

Baureihenentwicklung von Drehmomentaufnehmern

Birkholz, H.; Garzke, M.

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

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

1 Einleitung

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

2 Der Drehmomentaufnehmer

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

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

Tabelle 2.1: Anforderungsliste /3/

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

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

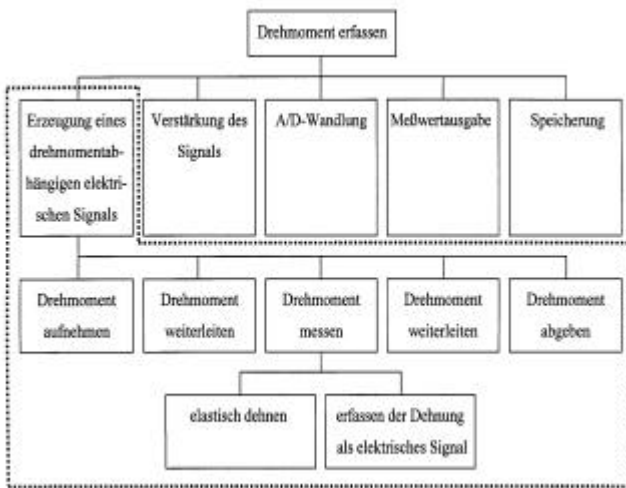


Bild 2.2: Funktionsanalyse /3/

2.1 Varianten

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

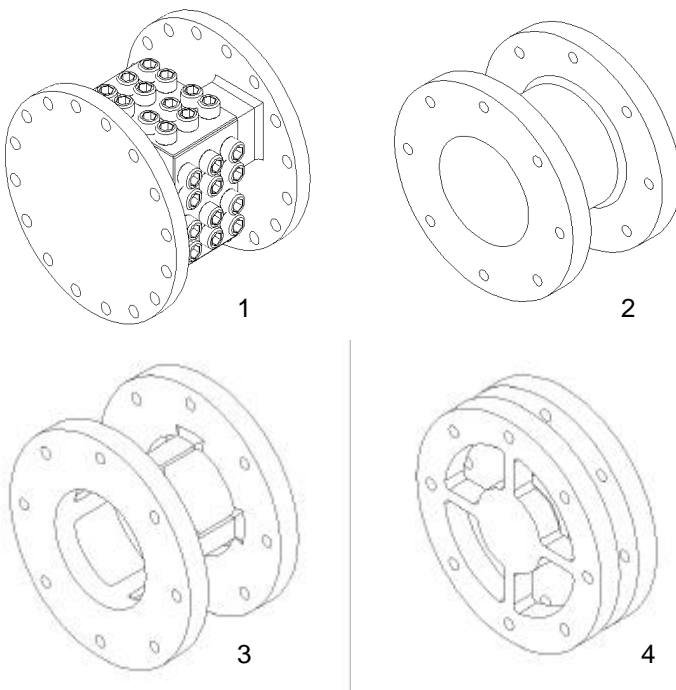


Bild 2.3: Lösungsvorschläge für Aufnehmer /3/

2.1.1 Technische Bewertung

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

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

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

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

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

n - Gesamtzahl der Kriterien

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

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

Tab. 2.2: Technische Bewertung der Lösungsvorschläge /3/

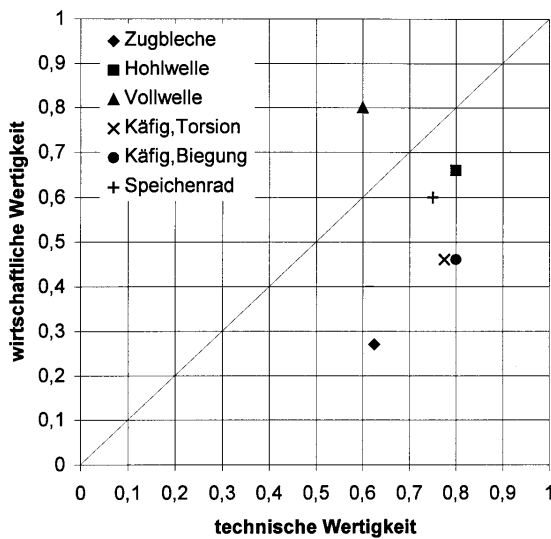


Bild 2.4: Darstellung der technischen und wirtschaftlichen Wertigkeit der Varianten /3/

3 Baureihenentwicklung

3.1 Ermittlung der Ähnlichkeitskennzahlen

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

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

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

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

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

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

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

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

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

und

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

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

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

3.2 Abstufung der Baureihe

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

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

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

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

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

Für den Gesamtmeßbereich lautet das Verhältnis

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

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

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

darstellen. Durch logarithmieren dieser Gleichung erhält man den Zusammenhang

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

so daß sich die Stufenzahl n wie nachfolgend berechnet

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

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

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

Tabelle 3.1: Nennmomente der Aufnehmer /3/

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

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

3.3 Auslegung der Meßstelle

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

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

Tabelle 3.2: Konstanten der Meßstellenauslegung

Formt man die Gleichung

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

nach

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

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

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

nach

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

läßt sich die erforderliche Hauptspannung σ_1 ermitteln.

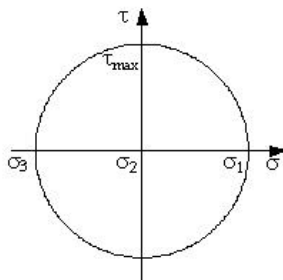


Bild 3.1: Mohr'scher Spannungskreis für den Belastungsfall reine Torsion

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

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

Da für die Torsionsschubspannung τ_t

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

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

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

in die Form

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

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

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

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

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

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

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

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

3.4 Überprüfung der anderen Baugrößen

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

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

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

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

4 Literatur

- /1/ Garzke, M.; Henschel, J.; Schäfer, G.: Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 1). Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1998
- /2/ Birkholz, H.; Heider, G.: Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 2). Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1998
- /3/ Faulwasser, M.: Entwicklung von Drehmoment- und Kraftaufnehmern nach dem Bauweisenprinzip. Unveröffentlichte konstruktive Studienarbeit am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1999