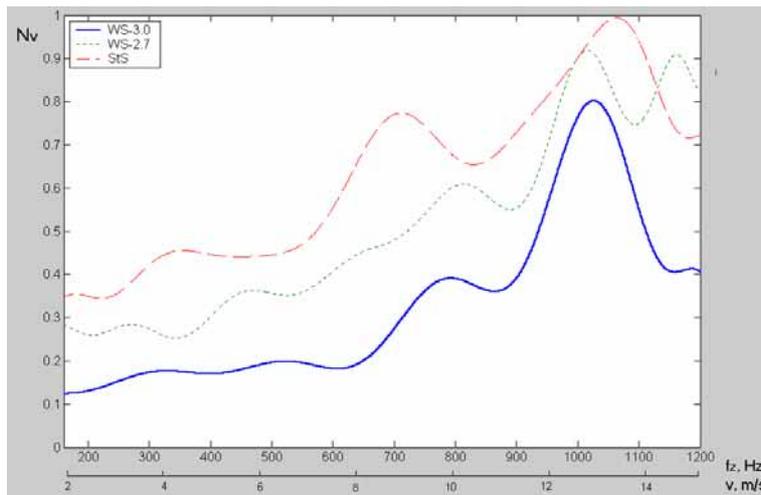


Bild 3: Verläufe des dynamischen Übermaßes N_v für die Varianten: WS-3.0, WS-2.7 und StS bei dem Lastfaktor $Q = 0,18$ MPa.

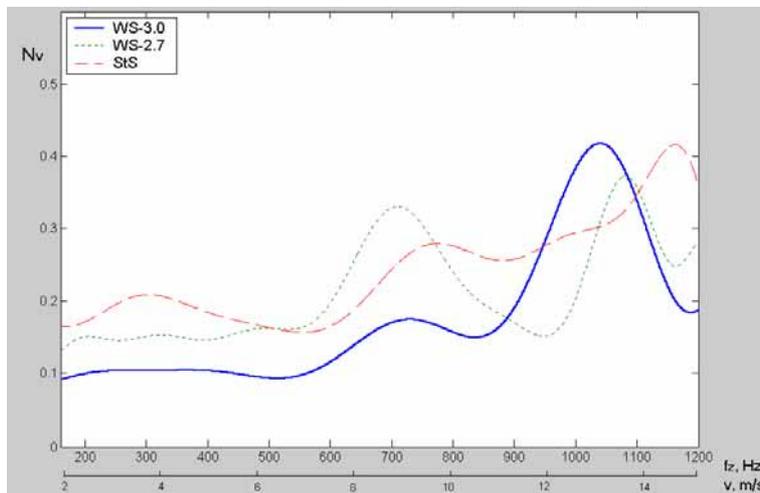


Bild 4: Verläufe des dynamischen Übermaßes N_v für die Varianten: WS-3.0, WS-2.7 und StS bei dem Lastfaktor $Q = 0,54$ MPa.

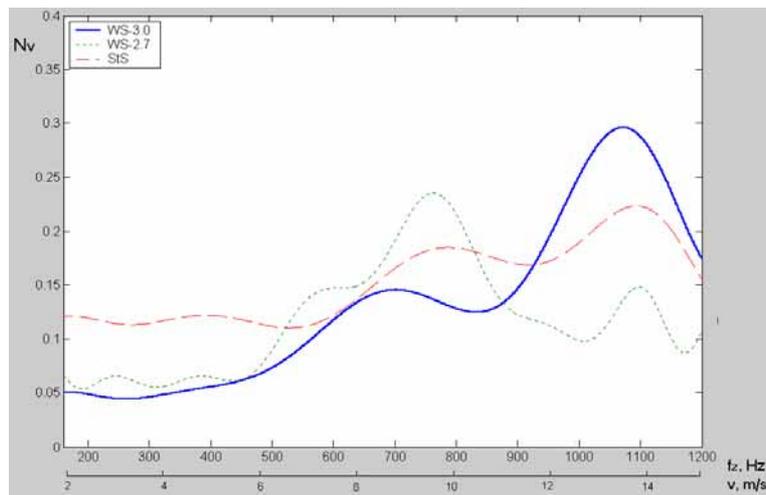


Bild 5: Verläufe des dynamischen Übermaßes N_v für die Varianten: WS-3.0, WS-2.7 und StS bei dem Lastfaktor $Q = 0,89$ MPa.

4 Zusammenfassung

Aufgrund der vorgestellten Messergebnisse der Torsionsbeschleunigungen können folgende Schlussfolgerungen formuliert werden:

Die Räder mit der Profilüberdeckung $\approx 2,0$ haben das beste dynamische Verhalten von allen untersuchten Zahnradgetrieben.

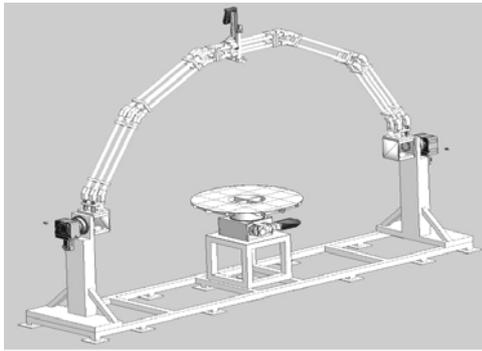
Bei Laststeigerung nimmt die Güte bei der Verzahnung ab, die einen ganzzahligen Profilüberdeckungsgrad ($\approx 2,0$) hat.

Die Getriebe mit Hochverzahnungen WS-3 und WS-2.7 weisen niedrigere Werte des dynamischen Übermaßes N_v im Vergleich zur Standardverzahnung auf.

5 Literatur

- /1/ Weck, M, Lachenmaier S.: Auslegung evolventischer Sonderverzahnungen für schwingungs- und geräuscharmen Lauf. Industrie-Anzeiger, 105/1983.
- /2/ Weck, M.: Moderne Leistungsgetriebe. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo 1995.
- /3/ Knabel, W.: Geräusche und Schwingungen an Stirnradgetrieben. Untersuchung geometrischer Einflüsse bei hohen Drehzahlen und Belastungen. Diss. TU München, 1977.

- /4/ Lachenmaier, S.: Auslegung von evolventischen Sonderverzahnungen von Schwingungs- und geräuscharm Lauf von Getrieben. VDI-Forschungsberichte Reihe 11, Nr. 54; Düsseldorf 1983. Diss. RWTH Aachen.
- /5/ Müller, R.: Schwingungs- und Geräuschanregung bei Stirnradgetrieben. Diss. TU München, 1990.
- /6/ Salje, H.: Konstruktive Geräuschkinderungsmaßnahmen durch gezielte Profilkorrekturen und Hochverzahnungen. Forschungsvorhaben Nr. 98/I, Frankfurt 1985.
- /7/ Salje, H.: Tragfähigkeits- und Geräuschuntersuchungen an Hochverzahnungen - Abschlussbericht. Forschungsvorhaben Nr. 98/II, Frankfurt 1987.
- /8/ Döbereiner, R.: Tragfähigkeit von Hochverzahnungen geringer Schwingungsanregung. Diss TU München, 1998.
- /9/ Niemann, G., Winter H.: Maschinenelemente, t. II : Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe - Grundlagen, Stirnradgetriebe. Berlin, Springer, 1989.



Automation of acoustic measurements in an anechoic chamber

Batko, W.; Felis, J.; Kamisiski, T.; Wierzbicki, J.

Eine große Zahl von Messpunkten und die notwendige Wiederholbarkeit während der Ermittlung von

Richtcharakteristiken machen den Einsatz von automatischen Messerfassungssystemen erforderlich. In diesem Artikel ist ein Konzept für das Stellglied des Positionierungssystems im schalltoten Raum dargestellt. Es wird außerdem Konzept für ein universelles Messerfassungs- und Distributionssystem beschrieben.

A large number of measurements positions and measurements repetition during e.g. directivity pattern recognition cause necessity of apply of automated measurement systems. The article presents a concept for an actuator for positioning of the measurement system in an anechoic chamber and a concept of universal storage system for gathering and distribution of measurement data.

6 Introduction

The special character of acoustic measurements in an anechoic chamber requires designs that minimize disturbances to the acoustic field. Automation always involves the introduction of additional mechanical elements, which disturb this field but such disturbances are definitely less than influence of human staff.

7 An actuator for positioning of the measurement system

Automation of acoustic measurements in an anechoic chamber is a real challenge to designers. The special character of the measurements calls for solutions that minimize the disturbance to the acoustic field whereas automation systems always introduce additional mechanical elements which disturb the free acoustic field in an anechoic chamber. The anechoic chamber in questions is a reinforced concrete

cubic shell resting on spring vibroinsulators. All the internal surfaces are covered with sound absorbing systems in the form of 1.2 m long wedges. The working floor has the form of a steel rope net suspended at a height of 0.3 m above the wedge apices. On the chamber roof there is a room housing a hoist and a ventilation system. The chamber's outside dimensions are 10.4m [H] x 10.2m x 9.7m, the inside dimensions are 6.9m (H) x 7.2m x 6.8m, and the volume is 821.5m³. The chamber weighs about 600 tons and with the vibroinsulation in place the chamber's natural frequency is about 5 Hz.

The main goal of the manipulator under construction is to ensure greater precision, versatility, to facilitate the research work and teaching, and to conform to procedures specified in relevant standards. Analyses and studies so far show that these procedures require proper positioning of the microphone – chiefly on the hemisphere surface.

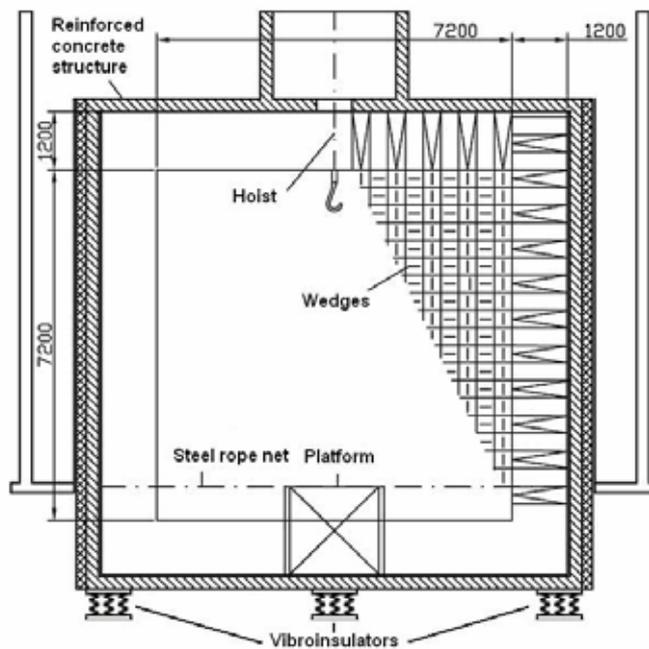


Figure 1: Vertical cross-section of the anechoic chamber



Figure 2: The hoist positioned over the chamber roof



Figure 3: The housing with springs located in the central point of support

Practically most geometric and dynamic requirements allowing automation of measurements are typical of the measurement procedures identified below:

Determination of the acoustic power level of noise sources (PN-EN ISO 3745:2005), Determination of directional characteristics of sound diffusion for electroacoustic transducers (PN-EN 60268-5:2005),

Determination of sound distribution pattern on a pre-set measurement grid, Multipoint studies of structures and sound sources using the impulse response method.

The measurement of acoustic power (PN-EN ISO 3745:2005), typical of the most frequent and most labour-consuming studies that require positioning of the measurement points on the hemisphere, was taken as a starting point for developing the idea of manipulator move-

ments. Practically all the procedures mentioned above require positioning the microphone on the hemisphere surface and identifying directional characteristics of the source-object-microphone system. An exception is the determination of the sound intensity distribution on a plane measurement grid or on a grid matching the special shape of the machine studied. The latter option calls for special equipment and can be implemented in the future.

The structure of the chamber was analysed in terms of the possibility of installing a manipulator for measurements, with special regard to acoustic disturbance that can be caused by its drive system. Three possible concepts of positioning the manipulator were considered: on the chamber roof, under the floor slab and inside the chamber. The first two concepts were found difficult to implement: the first one, due to the increased length of the driving energy transmission path from the manipulator motors to the actuator units. This concept does not require breaking through the chamber's reinforced concrete owing to the presence of existing technological openings. The difficulty with the second concept is that it requires breaking through the chamber's reinforced concrete structure. Also, it turned out that the floor slab is supported in its central point (**Fig. 3**) which prevents positioning the axle of any drive in the centre. The concept of installing the manipulator drives inside the chamber proved most convenient for implementation in terms of construction. **Figs. 4 and 5** show the selected variants of the manipulator concepts considered, and **Fig. 6** shows the variant selected for implementation.

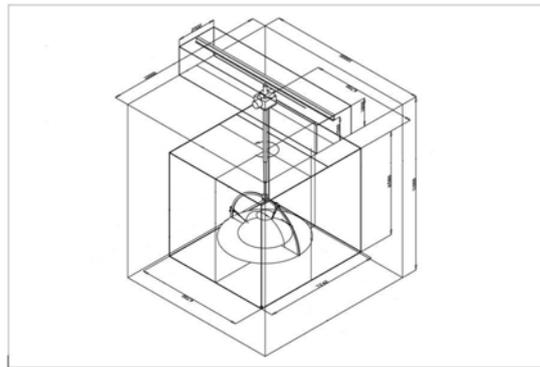


Figure 4: A concept of the manipulator with the drive positioned above the chamber

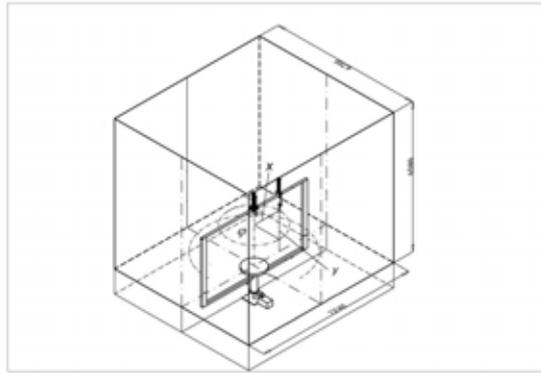


Figure 5: A concept of the manipulator with the drive positioned under the chamber

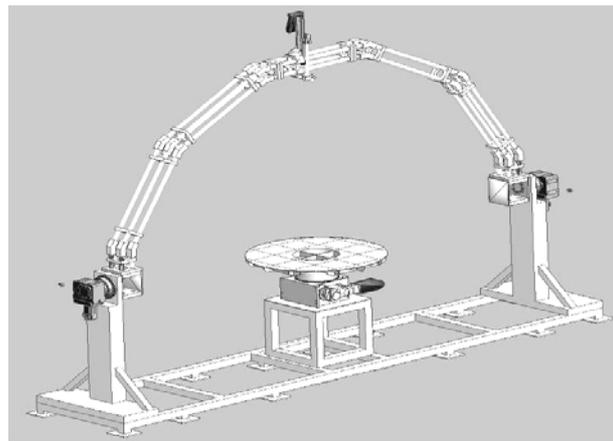


Figure 6: The concept of the manipulator selected for implementation

During the design work, several concepts of the manipulator design were analysed. The key problems in developing the concept were in ensuring the required rigidity of the supporting system structure under the assumed working space and the number of the device's degrees of freedom.

Ultimately it was decided that the device will have three degrees of freedom and the working space will be a hemisphere. One degree of freedom will be ensured by the rotation of the measurement turntable positioned in the centre of the chamber; the second degree of freedom will be ensured by a rotating frame supported by bearings positioned on the horizontal axis of the table plane thereby making it

possible to change the angular position of the measurement system relative to the object studied. The third degree of freedom allowing the hemisphere radius to be changed will be ensured by installing a linear movement module on the rotating frame.

8 A storage system for data gathering and distribution

Technical solutions currently available allow gathering of acoustic and non-acoustic measurement data, e.g. air parameters, pictures or video. Most often measurement team goes to measurement point, sets up measurement equipment (sonometer) and additional equipment (camera etc.) and starts measurement. Usually it is several hours long and the presence of the team is necessary to control the SLM, register manipulator position.

In case of long term measurement it is inconvenient and demands engaging people for a long time. The solution for such a problem might be an automated storage system.

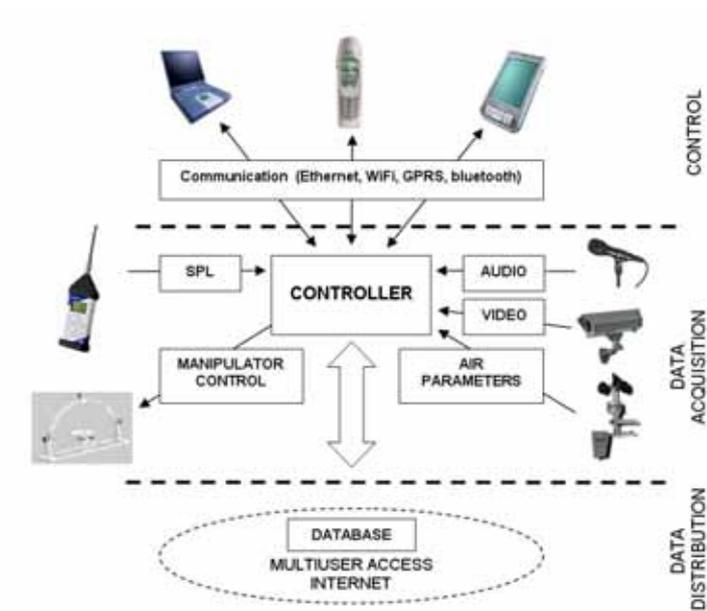


Figure 7: A storage system for gathering and distribution of acoustic and non-acoustic measurement data

The storage system schematic presented in **Fig. 7** shows: control module, communication and setting module and data distribution

module. System controller is based on single board computer equipped with physical memory of 80GB. Measurement devices: SLM, manipulator, air parameter station and other modules are controlled by the central controller.

By means of cell technologies (GPRS) and radio networking the controller might be programmed from the mobile computers: laptops or Pocket PC's. The communication is held on bluetooth or WiFi. That allows system programming and data transfer without using a physical connection by a cable (but that is also possible for example for maintenance).

The transmission (for control or data transfer) is protected with the access code generated in the controller. The code is unique for each control device. The code check appears once in a minute and if the correct data is received automatically a connection is set up with the control device and since that moment the user has access to the settings of the parameters. The access codes and the access software for the measurement session programming might be installed on many mobile computers and are independent from the operation system.

If in the proximity of the station a Pocket PC or laptop is found the authorization takes place and the connection is set up and the data transfer or programming is possible. The control software allows:

- programming of the measurement session: start time, end time, name of the session. The application protects against wrong or incomplete data entry or the conflict with the earlier settings,
- preview of the gathered data, it is possible to view particular data during the measurement time (e.g. listening to the audio file),
- after the measurement it is possible to transfer the full data and to fully index them in the database,
- it is possible to quickly transfer the data on additional temporary storage (mass storage), transfer the data from the hard drive of the controller to the mobile computer, copying the measurement data to storage connected to the USB interface (hard drive or FLASH memory).

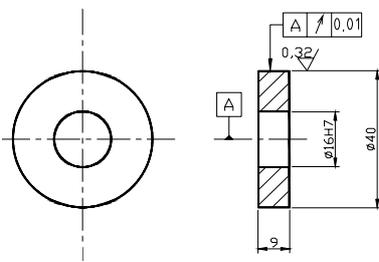
9 Summary

The result of the project was development of technological solution providing automation of process of acoustical and non-acoustical data gathering. The flexibility of the system allows implementation of other measurement modules and widening the usage range. That solution influences the number and the quality of the processed data.

By analyzing the virtues and faults of the system one might state that such solution will reduce the total cost of the measurements.

10 References

- /1/ Kamisiski, T.; Flach, A.: A uniplanar manipulator for precision acoustic studies, Archives of Acoustics. 2006 vol. 31 no. 4 suppl. p. 235-238
- /2/ Batko, W.; Borkowski, B.; Głocki, K.: An example of mutual correlation of information – relations in secondary tables in acoustical data gathering, updating and distribution systems, XXXV Winter School on Wave and Quantum Acoustics 2007



Einflussuntersuchung der Aufkohlschichtdicke auf Abriebverschleiß eines Werkstoffs für Zahnradgetriebe

Wieczorek, A.

In diesem Artikel werden die Ergebnisse von Abriebverschleißversuchen der Proben aus Stahl 20H2N4A beschrieben. Diese Proben unterscheiden sich in der Dicke der aufgekohlten Schicht. Diese Versuche wurden auf der Maschine AMSLER bei Laufreibung mit Schlupf durchgeführt. Im Rahmen des Vorhabens wurden die Härteverteilung und Kohlenkonzentration in der Oberschicht der Proben gemessen. Es wurde festgestellt, dass der Verschleiß bei größerer ausgehärteter Schicht größer wird.

In the paper there are presented some experimental results of 20H2N4A steel samples wearing characterizing by varying thickness of carburized layer. Some experiments were carried out on an AMSLER test stand in conditions of rolling friction with sliding. In the domain of the research there was carried out a measurement of distribution of hardness and coal concentration in sample's surface layer. It was found that increased wear was occurred with rising thickness of hardened surface layer.

11 Einleitung

Der Verschleiß ist eine der Hauptmerkmale für die Ausnutzung der Verzahnung während des Betriebs. In der ersten Phase des Getriebebetriebs ist dieser Prozess besonders erwünscht, weil sich die zusammenarbeitenden Flächen anpassen und die Zähne besser anliegen /2/. Aufgrund des fortgeschrittenen Zahnverschleißes /3/ können folgende Merkmale auftreten:

- Hoher Verschleiß des Zahnkopfs
- Hoher Verschleiß des Zahnfußes
- Ablagerung des Abriebmaterials in dem Getriebe
- Überschreitung der maximalen Werte des Zwischenzahnspiels

Zum Abrieb der ausgekohlten Oberschicht /4,5,6,7,8,9/ führen folgende Faktoren:

- a) Technologie und Werkstoffe
- b) Parameter der Oberschicht
- c) Arbeitsbedingungen des Reibungspaares

12 Ziel, Gegenstand und Bedingungen der Versuche

Als Ziel der Versuche wurde die Ermittlung des Einflusses der Dicke der aufgekohlten Schicht auf den Abriebverschleiß definiert, unter besonderer Betrachtung am Anfang des Betriebs.

Bei Abriebverschleißversuchen von Stirnrädern wird ein gleitend – wälzendes Modell der Zahnpaare angenommen, deren Kontakt als zwischen zwei äquivalenten parabolischen Walzen mit Radien ρ_1 und ρ_2 (**Bild 1**) definiert ist. Unter diesem Verhalten mit gleichen Lasten und kinematischer Ähnlichkeit wurde dieses Modell auf der Maschine Typ AMSLER /3/ untersucht.

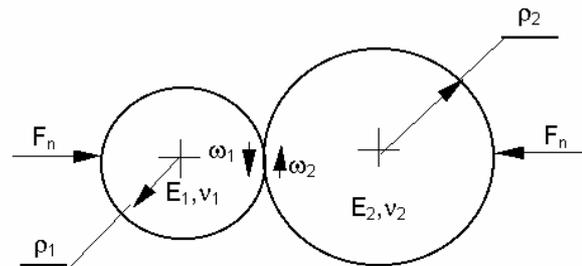


Bild 2: Ein Modell des Zahnpaars

In diesen Versuchen wurden Proben aus Stahl 20H2N4A (**Bild 2**) mit einer Aufkohlschichtdicke von 1 mm, 1,5 mm, 2,2 mm und 3,0 mm untersucht.

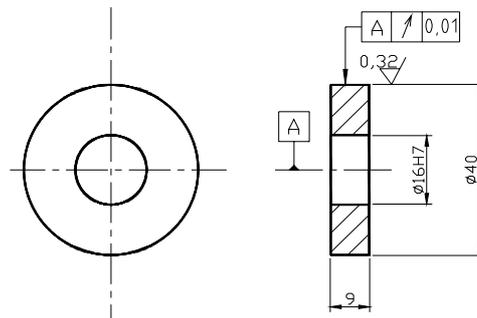


Bild 2: Abmaße der Proben

Die Wärmebehandlungsparameter der untersuchten Proben sind in der **Tabelle 1** zusammengefasst.

Werkstoff		20H2N4A
Aufkohltemperatur		910 °C
Härtetemperatur		860 °C
Temp. für das Anlassen bei niedriger Temperatur		200 °C
Probe F3	Dicke der ausgehärteten Schicht	s=1,0 mm
	Aufkohlzeit [h]	8
Probe F4	Dicke der ausgehärteten Schicht	s=1,5 mm
	Aufkohlzeit [h]	15
Probe F5	Dicke der ausgehärteten Schicht	s=2,2 mm
	Aufkohlzeit [h]	20
Probe F13	Dicke der ausgehärteten Schicht	s=3,0 mm
	Aufkohlzeit [h]	30
Härtezeit [H]		2
Kühlmittel		Öl OH – 70

Tabelle 1: Wärmebehandlungsparameter der Proben

Die Verschleißversuche /1/ wurden auf der Abriebmaschine AMSLER (**Bild 3**) durchgeführt. Auf dieser Maschine lassen sich zwei Arten von Reibung (Gleit-, bzw. Gleit – Wälz-) zwischen den Zahnpaaren realisieren. Folgende Betriebsparameter wurden eingestellt:

- Reibungsart: Gleitreibung
- Gegenläufige Bewegung der Stirnräder
- Belastungsart: konstante radiale Kraft $F = 200 \text{ N}$ bzw. $F = 400 \text{ N}$
- Kontaktbreite der Proben: $b = 4 \text{ mm}$
- Drehzahl: $n_1 = 200 \text{ min}^{-1}$ und $n_2 = 400 \text{ min}^{-1}$
- Umfangsgeschwindigkeit der Proben: $v_p = 0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und $v_p = 1,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- Schmierungsart: Spritzschmierung mit Öl TRANSOL VG-220 (Viskosität bei 40 °C gleich $220 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
- Werkstoff für die Gegenprobe: Stahl 40H mit Härte 59 HRC



Bild 3: Der Prüfstand AMSLER

13 Versuchsergebnisse

In den durchgeführten Versuchen wurde der Masseverlust der untersuchten Probe als Maß für den Verschleiß angenommen. Der Masseverlust der Probe wurde alle 10 Minuten während des Versuchs mittels einer analytischen Waage (Genauigkeit $\pm 0,5$ mg) ermittelt. Die Dauer des gesamten Versuchs betrug 120 min.

Zeit, [min]	Masseverlust, g			
	s=1,0 mm	s=1,5 mm	s=2,2 mm	s=3,0 mm
10	0,299	0,294	0,359	0,341
20	0,401	0,395	0,534	0,524
30	0,411	0,400	0,544	0,536
40	0,412	0,401	0,549	0,541
50	0,415	0,404	0,552	0,543
60	0,419	0,405	0,555	0,543
70	0,421	0,406	0,559	0,545
80	0,423	0,410	0,559	0,546
90	0,424	0,411	0,560	0,546
100	0,427	0,411	0,564	0,547
110	0,427	0,414	0,568	0,547
120	0,428	0,417	0,568	0,548

Tabelle 2: Messergebnisse von Masseverlust für Versuchsproben bei Schlupfgeschwindigkeit $v=0,88$ m/s.

Zeit, min	Masseverlust, g			
	s=1,0 mm	s=1,5 mm	s=2,2 mm	s=3,0 mm
10	0,203	0,253	0,388	0,384
20	0,224	0,264	0,419	0,423
30	0,233	0,279	0,443	0,465
40	0,267	0,288	0,468	0,678
50	0,293	0,300	0,480	0,806
60	0,316	0,315	0,524	0,851
70	0,345	0,331	0,621	0,924
80	0,410	0,341	0,638	0,963
90	0,463	0,368	0,776	1,031
100	0,506	0,370	0,793	1,035
110	0,565	0,380	0,808	1,040
120	0,647	0,394	0,871	1,042

Tabelle 3: Messergebnisse von Masseverlust für Versuchsproben bei Schlupfgeschwindigkeit $v=1,76$ m/s.

In den **Tabellen 2 und 3** sind die Ergebnisse des Masseverlusts für die untersuchten Proben aufgelistet. Auf den **Bildern 4 und 5** sind Diagramme in der Form einer exponentiellen Trendlinie dargestellt.

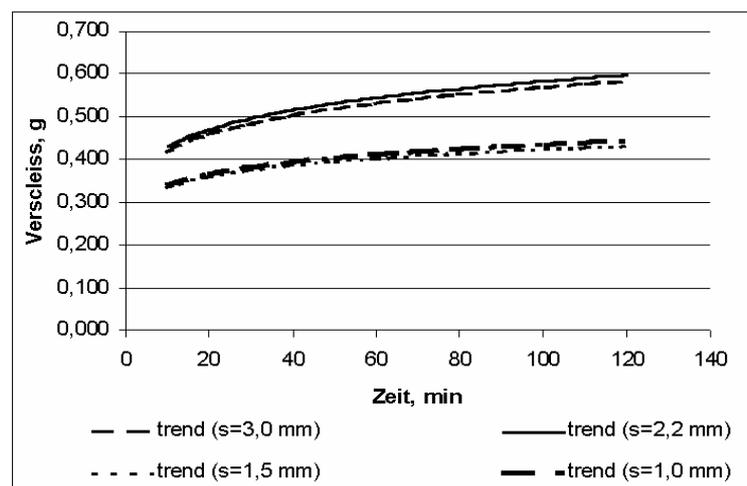


Bild 4: Trendlinien für untersuchten Proben bei unterschiedlichen Dicken von aufgekohlten Schicht s bei Schlupfgeschwindigkeit $v=0,88$ m/s.

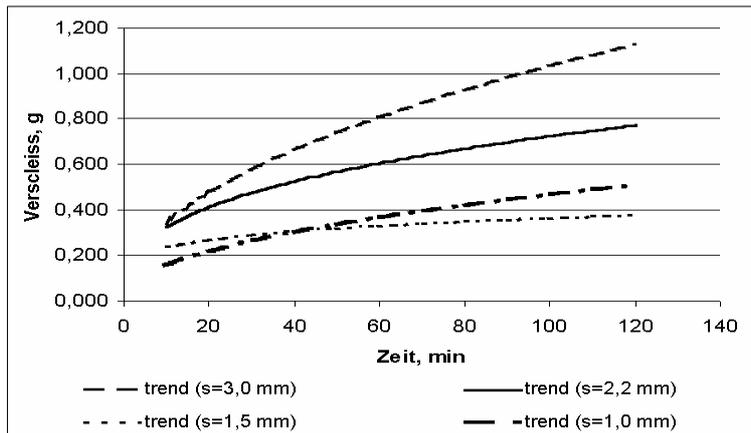


Bild 5: Trendlinien für untersuchten Proben bei unterschiedlichen Dicken von aufgekohlten Schicht s bei Schlupfgeschwindigkeit $v=1,76$ m/s.

Anhand der **Bilder 4 und 5** lässt sich ablesen, dass die Ergebnisse für Proben mit einer Aufkohlschicht von $s=1,0$ mm und $s=1,5$ mm ähnlich sind. Im Fall von Proben mit einer Aufkohlschicht von $s=2,2$ mm und $s=3,0$ mm sehen die Werte für niedrigere Schlupfgeschwindigkeit auch ähnlich aus. Bei höherer Schlupfgeschwindigkeit ($v=1,76$ m/s) weisen dieselben Proben größere Abriebmerkmale auf.

Nach der genaueren Betrachtung der Wärmebehandlungsparameter der Proben (**Tabelle 1**) lässt sich beobachten, dass die Länge der Wärmebehandlung mit den Dicken der Aufkohlschicht steigt. In der Zeit der Wärmebehandlung kommt es zu intensiver Oxidation der Oberschicht der Probe, welche bei längeren Wärmebehandlungszeiten dicker wird /10/.

14 Zusammenfassung

Diese Ergebnisse zeigen, dass die längere Wärmebehandlung der Proben eine Bedeutung für den Abriebverschleiß hat. Deutlich größerer Verschleiß lässt sich erkennen, wenn die Proben länger als 15 Stunden wärmebehandelt wurden.

15 Literatur

- /1/. Norma PN-82/H-04332 Badanie zużycia metali lub ich warstw dyfuzyjnych w procesie tarcia ślizgowego przy stałym nacisku na maszynie Amslera
- /2/. Jaskiewicz, Z., Wasiewski, A.: Przekładnie walcowe. Wydawnictwa Łączności i Komunikacji, Warszawa 1995.
- /3/. Sabiniak H, Wozniak J.: Określenie obciążalności przekładni ślizgowych ze względu na zużycie ściernie. Trybologia nr 5, 1995
- /4/. Senatorski J.: Wpływ smarowania na odporność na zużycie warstw dyfuzyjnych. MOCIP nr 118-120, 1992, s.39-40
- /5/. Senatorski J., Tacikowski J.: Własności trybologiczne warstw dyfuzyjnych na stalach konstrukcyjnych i narzędziowych. Trybologia nr 2, 1988
- /6/. Senatorski J., Tacikowski J.: Wpływ prędkości tarcia na własności trybologiczne warstw dyfuzyjnych. Trybologia nr 3, 1989
- /7/. Burakowski T., Senatorski J., Tacikowski J.: Wpływ struktury warstw dyfuzyjnych na ich własności trybologiczne. Trybologia nr 6, 1986
- /8/. Burakowski T., Senatorski J., Tacikowski J.: Porównanie odporności na zużycie trybologiczne warstw nawęglanych i azotowanych. Trybologia nr 3, 1984
- /9/. Krol R.: Badanie wpływu parametrów obróbki cieplnej nawęglonej stali 18HGM na jej udarność i odporność na zużycie ściernie. Przegląd Mechaniczny nr 1, 1994
- /10/. Wawrzyk P., Wesseley R.: Bezgorzelinowe nagrzewanie stali w piecach grzewczych. Wydawnictwo „Ślask”, Katowice 1973

Präsentation der INS-Basisuntersuchungen auf der 35. Konferenz Normenpraxis in Berlin

Bormann, E.; Kramer, W.



Ende September dieses Jahres stellte das IMW zusammen mit der TU Berlin und dem FIR an der RWTH Aachen auf der 35. Konferenz Normenpraxis die drei Basisuntersuchungen der Initiative „Innovation mit Normen und Standards (INS)“ vor.

In collaboration with the TU Berlin and the FIR at RWTH Aachen the IMW presented the three basic studies of the initiative “Innovation with Norms and Standards (INS)” at the 35. Konferenz Normenpraxis in September 2007.

1 Konferenz Normenpraxis

Am 27. und 28. September veranstaltete der Ausschuss Normenpraxis (ANP) zum 35. Mal die Konferenz Normenpraxis. Fast 200 Teilnehmer kamen in das Haus der Deutschen Wirtschaft in Berlin, um sich mit dem stets aktuellen Thema "Spannungsfeld Normung und Recht" zu beschäftigen. 16 Referenten von Unternehmen, Rechtsanwaltskanzleien, Regierung, Wissenschaft und der DIN-Gruppe gaben Einblick in die Themen CE-Kennzeichnung, Produktsicherheit und Informationsmanagement /1/.



Bild 1: Der Vorsitzende des ANP, Rüdiger Trötsch, eröffnet die Konferenz

2 Fachausstellung

Auf der begleitenden Fachausstellung wurden am Stand des INS die drei Basisuntersuchungen der Initiative „Innovation mit Normen und Standards (INS)“ vorgestellt. Die Initiative ist derart aufgebaut, dass die aktuell 41 Normungsprojekte durch drei wissenschaftliche Basisuntersuchungen begleitet werden. Ziel der Basisuntersuchungen ist es, die Bedürfnisse von Wissenschaft und Industrie zur Schaffung einer effizienten und fruchtbaren Innovationslandschaft zu ermitteln

und in diesem Zusammenhang aufzuzeigen, welchen Beitrag die Instrumente der Normung und Standardisierung dazu leisten können.

Die Basisuntersuchungen sind:



Bild 2: Mitarbeiter des IMW und der TU Berlin am INS Stand

An der TU Berlin – Identifikation zukünftiger Standardisierungsfelder. Entwicklung einer auf Technologieindikatoren basierenden Methode zur Identifikation zukünftiger Standardisierungsfelder.

Am FIR an der RWTH Aachen – Technologiekonvergenz.

Analyse optimierter, effizienter Normung und Standardisierung vor dem Hintergrund der Technologiekonvergenz.

Am IMW – Marktzugang und Marktzulassung.

Ermittlung der Einflüsse von Normen und Standards auf den Marktzugang und die Marktzulassung

3 Zusammenfassung

Die Fachausstellung war während der Vortragspausen gut besucht und die Besucher zeigten reges Interesse an den bisherigen Ergebnissen der Untersuchungen. Für die Untersuchung des IMW /2/, die in diesem Jahr eine groß angelegte Fragebogenaktion beinhaltete, konnten mehrere Teilnehmer gewonnen werden.

Der aktive Erfahrungsaustausch zwischen den Projekten, mit den Referenten der Tagung und den Besuchern brachte neue Aspekte zu Tage, wie Wissenschaft und Industrie im Bereich Normung und Standardisierung zusammenarbeiten können und die Innovationskraft in Deutschland gestärkt werden kann.

4 Literatur

- /1/ Spannungsfeld Normung und Recht - CE-Kennzeichnung - Produktsicherheit - Informationsmanagement - Konferenzband der 35. Konferenz Normenpraxis, Beuth-Verlag, Berlin 2007
- /2/ Müller, N.; Bormann, B.; Kramer, W.: Bericht zum Projekt Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards, IMW Clausthal 2006

Second year of the project „IMPROVENG“

Dietz, P., Sambale, B.

Das Projekt IMPROVENG beschäftigt sich mit der Übertragung der „deutschen Art“ Maschinenbau zu lehren nach Mexiko, da dort ein Defizit an Fächern, die sich mit der Konstruktion und Entwicklung neuer Maschinen beschäftigen, besteht. Die mexikanische Industrie wird aber in Zukunft immer mehr Ingenieure dieser Qualifikation benötigen, um den Aufstieg von einem „Zuliefererland“ zu einem „Entwicklerland“ zu schaffen.



1 Introduction

Within this project, the basics of the German educational system shall be evaluated with respect to applicability in Mexican universities and transferred to Mexico, because the project oriented application of basic sciences including the challenge of a time-management in teaching mathematics, mechanics, material sciences, manufacturing and design like it is part of the curricula in Europe is up to now not known in Mexico. By introducing and evaluating this in a pilot project at the CUCEI (Centro Universitario de Ciencias exactas e Ingenierias) in Guadalajara it is possible to extend these structures to other Mexican universities. This project has started in 2006 and is planned for four years.

In the year 2006 Prof. Dr. Peter Dietz and Dipl.-Math. Bianca Sambale stayed about two weeks in Mexico. In this time several meetings with the University of Guadalajara, Instituto Tecnológico of Irapuato and the Instituto Tecnológico of Queretaro were held to analyse the Mexican curriculum, also the lecture “Konstruktionslehre” (Methodology of Design) had taken place in Guadalajara in the first week. Several students and members of the industry participated this lecture.

The analysis of the Mexican curriculum of mechanical engineering, extensions and shortenings on it were made during the first week of this stay. Also a PowerPoint presentation about this work was made and presented to participants of the university, industry and state institutions of Guadalajara.

A second journey which was planned for the second half of the year 2006 could not be made because of time problems on both sides. This second journey was transferred in the first half of the year 2007.

2 Report of stay

The second visit of members of the IMW (Institut für Maschinenwesen) of the TUC (Technische Universität Clausthal) at the CUCEI (Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías) of the UdeG (Universidad de Guadalajara) in Guadalajara within this project had taken place in March 2007 for ten days. This time Prof. Dr. Peter Dietz and Dipl.-Math. Bianca Sambale were accompanied of Dipl.-Ing. Oliver Habel of the IMAB (Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit) in the last six days of their stay in Mexico. They arrived at Guadalajara airport at March 20th and stayed until March 30th of 2007. In this time two lectures were held: "Elementos de construcción I" (Prof. Dr.-Ing. Dietz) and "De la medición de cargas a la calculación de vida útil" (Dipl.-Ing. Habel). Additionally meetings with professors from the UdeG and industry members were arranged and the work on the project was carried on.

2.1 Project work

Last year the Mexican curriculum was analysed to clarify the need of new lectures and changes. Based on the resulting proposals a new proposal was constructed from Mexican side since the last project meeting and now presented by Mr. Victor Rangel to the German project members on March 21st:

1. semestre	Cred.	2. semestre	Cred.	3. semestre	Cred.	4. semestre	Cred.	5. semestre	Cred.	6. semestre	Cred.	7. semestre	Cred.	8. semestre	Cred.	9. semestre
Matemát. para Ing. 1	9	Matemát. para Ing. 2	9	Matemát. para Ing. 3	9	Matemát. para Ing. 4	9	Cálculo con elementos finitos	9	Máquinas térmicas	5	Instalaciones eléctricas	5	Máquinas eléctricas 2	5	Instru- mentación
Estática	9	Dinámica	9	Termo- dinámica	9	Electro- magnetismo	9	Circuitos eléctricos	5	Instalaciones mecánicas	5	Máquinas eléctricas 1	6	Lab. Maq. Eléctricas 2	2	Robótica
Labor. Física 1	2	Labor. Física 2	2	Labor. Física 3	2	Labor. Física 4	2	Fluidos	5	Nuevos procesos manufactura	5	Lab. Maq. Eléctricas 1	2	Refrigeración y aire	5	Product Data Management
Química básica	6	Procesos de manufactura 1	6	Procesos de manufactura 2	6	Transfe- rencia de calor	5	Lab. neum. e hidráulica	2	Lab. Maq. Térmicas	2	Máquinas hidráulicas	6	Control	5	Micro- manufactura
Dibujo industrial	3	Lab. Manuf. 1	2	Lab. Manuf. 2	2	Elemen. de diseño 1	6	Mediciones en ing.	5	Mecánica de materiales (para el diseño) 2	5	Lab. Maq. Hidráulicas	2	Resistencia y fatiga 2	5	Proyecto mecatrónico
Introd. Computación	3	Administración	5	Elemen. ing. industrial	5	CAD	5	Mecánica de materiales (para diseño) 1	5	Elemen. de diseño 3	6	Resistencia y fatiga 1	5	Metodología del Diseño 2	6	Automatiza- ción de sistemas
Optativa abierta 1	5	Etica profesional	4	Optativa abierta 3	5	Materiales	5	Elemen. de diseño 2	6	Proyecto de diseño 3	2	Metodología del diseño 1	6	Maq. de transf. hidrau. y neumá.	5	Optativa especiali- zante 2
		Optativa abierta 2	5			Proy. de diseño 1	2	Proyecto de diseño 2	2	Ingeniería económ.	5	Electrónica digital	3	Elementos meatrón- icos	5	Optativa especiali- zante 3
						Admon. oper. manuf.	5	Planeación y control de producción	5	Calidad	5	Optativa especiali- zante 1	5	Maq. Herra- mientas	5	Maquina- bilidad
	37		42		38		48		44		45		45		43	



Figure 1: Proposal CUCEI

This proposal is special and it is different from the earlier made proposals in one specific way - it unites three departments:



Figure 2: Career with multi departmental support

The Department of Industrial Engineering, the Department of Engineering Projects and the Department of Mechanical and Electrical Engineering.

Normally a collegiate career in Mexico is just placed in one department. Every lecture a student has to visit is given by this department. Because of this, the students are too much specialised in their study.

By this change a “Ingeniero de Manufactura” will have a better basic

knowledge of all themes, which he will need in his future life.

This proposal was not satisfying, because of the immense quantity of hours per week. After the revision of the existing proposal, in which some specialisations and shortenings were made, the quantity of hours was set to average 25 hours per week:

1. semestre	2. semestre	3. semestre	4. semestre	5. semestre	6. semestre	7. semestre	8. semestre	9. semestre	10. semestre
Matemát. para Ing. 1	Matemát. para Ing. 2	Matemát. para Ing. 3	Matemát. para Ing. 4	Cálculo con elementos finitos	Elemen. de diseño 3	Máquinas eléctricas 1	practicas industriales	Máquinas transf. Mecánicas	Instru- mentación
Estática	Dinámica	Termo- dinámica	Electro- magnetismo	Circuitos eléctricos	Proyecto de diseño 3	Resistencia y fatiga 1		Lab. Maq. Eléctricas	Product Data Management
Labor. Física 1	Labor. Física 2	Labor. Física 3	Transfe- rencia de calor	Fluidos	Ingeniería económ. 1	Metodología del diseño 1		Control	Proyecto mecatrónico
Química básica	Procesos de manuf. 2	resistencia de materiales	Materiales 2 (para diseño)	Mediciones en Ing.	Máquinas térmicas	Electrónica digital		Elementos mecatró- nicos	optativas especialisan- te: robotica, micro manufactura, autom atisaci on, maquina bilidad
Dibujo industrial	Lab. Manuf. 1	Lab. Manuf. 2	Elemen. de diseño 1	Elemen. de diseño 2	Instalaciones mecánicas	Ingeniería económ. 2		Maq. Herra- mientas	
Introd. Computación	Adminis- tración	CAD	proyecto de diseño 1	proyecto de diseño 2	Lab. Máqui. térmicas	optativas espec.: Instalaciones eléctricas, Máquinas hidráulicas + Lab. CIM		optativas especialisan- te: refrigeration, fatiga 2, metodologia 2, maquinas de transferencia	
Optativa abierta 1	Optativa abierta 2	materiales 1	Admin. oper. manuf.	Lab. neum. e hidráulica	Nuevos procesos manufactura	Calidad			
Procesos de manuf. 1	Com putacion	Optativa abierta 3	Lab. Materiales	Planeación y control de producción	Electrón. analógica				
		Optativa abierta 4							
24	25	25	26	24	26	25		25	25

Figure 3: Career after shortening

The “optativas” (arbitrary lectures) were divided in two possible careers: “diseno, manufactura y procesos” and “automatizacion y control de equipos y procesos”:

1		diseno, manufactura y procesos	horas
obligatorios	Materiales 2 (para diseño) + Lab		5
	Cálculo con elementos finitos		4
	Proyecto en maquinas		3
	Nuevos procesos manufactura		3
	Resistencia y fatiga 1		3
			18
especialisante	Fluidos		
	Máquinas térmicas + Lab		
	Maq. Herramientas		
	CIM		
	micro manufactura		
	refrigeration		
	fatiga 2		
	metodologia 2		
	Máquinas hidráulicas + Lab		
Transferencia de calor			
2		automatizacion y control de equipos y procesos	horas
obligatorios	Electrón. analógica		3
	Electrónica digital		3
	Instalaciones eléctricas		3
	automatizacion		3
	Lab electronico/automatizacion		3
	Proyecto mecatrónico		3
			18
especialisante	CIM		
	robotica		
	Elementos mecatrónicos		

Figure 4: Possible careers

This Career was presented to the rectorate on Wednesday, 28.03.2007 and to representatives of the Mexican industry and the DAAD on Friday, 30.03.2007. Both groups agreed in the necessity of a new engineering career for Mexico and support this new curriculum as a step in the right direction.

Furthermore meetings with representatives of the Departments of Engineering and the CIATEJ, CONACYT were held, in which the problems which may appear during the adoption were discussed. Every participant of these meetings guaranteed their encouragement for

the project because of the understanding of the meaningfulness of this project for the future of Mexican mechanical engineering career.

2.2 Lectures

The two lectures which were held in Spanish during the stay were compressed lectures of the new ones which have to be integrated in the new career. The documents which were needed for this were translated with the help of Spanish double diploma students, who are also translating the documents for the next lectures.

Participants in these lectures were students and professors from the UdeG, but also professors from other universities of Mexico and representatives from Mexican industries.



Figure 5: Lectures of Prof. Dietz (right) and Dipl.-Ing. Habel (above)

3 Further steps and changes

The first part of the lecture “Elementos de construcción I” was held and the second part will be hold by Prof. Dietz in January 2008. Prof. Lohrengel who had taken over this project in the current year, will also attend Prof. Dietz on his trip to Mexico next year, to get in contact with the participants and to clear the next steps in the project. Additionally discussions about the possibility of involving a double diploma into this new career are planned during the visits. This double diploma would give Mexican and German students the possibility of getting experiences in the partner countries, learning foreign languages, receiving social competences and gaining from the different ways of teaching mechanical engineering.

id	Task	2006				2007				2008				2009			
		Q1	Q2	Q3	Q4												
1	Determination of requirements, program conception																
2	Add on arrangements alongside the course																
3	Clarification of Curriculum																
4	Participation of Mexican Professors in German University																
5	Introduction of new engineering career																
6	Evaluation and improvement, adoption in Mexican Curriculum																

Figure 6: Timetable of the project IMPROVENG

The journeys of the German professors in the beginning of 2008 will be followed by the visit of two Mexican professors (Dr. Juan Villavazo and Dr. Rubén Ruelas) participating lectures in Clausthal in February 2008. These visits of the Mexican professors were also planned in 2007, when they should have helped to translate lectures in Spanish. Unfortunately these two visits have to take place in the beginning of 2008, because all the people involved could just make it at this time. Concerning the visit of the Mexicans this means, that there was a need of more working hours for translation of lectures.

Next year two Mexican professors (V́ctor Rangel and Daniel Mart́nez) will come to Clausthal in 2008, to learn more about our lectures and to translate some of them in Spanish.

4 Perspective

This project was planned for four years. First, it was just encouraged by the DAAD until the end of this year. But to stop the encouragement of the project at this moment would mean to stop the new career. The curriculum of the new career is up to now not enough tightened and needs much encouragement of the German partners, not only because the rector of the Mexican University has changed, but also because of the lack of knowledge and experience which would then occur. Therefore the DAAD will encourage the project for another two years.

Strategieworkshop des Ausschuss Normenpraxis im IMW

Bormann, E; Kramer, W.; Müller, N.



Im Juli 2007 trafen sich die Vorsitzenden der Regional- und Sektorgruppen des Ausschuss Normenpraxis (ANP) im IMW um über die zukünftige strategische Ausrichtung des ANP zu diskutieren.

The chairmen of the regional groups and sector groups of the German Committee of Standards Users (ANP) met at the IMW in July 2007 in order to discuss the future strategic adjustment of the ANP.

1 Einleitung

Auf Einladung von Prof. Müller, der im Beirat des ANP ist, trafen sich am 3. und 4. Juli der Vorstand, die Geschäftsführung und die Vorsitzenden der Regional- und Sektorgruppen des ANP im IMW. Ziel des Strategieworkshops waren eine Standortbestimmung und das gemeinsame ausarbeiten von Vorschlägen wie sich der ANP in Zukunft intern aufstellen und in der Außendarstellung präsentieren sollte.

1.1 Verlauf des Workshops

Nach der Begrüßung durch den Vorsitzenden des ANP Herrn Trötsch gaben der Geschäftsführer des ANP Herr Dr. Hartlieb und Frau Dind einen Überblick über das DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und die aktuelle Mitglieder- und Gruppenstruktur des ANP. Danach stellte Prof. Müller den Teilnehmern das Institut und die TU-Clausthal kurz vor.

Anschließend wurden mehrere Arbeitsgruppen gebildet, die mit verschiedenen Lösungsfindungs- und Bewertungsmethoden Vorschläge für unterschiedliche Themengebiete erarbeiteten. Die Vorschläge wurden anschließend dem Gesamtgremium vorgestellt und kurz bewertet. Der erste Tag endete mit einem gemeinsamen Abendessen in harmonischer Runde.

Am zweiten Tag wurden die verschiedenen Vorschläge genauer ausgearbeitet und Aufgaben erstellt, die in näherer Zukunft in Angriff genommen werden sollen.

2 Über den ANP

Der Ausschuss Normenpraxis (ANP) besteht aus einem Netzwerk von über 400 aktiven Normungsexperten aus Betrieben in ganz Deutschland und aus Normungsfachleuten des DIN, die in 12 Regional- bzw. 3 Projekt-/Sektorgruppen organisiert sind /1/.

Der ANP stellt das Verbindungsglied der Normenanwender aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung mit dem DIN dar. Im ANP werden keine Normen erstellt!

Seine Aufgaben sind:

- Insbesondere den Erfahrungsaustausch der inner- und überbetrieblichen Normungsarbeit der Mitglieder zu unterstützen und zu pflegen
- Das Verständnis für die Normung zu vertiefen
- Problemdarstellungen und die Erarbeitung von Lösungsvorschlägen im Normungsbereich zu ermöglichen
- Den Austausch mit dem DIN und dem Beuth Verlag zu bestreiten, wie Anregungen an das DIN und den Beuth Verlag hinsichtlich Anwenderfragen und -themen zur Normung zu geben
- Den Nutzen der Normung darzustellen und sich mit normungsstrategischen Fragen auseinander zu setzen
- Die Einführung von Normen in den Unternehmen zu fördern
- Sich an der nationalen und internationalen Zusammenarbeit zu beteiligen
- Die Weiterbildung der Mitarbeiter zum Normungsexperten zu ermöglichen

Der ANP informiert seine Mitglieder über Entwicklungen im Vorfeld europäischer und internationaler Normungsentscheidungen und trägt dazu bei, frühzeitig seinen betroffenen Mitgliedskreis über das DIN in diesen Prozess mit einzubeziehen.

3 Literatur

/1/ www.anp.din.de

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, speziell Welle-Nabe-Verbindungen und Seiltrommeln
- Konstruktionssystematik
- Rechneinsatz im Maschinenbau
- Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen
- Maschinenakustik
- Experimentelle Beanspruchungsermittlung und Spannungsoptik
- Technische Normung
- Rapid Prototyping / Rapid Tooling

Das interdisziplinäre Team am IMW besteht aus 15 wissenschaftlichen Mitarbeitern/-innen aus den Bereichen Maschinenbau, Technomathematik 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, ein umfangreiches Prüffeld und die notwendige Hard- und Softwareausstattung für Simulation und Berechnung.

Die Untersuchung von Maschinenelementen kann auf vier Verspannprüfständen, fünf Torsions-Schwingprüfständen, einem kombinierten Umlaufbiege- und Torsionsprüfstand, einer statischen Verspanneinrichtung sowie zweier separaten Umlaufbiegeprüfeinrichtung und einem Druckkammprüfstand durchgeführt werden. Zur Prüfung förder technischer Elemente und Anschlagmittel ist eine Zugprüfmaschine mit integriertem Querprüfgerät und ein Seiltrommelprüfstand vorhanden. Eventuelle berührungslose Übertragungen von Messwerten werden mit drei Telemetrieanlagen (64, 32, 8 Kanäle) bewältigt, die auch für ICP-Beschleunigungssensoren geeignet sind. Ein Schleuderprüfstand für schnell drehende Maschinenteile (z.B. Rotoren, Abwei-

seradwindsichter) und ein Schneidmühlenprüfstand ergänzen die Prüfeinrichtungen des IMW für Untersuchungen an verfahrenstechnischen Maschinen.

Die technische Ausstattung des Labors für Maschinenakustik und Schwingungen ermöglicht Messungen an kombiniert belasteten Bauteilen. Mittels eines elektrodynamischen Schwingerregers können Bauteile neben ihrer stat./dyn. Betriebslast gezielt frequenzselektiven Belastungen bis zu einer Frequenz von 5 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 auf dem neuesten Stand der Technik ausgestattet:

- Oros Signalanalytoren mit 4 und 32 Kanälen mit einer Bandbreite von bis zu 102kHz pro Kanal zur Echtzeitverarbeitung
- 3 Modalshaker (1kN, 200N, 10N)
- Rotations-Laservibrometer
- Intensitätsmesssonde
- Diverse akustische Sensoren
- Oros Signalanalyse Software
- Vibrant Me´Scope Modalanalyse Software
- Matlab als Software für Sonderfunktionen

Darüber hinaus verfügt das IMW über einen schallarmen Messraum. Zur maschinenakustischen Beurteilung von Maschinenstrukturen stehen alle gängigen Analyseverfahren wie beispielsweise:

- FFT
- Oktav-Analyse
- Synchrones Order Tracking
- Constant Band Tracking
- Farbwasserfall- und Farbspektrogrammdarstellungen

zur Verfügung. Darüber hinaus kann der Analysator als Standalone-Recorder für Mobile Anwendungen eingesetzt werden.

Das fertigungstechnische 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. Als CAD/CAM-System wird CATIA V5 und Pro/Engineer mit Pro/Manufacturing eingesetzt. Maschinenspezifische Postprozessoren erlauben eine durchgängige CAD/NC-Verfahrenskette. Als PDM/PLM-System ist TeamCenter von Siemens im Testeinsatz.

Die Rechnerausstattung umfasst mehrere Server, welche die insgesamt ca. 130 Rechner des Institutes vernetzen. Diese umfassen u.a.

verschiedene Internetserver (WWW/FTP), einen Windows Domänencontroller, einen Server für Datenbankdienste, einen Compute-Server für die numerischen Simulationen und einen File-Server mit 6 TB. Als Standardsoftware stehen eine Vielzahl von Programmen zur Verfügung, u. a. die CAD-Pakete ProEngineer Wildfire 3.0 und CATIA V5 sowie die FEM-Programme ANSYS und ProMechanica und das Optimierungsprogramm TOSCA, sowie LMS VirtualLab.

Das Institut für Maschinenwesen verfügt über eine vollständige Rapid Prototyping bzw. Rapid Tooling Verfahrenskette zum Lasersintern von metallischen Bauteilen. Hierzu gehören im Einzelnen eine Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250 der Firma EOS, zum Generieren von Prototypen, Funktionsteilen und Werkzeugen (Formen und Elektroden), verschiedene Konstruktionsarbeitsplätze, Software zur Rapid Tooling gerechten Aufbereiten der CAD-Daten (Magics RP), Apparaturen und Geräte zum Infiltrieren und Beschichten der Sinterbauteile mit Harzen und niedrig schmelzenden Metallen, eine Sandstrahlkabine für verschiedene Strahlmedien (Stahlkugeln, Keramikpulver, Nussgranulat usw.) sowie Arbeitsplätze zur manuellen Nachbearbeitung der Rapid Tooling Erzeugnisse.

Im Bereich der multimedialen Lehre verfügt das IMW über mehrere Kamerasysteme zur Aufnahme und Übertragung von Lehrveranstaltungen und praktischen Experimenten. In einem eigens errichteten Multimedia-Seminarraum können Lehrveranstaltungen vor einer 100“ Rückprojektionswand durchgeführt werden.

Kooperationsangebote

Das IMW arbeitet in einer Vielzahl von Projekten in enger Kooperation mit namhaften 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.
- Konstruktion und Herstellung von metallischen Formen, Funktionsteilen und Prototypen durch direktes Lasersintern (Rapid Tooling).
- Spritzgießen kleinerer Kunststoffteile (PE, PP) in geringen Stückzahlen mit Hilfe einer Spritzgusspistole.

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 lärm-ärmerer 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 nationalen und europäischen Förderungsmaßnahmen an. Dies beinhaltet neben der Beratung zur Einwerbung von Fördermitteln auch Hilfestellung bei der Vorbereitung, der Durchführung und der Partnersuche bei europäischen Forschungsprojekten.

Forschungsschwerpunkte

Die Forschungsschwerpunkte gliedern sich in folgende Bereiche:

Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen

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 Ausgleichfunktion in radialer und axialer Richtung,
- Seiltrommeln (ein- und mehrlagig bewickelt),
- Stahldrahtseile und Kunststoffseile
- 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 Rechnerinsatz 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,
- Fehlermöglichkeitseinfluss- und Störfallanalysen,
- dem fertigungsgerechten Konstruieren insbesondere an Bauteilen aus Feinblech und lokal eigenschaftsgeänderten Materialien.

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 lärmärmer, schnell laufender Mühlen.

Weitere Forschungsvorhaben beschäftigen sich mit 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.

Rapid Prototyping / Rapid Tooling

Die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf dem Gebiet Rapid Prototyping / Rapid Tooling umfassen die gesamte Rapid Tooling Verfahrenskette.

Hierzu zählt im Einzelnen:

- die Rapid Tooling gerechte CAD-Konstruktion,
- die Datenaufbereitung für den Sinterprozess,
- der Rapid Tooling Bauprozess einschließlich der Untersuchung von neuen Sinterparametern und Sinterwerkstoffen und
- die Nachbearbeitung bzw. das Finishen der Sinterbauteile durch Beschichten und Infiltrieren.

Weiterhin werden die Anwendungsgebiete der Rapid Tooling Technologie betrachtet wie z. B. die Herstellung von Elektroden für das funkenerosive Abtragen und das Sintern von Formen für den Gummi- und Kunststoffspritzguss oder Faserverbundkonstruktionen sowie das Generieren von Funktions- und Einsatzteilen mittels neu entwickelter Sinterwerkstoffe und Sinterstrategien.

Veröffentlichungen des Institutes seit dem 01.01.2004

Veröffentlichungen 2004

Dietz, P.: Auslegungskriterien für mehrlagig bewickelte Seiltrommeln nach dem Prinzip des Leichtbaus. Kolloquium Fördertechnik im Bergbau, 28./29. Januar 2004, Clausthal

Dietz, P.; Grünendick, T.: Welle-Nabe-Verbindungen – nichts mehr zu entwickeln? Innenhochdruck-Fügeverfahren für Welle-Nabe-Verbindungen. Konstruktion – Zeitschrift für Produktentwicklung, Nr. 1/2-2004

Dietz, P.; Wächter, M.: BLK-Projekt: Entwicklung und Erprobung eines integrierten Leistungspunktesystems in der Weiterentwicklung modularisierter Studienangebote am Beispiel der Ingenieurwissenschaften, Abschlussbericht AP4 - Internationalisierung, 2004

Wächter, M. und Mitautoren: Das Berufsbild des Ingenieurs - Mindestanforderungen an die allgemeinen und Fachkompetenzen, Workshop "Modul- und Leistungspunktemanagement 2004: Konzepte und Erfahrungen bei Bewertung, Anerkennung und Austausch von Modulen", Workshop in Leipzig, 2004

Trenke, D.; Estrin, J.: Selbsttragende Strukturen aus selbstverzahnten Bausteinen und deren Herstellung durch Rapid Tooling, Exponatbeschreibung Hannover Messe 2004, TU Clausthal, April 2004

Dietz, P.; Mupende, I.; Otto, S.: Auslegungskriterien für mehrlagig bewickelbare Seiltrommeln nach dem Prinzip des Leichtbaus. 12. Internationale Kranfachtagung 30.4.2004, Bochum

Müller, D.; Goltz, M.; Müller, N.: PLM – Management of product data without limits !?, Mai 2004

Dietz, P.: Design criteria for multilayer wound winch drums following lightweight design principles. 8th International Design Conference, 17-20. Mai 2004, Dubrovnik, Kroatien

Dietz, P.: Development of low noise products using sound flow analysis. Noise Control '04 06.-09. Juni 2004, Gdynia, Polen

Dietz, P.: Auslegungskriterien für mehrlagig bewickelbare Seiltrommeln nach dem Prinzip des Leichtbaus. Glückauf Forschungshefte, Nr. 2, Juli 2004

Schäfer, G.; Garzke, M.; Grünendick, T.: Innenhochdruckfügen von Welle-Nabe-Verbindungen. PNEU-HIDRO 2004, 21.-23.09.2004, Miskolc-Eger, Ungarn

Schäfer, G.: Einsatz hochgenauer Schraubwerkzeuge. PNEU-HIDRO 2004, 21.-23.09.2004, Miskolc-Eger, Ungarn

Schäfer, G.: Elastisch-plastische Auslegung geschwächter Pressverbindungen, Seminar „Pressverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 18./19.11.2004, Chemnitz

Veröffentlichungen 2005

Rolshofen, W.; Dietz, P.; Schäfer, G.: TAI-CHI- Tangible Acoustic Interfaces for Computer-Human Interaction, 31. Jahrestagung für Akustik „DAGA'05“, Deutsche Gesellschaft für Akustik, 14.-17.03.2005, München

Schäfer, G.: Schadenskunde von Zahnwellen-Verbindungen, Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 15./16.03.2005, Chemnitz

Schäfer, G.: Betriebs- und Verschleißverhalten von Zahnwellen-Verbindungen, Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 15./16.03.2005, Chemnitz

Düsing C., Müller D., Schäfer G.: Konstruktionsmethodik als Exportschlager – Kontinuierliche Kooperation mit Südostasien, TU Contact, Nr. 16, 10. Jahrgang, Clausthal-Zellerfeld, Mai 2005

Grünendick T., Müller D., Rolshofen W.: Die Fabrik der Zukunft - ein europäisches Netzwerk, TU Contact, Nr. 16, 10. Jahrgang, Clausthal-Zellerfeld, Mai 2005

Schäfer, G.: Mechanik, Schäden an Großmaschinen, Tagung „Schadensfalluntersuchung“, Haus der Technik, 7./8.06.2005, Essen

Dietz, P.; Grünendick, T.; Guthmann, A.; Korte, T.: Construction using combined materials – possibilities and limits, Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, 04.-15.07.2005, Cardiff, GB

Goltz, M.; Müller, D.; Schmitt, R.; van den Bosche, M.: Overcoming the challenges of product development and engineering changes in a distributed engineering environment, Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, 04.-15.07.2005, Cardiff, GB

Müller, D.: Knowledge-based and requirements-driven product development, Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, 04.-15.07.2005, Cardiff, GB

Trenke, D.; Rolshofen, W.: Rapid Tooling Process Chain, Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, 04.-15.07.2005, Cardiff, GB

Rolshofen, W.; Ming, Y.; Wang, Z.: Acoustic Holography in-Solids for Computer-Human Interaction, Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, 04.-15.07.2005, Cardiff, GB

Schäfer, G.; Wächter, M.: ECTS – Modularisation - Workload, ICEE 2005 International Conference on Engineering Education, 25.-29.07.2005, Gliwice, Poland, ISSN 1562-3580

Schäfer, G.: eLearning Academic Network, ICEE 2005 International Conference on Engineering Education, 25.-29.07.2005, Gliwice, Poland, ISSN 1562-3580

Schäfer, G.: Joint Degrees in Binational Studies, ICEE 2005 International Conference on Engineering Education, 25.-29.07.2005, Gliwice, Poland, ISSN 1562-3580

Ratchev, S.; Pawar, K. S.; Urwin, E.; Müller, D.: Knowledge-enriched requirement specification for one-of-a-kind complex systems, Concurrent Engineering - Research and Application Journal, Vol. 13, No.3, pp. 171-184, September 2005

Müller, D.: Improvement of engineering design processes, Workshop on Statistics in Innovation and the Design Process, ENBIS conference, 14. September 2005, Newcastle upon Tyne, Großbritannien

Schäfer, G.; Wächter, M.: Forming of shaft-hub connections with circular toothed splines, MSD-IE conference, 22.–23. September 2005, Wrocław, Poland

Rolshofen, W.; Soroka, A.; Eldukhri, E.; Müller, D.: I*PROMS - Innovative Production Machines and Systems, MSD-IE conference, 22.-23. September 2005, Wrocław, Poland

Dietz, P.; Grünendick, T.; Guthmann, A.; Schäfer, G.: Internal high pressure assembled press fit shaft-hub connections, MSD-IE conference, 22.-23. September 2005, Wrocław, Poland

Veröffentlichungen 2006

Rolshofen, W.; Dietz, P.; Schäfer, G.: Neuartige berührbare Schnittstellen durch die Rückprojektion akustischer Wellen, Fortschritte der Akustik: Plenarvorträge und Fachbeiträge der 32. Deutschen Jahrestagung für Akustik DAGA '06, Braunschweig, ISBN: 3-9808659-2-4

Schäfer, G.: Rapid eLearning im Einsatz, Tag des eLearning CeBIT 2006, Besser lernen – mehr wissen – mehr können, 13.03.2006, Hannover

Rolshofen W., Dietz P. und Schäfer G.: Innovative Interface for Human-Computer Interaction, Proceedings of the 9th International Design

Conference DESIGN 2006, Dubrovnik, Croatia, 2006, ISBN 953-6313-82-0

Schäfer, G.: Mechanik, Schäden an Großmaschinen, Tagung „Schadensfalluntersuchung“, Haus der Technik, 17./18.05.2006, Essen

Schäfer, G.: eLearning Academic Network – Blended Lectures, iNEER Special Volume “INNOVATIONS 2006: World Innovations in Engineering Education and Research”, 2006, Arlington USA, ISBN 0-9741252-5-3

Trenke, D., Müller, N. und W. Rolshofen: Selective laser sintering of metal and ceramic compound structures, 2nd Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, 03.-14.07.2006, Cardiff, GB

Trenke, D.; Dissertation: Selektives Lasersintern von porösen Entlüftungsstrukturen am Beispiel des Formenbaus, April 2006, Papierflieger Claus-thal-Zellerfeld, ISBN 3-89720-848-2

Hickmann, T., Adamek, T. (Wilhelm Eisenhuth GmbH KG), Müller, N., Trenke, D. (Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal); Der Stahlformenbauer, Ausgabe 05-2006, S. 14-16, Fachverlag Möller 2006

Dietz, P., Guthmann, A. und T. Korte: Material-driven solution finding – functional materials in the design process, 2nd Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, 03.-14.07.2006, Cardiff, GB

Rolshofen, W. et al.: “TAI-CHI: Tangible acoustic interfaces for computer-human interaction”, Euroscience Open Forum 2006: 15. - 19. Juli; Forum am Deutschen Museum und Deutsches Museum, München

Dietz, P.: Accreditation in Europe – System and Experiences, ICEE 2006 International Conference on Engineering Education, 23.-28.07.2006, San Juan, Puerto Rico, ISBN 1-58874-648-8

Sambale, B.: Fixed outcomes with non-traditional curricula, ICEE 2006 International Conference on Engineering Education, 23.-28.07.2006, San Juan, Puerto Rico, ISBN 1-58874-648-8

Schäfer, G.: Requirements of integrated international engineering studies, ICEE 2006 International Conference on Engineering Education, 23.-28.07.2006, San Juan, Puerto Rico, ISBN 1-58874-648-8

Lütkepohl, A.: Anforderungsgetriebene Konstruktionsmethodik zur werkstoffgerechten Lösungsfindung. Abschluss-symposium zum Paketantrag „Kompatibilisierungsmethoden“, 16.11.2006, Clausthal

D. Müller, P. Dietz, N. Müller: Intelligent Assistance for a Task-oriented Requirements Management, Proceedings 2nd International Joint e-Conferences on Computer, Information, and Systems Sciences, and Engineering (CIS²E 2006), 4. – 14. Dezember 2006

Veröffentlichungen 2007

Müller, N.; Bormann, E.; Kramer, W.: Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards; DIN-Mitteilungen + Elektornorm, Ausgabe 03-2007, S. 11-17, Beuth Verlag Berlin 2007, ISSN 0722-2912

Schäfer, G.: Using manufacturing influences to material properties within design, ICMA '07, Singapore, ISBN: 978-981-05-8089-6

Schwarzer, T.: Die Problematik der Auslegung mehrlagig bewickelter Seiltrommeln bei der Bewicklung mit Kunststoff- oder Hybridseilen, 15. Internationale Kranfachtagung, Bochum Mai. 2007, ISBN 3-89194-179-X

Rolshofen, W.; Dietz, P.; Beck, H.-P., et al.: Base Load Power from the North Sea. European Wind Energy Conference (EWEC 2007), Milan, Italy, 7-10 May 2007

Schäfer, G.: Netzintegration von Offshore Großwindanlagen, Vortrag, science.fest 2007, Mannheim

Kramer, W.; Müller, N.: Marktzugang und Marktzulassung mittels Normen und Standards, Vortrag, VDI-VDE-DGQ Gemeinschaftskreis Qualitätsmanagement Hannover, 25.06.2007, Hannover

Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Wesling, V.: Iterative loop to include material and manufacturing information in an early design stage, Virtual International Conference on Innovative Production Machines and Systems (IPROMS 2007), The Internet, 2nd-13th July 2007, Whittles Publishing (Scotland) (2007). To be published end of 2007

Lohrengel, A.; Schäfer, G.; Wesling, V.: Design strategies for the development of high strength coupling elements from requirement optimized composite materials, Creation of High-Strength Structures and Joints by Setting up Local Material Properties, trans tech publications, Stafa-Zurich, 2007, ISBN: 978-0-87849-455-2

Lohrengel, A.; Ostertag, W.; Sprick, R.: An innovative device for the manufacture of disposable medical- and healthcare products. Virtual International Conference on Innovative Production Machines and Systems (IPROMS 2007), The Internet, 2nd-13th July 2007, Whittles Publishing (Scotland) (2007). To be published end of 2007

Schäfer, G.: Auslegung von Zahnwellen-Verbindungen. VDI-Berichte 2004, VDI Tagung Wiesloch Okt. 2007, ISBN 978-3-18-092004-7

Korte, Th.: Dimensionierung und Gestaltung von spielbehafteten Längsstiftverbindungen. VDI-Berichte 2004, VDI Tagung Wiesloch Okt. 2007, ISBN 978-3-18-092004-7

Dietz, P.; Kruk, R.; Lohrengel, A.; Wieczorek, A.: Stanowisko do badan wlasnosci dynamicznych lozysk. XV Jubileuszowa Miedzynarodowa

Konferencja Naukowo – Techniczna TEMAG 2007, S. 25-29. Gliwice – Ustron Oktober 2007, ISBN 978-83-917265-6-3.

Dietz, P.; Kruk, R.; Lohrengel, A.; Wieczorek, A.: Wyniki obliczen parametrow dynamicznych lozysk tocznych. XV Jubileuszowa Miedzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna TEMAG 2007, S. 31-39. Gliwice – Ustron Oktober 2007, ISBN 978-83-917265-6-3.

Dietz, P.; Lohrengel, A.; Schwarzer, T.: Charakterystyka naprezen w linach hybrydowych wykonanych z tworzyw w trakcie wielowarstwowego ich nawijania na beben. XV Jubileuszowa Miedzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna TEMAG 2007, S. 139-151. Gliwice – Ustron Oktober 2007, ISBN 978-83-917265-6-3.

Rolshofen, W.; Dietz, P.; Schäfer, G.: Application of Tangible Acoustic Interfaces in the Area of Production Control and Manufacturing. J. Jacko (Ed.): Human-Computer Interaction, Part II, HCII 2007, LNCS 4551, pp. 920–925, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, ISBN: 978-3-540-73106-1

Studien- und Diplomarbeiten am IMW im Jahr 2007

Siemann, Eric: Untersuchung zur Porosität von Laser-Sinterwerkstoffen unter Verwendung gezielter Sinter-Strategien, Diplomarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Ebert, Sascha: Simulation einer Gelenkwelle mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode, Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Miesen, Robert: Berechnung einer formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode, Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Neuhaus, Sven: Erstellung eines Praktikumsdokumentes für das Optimierungsprogramm TOSCA, Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Neuhaus, Sven: Konstruktive Auslegung und Modellerstellung eines Rotorsystems bezüglich seines Schwingungsverhaltens, Diplomarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Wienecke, Heiko: Prognose von Klapper- und Quietschgeräuschen am Beispiel einer Nutzfahrzeuginstrumententafel, Diplomarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Mackensen, Alexander: Konstruktion und Auslegung eines Prüfstands zur Untersuchung dynamischer Torsionslasten, $T_{max} = 30 \text{ kNm}$, Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Hui, Xiaobei: Optimierung der Geometrie des Novikov - Zahnprofils für Welle/Nabeverbindungen mit TOSCA, Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Dawei, Wang: FE - Berechnungen zur Optimierung des Novikov - Zahnprofils bei Welle/Nabeverbindungen, Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Ma, Qian: Optimierung einer Nabe-Welle-Verbindung mit TOSCA, Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Cordes, Malte: Stress Relief Features for Drilling Tool Designs - Biegespannungsentlastungsmaßnahmen für Bohrwerkzeuge, Diplomarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Lababidi, Salah: Einfluss von Normen und Standards im Handel und Geschäftsverkehr -Betrachtung von Fallbeispielen-, Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Goseling, Heiko: Konstruktion eines Schneidwerks zur Zerkleinerung von Abfallproben, Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Cordes, Malte: Konstruktion einer Verschiebeeinheit zur Prüfung von Gelenkwellen in einem Verspannprüfstand, Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Borek, Radoslaw: Konstruktion eines in zwei Achsen verfahrbaren Lagertisches zur Prüfung von Gelenkwellen in einem Verspannprüfstand, Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Michna, Dominic: Integrierung von Synchron-Linearmotoren in eine CNC-Gravier/Fräsmaschine, Diplomarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2007

Nicht berücksichtigt sind Studien- und Diplomarbeiten, für die ein Sperrvermerk existiert.

Autoren

Bormann, Erik: Jahrgang 1971, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 10.07.2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. bormann@imw.tu-clausthal.de

Dietz, Peter: Jahrgang 1939, studierte Maschinenbau an der TH Darmstadt, wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebe der TH Darmstadt, Promotion 1971 über die Berechnung von Seiltrommeln, seit 1974 Leiter der Stabstelle Konstruktionssysteme der Pittler Maschinenfabrik AG, Langen, seit 1977 dort Leiter der Entwicklungsabteilung, seit 1.10.1980 Universitätsprofessor, bis 31.1.2007 Institutsdirektor des IMW. dietz@imw.tu-clausthal.de

Korte, Thomas: Jahrgang 1972, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.5.2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. korte@imw.tu-clausthal.de

Kramer, Wibke: Jahrgang 1980, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.5.2006 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW. kramer@imw.tu-clausthal.de

Kruk, Radoslaw: Jahrgang 1979, studierte als Doppeldiplom Maschinenbau, AGH Krakau, TU Clausthal, seit 3.2.2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. kruk@imw.tu-clausthal.de

Lau, Peter: Jahrgang 1970, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.1.2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. lau@imw.tu-clausthal.de

Lohrengel, Armin: Jahrgang 1966, studierte Maschinenbau/Konstruktionstechnik an der TU Clausthal und RWTH Aachen, bis 09/1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente und –gestaltung, Promotionsthema Lebensdauerorientierte Dimensionierung von Freiläufen, bis 01/2007 Leiter Maschinenentwicklung Paul Hartmann AG Heidenheim, seit 1.2.2007 Universitätsprofessor und Institutsdirektor des IMW. lohrengel@imw.tu-clausthal.de

Lütkepohl, Anke: Jahrgang 1976, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.5.2004 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW. luetkepohl@imw.tu-clausthal.de

Miehe, Andreas: Jahrgang 1971, studierte Informatik im Maschinenbau an der TU-Clausthal, seit 1998 Berater in der Industrie in den Bereichen Produktdatenmanagement und Netzwerkdesign, seit 1.1.2007 zusätzlich wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. miehe@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

Ostertag, Wolfgang: Paul Hartmann AG Heidenheim, Group Technology Service, wolfgang.ostertag@hartmann.info

Rolshofen, Wolfgang: Jahrgang 1975, studierte Geophysik an der TU Clausthal, seit 1.5.2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. rolshofen@imw.tu-clausthal.de

Sambale, Bianca: Jahrgang 1973, studierte Technomathematik an der TU Clausthal, seit 1.2.2005 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW. sambale@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, seit 2002 akademischer Oberrat. schaefer@imw.tu-clausthal.de

Schwarzer, Tim: Jahrgang 1977, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.11.2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. schwarzer@imw.tu-clausthal.de

Seitz, Tobias: Jahrgang 1975, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.5.2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. seitz@imw.tu-clausthal.de

Siemann, Eric: Jahrgang 1978, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.5.2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. siemann@imw.tu-clausthal.de

Sprick, Ralf: Paul Hartmann AG Heidenheim, Group Technology Service. ralf.sprick@hartmann.info

Wächter, Martina: Jahrgang 1959, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.4.1985 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW. waechter@imw.tu-clausthal.de

Wolny, S.: Jahrgang 1949, Leiter des Lehrstuhls für Technische Mechanik der Bergakademie Krakau. stwolny@uci.agh.edu.pl

Hilgermann, Jan Lukas: Jahrgang 1981, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.2.2007 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW. hilgermann@imw.tu-clausthal.de

Wieczorek, Andrzej: Jahrgang 1973, studierte Bergbau an der TU Gleiwitz, seit 1.11.1999 wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Berg-

baumechanisierung in TU Gleiwitz, seit 1.12.2007 Adiunkt, Promotion im November 2007. wieczorek_and@interia.pl

Skoc, Antoni: Jahrgang 1939, studierte Bergbau an der TU Gleiwitz, seit 1973 wissenschaftliche Mitarbeiter am Bergbauinstitut in Gleiwitz, Promotion 1978, Leiter der Konstruktionsabteilung, seit 1995 Vize Direktor am Institut für Bergbaumechanisierung TU Gleiwitz. antoni.skoc@polsl.pl

So finden Sie das IMW

Aus Richtung Hannover / Hamburg:

A7 bis Ausfahrt **Seesen** → An der Ampel rechts; nach ca. 1,5 km links auf die vierspurige **B243**

B243 an der Ausfahrt **Clausthal-Zellerfeld, Braunlage** verlassen auf die **B242**

B242 → Richtung Ortsteil Zellerfeld abbiegen

Im **Ortsteil Zellerfeld** rechts auf die **B241** einbiegen → nach langgezogener Linkskurve in den Kreisverkehr einbiegen → auf rechter Spur dem Verlauf der **B241** folgen und den Kreisverkehr verlassen → nach ca. 100 m rechts die Robert-Koch-Straße einbiegen.

Das IMW befindet sich nach ca. 400 m (zwei Querstraßen) auf der rechten Seite.

Aus Richtung Göttingen / Kassel:

A7 bis Ausfahrt **Northeim-Nord** → **B3** bis **Northeim**; in Northeim Umgehungsstraße zur **B247** → **B247** Richtung **Katlenburg / Duderstadt**

In **Katlenburg** auf die **B241** Richtung **Osterode** abbiegen.

Am **Ortseingang Osterode** auf die **B243** Richtung Herzberg. Nach ca. 500 m Ausfahrt **Goslar / Clausthal-Zellerfeld** abfahren → **B241** Richtung Clausthal-Zellerfeld

Nach **Ortseingang Clausthal-Zellerfeld** der Hauptstraße folgend rechts abbiegen → an T-Einmündung (rechterhand der Tankstelle) rechts abbiegen und Clausthal verlassen.

Nach 1,5 km links abbiegen Richtung Goslar / Clausthal → **Ortsschild Clausthal** → in die dritte Straße (Robert-Koch-Straße) links einbiegen.

Das IMW befindet sich nach ca. 250 m auf der linken Seite.

