

## 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-

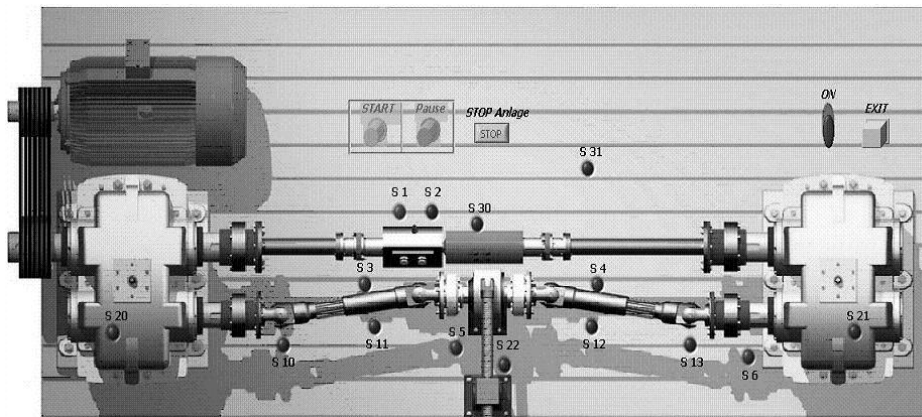
frequenz, auftretender Querkräfte und des Knickspiels sowie der axialen Rückstellkräfte bei unterschiedlichen Werkstoffkombinationen.

- 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.

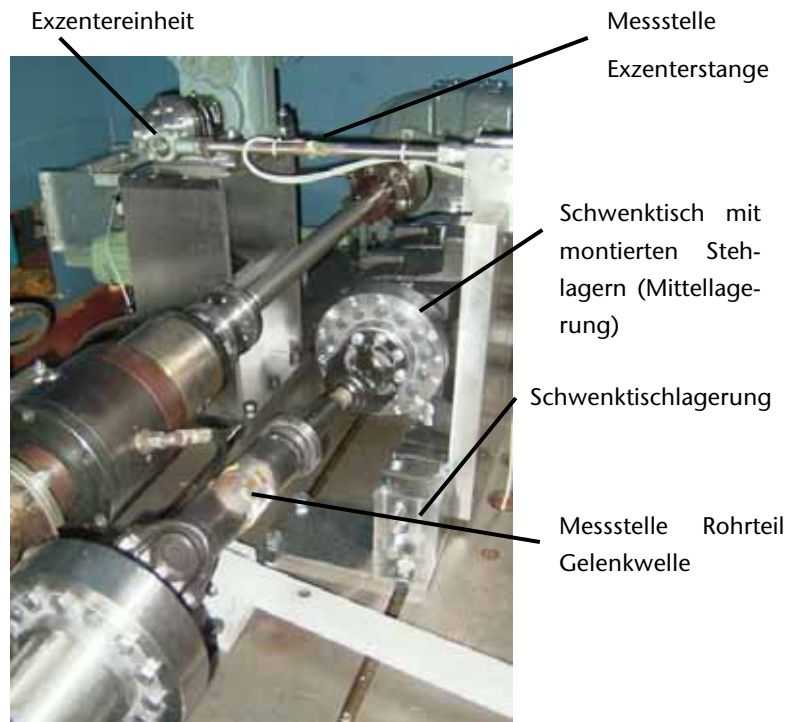
Zur kontinuierlichen messtechnischen Überwachung des Prüfstands wurde eine Software zur Messwerterfassung und -auswertung erstellt. Der in **Bild 1** dargestellte Screenshot vermittelt einen Eindruck, welche Messwerte das Programm an welcher Stelle abgreift.



**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.

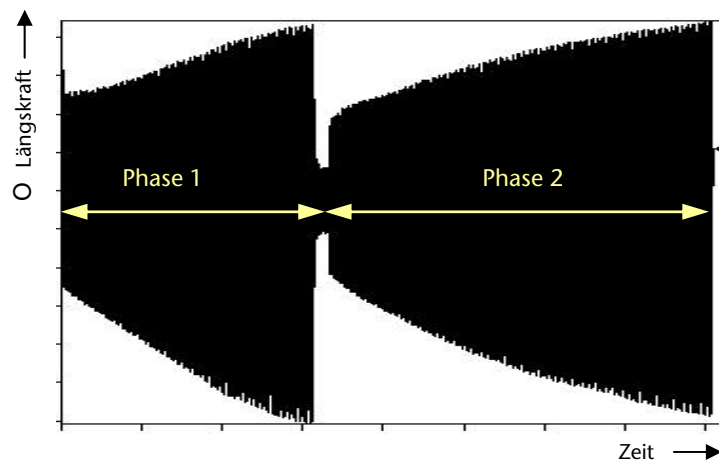


**Bild 2:** Einbausituation der Längskraftmessstellen

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 Längenausgleichen 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.

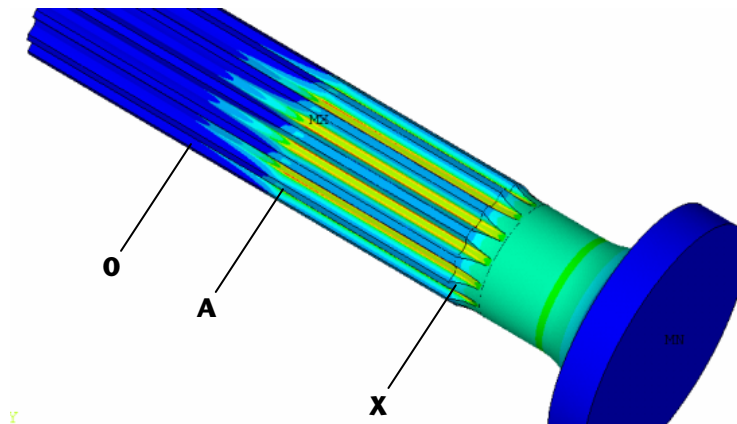
Bezüglich des auf dem Prüfstand zu fahrenden Betriebslastenkollektivs sind 30g als obere Lastgrenze angestrebt. Die darunter liegenden Bereiche werden in drei Klassen (entsprechend den ähnlichen Farben in der Darstellung) abgestuft gefahren.

-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	
-0.45	0	1	0	1	0	0	2	5	3	6	16	15	10	23	17	11	14	11	11	10	3	7	3	1	2	1	0	0	0	
-0.42	0	0	1	0	1	2	3	4	1	7	6	7	14	24	18	21	25	21	7	13	13	6	2	2	2	0	1	0	0	
-0.39	1	2	1	0	3	1	1	0	6	9	18	22	33	32	44	54	48	36	25	23	20	7	5	7	2	3	1	0	1	
-0.36	1	2	2	5	1	2	3	4	7	11	18	23	43	55	61	60	61	57	22	19	14	10	4	3	2	2	2	0	1	
-0.33	2	1	2	2	0	2	5	2	6	14	13	22	44	64	61	100	83	77	55	41	24	16	10	5	6	3	2	1	3	
-0.30	2	2	4	8	1	3	6	8	24	15	26	55	51	134	134	219	226	181	167	78	67	33	36	17	18	12	4	2	1	
-0.27	3	2	6	9	4	9	10	21	17	25	71	78	185	201	532	596	249	226	119	110	64	34	29	6	7	5	3	3	4	
-0.23	5	8	7	15	8	7	16	22	42	51	119	181	370	431	953	715	517	430	245	155	108	62	25	17	20	14	9	4	7	
-0.20	5	7	13	14	13	18	23	39	56	60	160	271	471	681	963	909	763	563	308	208	139	70	53	25	25	15	8	16	10	
-0.17	19	14	10	19	13	21	37	50	79	108	239	373	766	1026	1748	1742	1281	970	483	311	193	87	77	38	43	22	17	6	10	
-0.14	17	24	29	26	30	44	60	65	109	153	210	442	712	1499	2127	3515	3772	2492	1800	900	547	341	167	115	71	45	30	21	30	
-0.11	22	21	27	43	29	48	64	69	142	172	264	458	859	1896	2962	4533	4710	3476	1833	893	492	174	139	77	54	43	34	21	21	
-0.08	30	37	52	58	61	70	119	117	192	272	429	628	1402	3340	5594	10392	12554	7092	4303	1877	1017	609	351	219	134	101	75	61	55	
-0.05	42	43	45	66	92	96	145	152	235	333	496	1049	1719	4074	7462	16926	24175	10548	5407	2160	1178	533	351	263	165	116	75	65	72	
-0.02	106	118	147	184	269	449	443	750	790	1173	2370	3340	7765	14731	26666	47430	24025	19445	9443	2162	1395	670	465	311	280	233	154	159	110	
0.02	152	162	135	218	250	416	644	651	943	1025	1376	2641	4122	8064	17006	35297	46323	28971	11963	4720	2512	1539	1189	694	516	332	287	253		
0.05	43	56	48	75	86	102	143	178	263	363	559	1156	1806	3369	6356	13112	28598	11971	5763	2219	1213	794	437	291	174	158	110	60	78	
0.08	43	47	38	59	74	68	135	133	211	291	444	681	1137	3389	3778	11620	14722	8138	4422	1911	995	673	337	211	125	116	79	58	65	
0.11	18	19	28	31	35	61	79	94	125	184	262	374	542	1978	3194	5475	6436	3947	2633	1206	636	374	197	142	86	56	41	31	32	
0.14	14	22	19	30	25	52	54	73	121	116	193	456	613	1430	2097	3163	3898	2500	1804	849	617	307	159	107	52	50	35	26	21	
0.17	14	16	17	27	23	27	41	43	64	104	152	110	401	939	1330	2133	2331	1590	1171	818	361	218	117	92	54	40	17	15	13	
0.20	10	7	6	19	16	16	25	22	56	66	96	177	260	541	626	1060	1170	839	670	469	202	152	71	52	24	21	13	12	10	
0.23	7	6	5	7	12	13	17	27	40	59	79	141	200	461	475	651	711	536	486	267	165	98	50	35	24	12	9	13	4	
0.27	2	2	3	6	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	
0.30	2	4	5	2	2	4	6	7	14	25	35	55	89	120	150	232	229	180	137	95	63	34	22	22	5	4	5	4	1	
0.33	2	3	3	1	2	1	2	9	4	5	14	32	50	51	82	100	140	124	97	102	54	37	26	24	12	8	5	2	0	
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	
0.38	0	1	1	0	1	0	1	4	3	7	13	16	20	29	37	30	35	43	43	38	19	21	14	11	6	2	3	2	0	
0.42	0	1	1	0	1	1	3	2	3	5	12	11	18	14	30	39	22	24	11	4	6	5	4	1	2	0	3	1	1	
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	1	0	0	
0.48	0	1	0	0	1	0	1	0	1	4	5	7	6	6	10	15	10	11	14	8	4	6	2	2	0	3	0	2	0	0

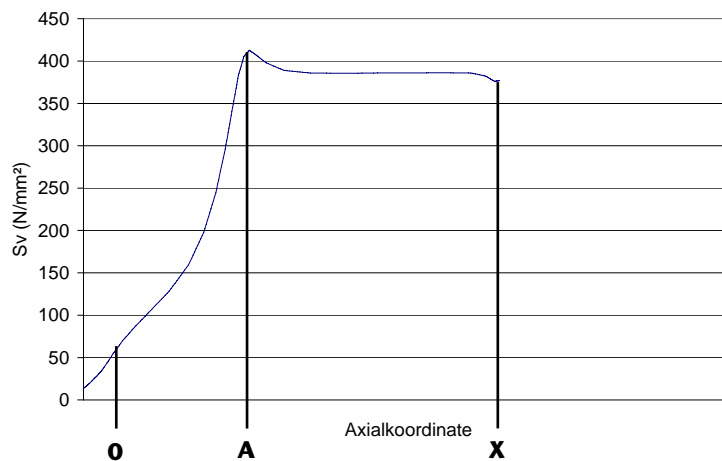
**Bild 4:** Häufigkeits-Matrix der Verbundklassierung (erzeugt aus Daten einer Schienenfahrzeugmessung)

## 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