

**Abb. 2.52** Bauformen von Axialkompensatoren mit Anschlussflanschen

Die verschiedenen Bauarten und Hinweise zum Einbau dieser Kompensatoren werden im nächsten Abschnitt behandelt.

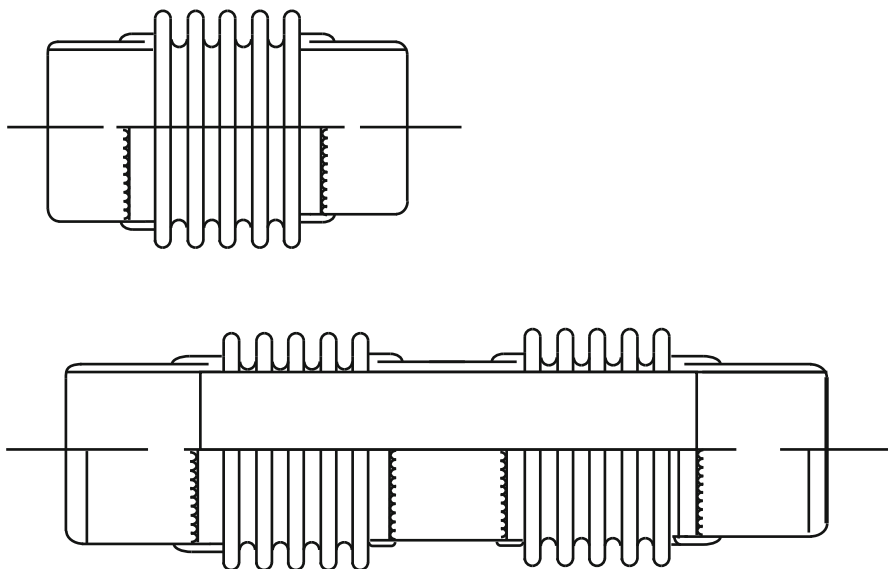
## 2.3 Bauarten von handelsüblichen Kompensatoren und deren Einbau in Dampf- oder Heißwasserrohrleitungen

### 2.3.1 Einfache Wellrohr- oder Axialkompensatoren

#### 2.3.1.1 Bauarten und Funktion

Abbildung 2.52 zeigt verschiedene Ausführungen von Axialkompensatoren. Der Balg und eventuelle Leitrohre werden aus Edelstahlblech gefertigt.

Das Leitrohr aus dünnwandigem Edelstahlblech (Werkstoff wie Metallbalg) soll das Medium verwirbelungsfrei durch den gewellten Balg leiten und den Durchflusswiderstand verringern. Im Normalfall ist ein Leitrohr nicht erforderlich, jedoch bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten zu empfehlen. Es verhindert außerdem ein Verschmutzen und Zusetzen der Innenwellen. Führungsrohre aus starkwandigem Blech können innen oder außen angebracht werden. Sie führen den Balg bei seinen Axialbewegungen und verhindern ein Ausknicken. Besonders bei Doppelbalg-Kompensatoren sind Führungsrohre bei bestimmten Betriebsverhältnissen wichtig, da durch die größere Kompensatorbaulänge die Möglichkeit des Ausknickens besteht. Die Führungsrohre werden einseitig durch Schweißen befestigt. Innere Führungsrohre können gleichzeitig auch die Funktion eines Leitrohrs und äußere Führungsrohre die Funktion eines Schutzrohrs erfüllen. Führungsrohre können auch mit eingebauten Endanschlägen versehen werden und dienen dann noch als Schubbegrenzer.



**Abb. 2.53** Bauformen von Axialkompensatoren mit Einschweißenden

Abbildung 2.53 zeigt einen Einschweißkompensator und einen Doppelbalgkompensator mit Einschweißenden. Beim Doppelbalgkompensator kann im Rohrzwischenstück auch ein Festpunkt ausgeführt werden.

Dem Kompensator mit Anschlussflanschen wird man immer dann den Vorzug geben, wenn betriebsbedingt, also bei hohen Lastwechselungen (Schwingungen und Temperaturschwankungen), eine geringe Lebensdauer zu erwarten ist.

Die Lebensdauer wird sehr wesentlich durch die Einhaltung der zulässigen Betriebsbedingungen und der Einbauvorschriften bestimmt. Folgende Punkte sind daher besonders zu beachten:

Falsche Werkstoffwahl führt zu Korrosionsschäden (Lochfraß o. Ä.); hochfrequente Schwingungen zu Ermüdungen und Spannungsrissen; stoßweise Druckbeanspruchung (z. B. Wasserschläge) zu unkontrollierten Druckspitzen; Überschreitung des maximal zulässigen Drucks zur Deformation des Balges. Ein richtiger Einbau, besonders die Auslegung der Festpunkte und Rohrführungen, beginnt bereits bei der Planung. Die Einbauvorschriften sind zu beachten.

Die in den Tabellen angegebenen Bewegungsaufnahmen beziehen sich auf 1000 Doppelhübe bei 20 °C ( $\Delta + / \Delta -$ ), ohne dass ein Bruch eintritt. Werden größere Lastwechselzahlen als 1000 verlangt, muss die maximale Bewegungsaufnahme herabgesetzt werden.

Steigende Temperaturbelastung schränkt die Bewegungsaufnahme ebenfalls ein (s. Abb. 2.54).

Kompensatoren mit Entleerungen im Balg nach Abb. 2.55 werden z. B. in der Chemieindustrie bei Brüderdampfleitungen eingesetzt. Zur Entleerung sind Metallschläuche zu einem Sammelrohr zu ziehen, und das Sammelrohr erhält dann einen Kondenstopf.

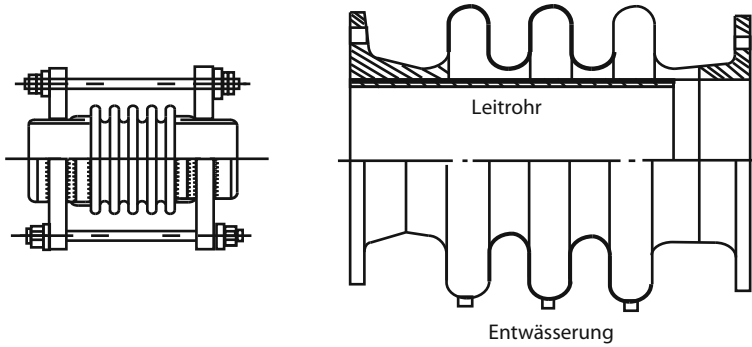


Abb. 2.54 Zulässige Lastwechsel für Axialkompensatoren

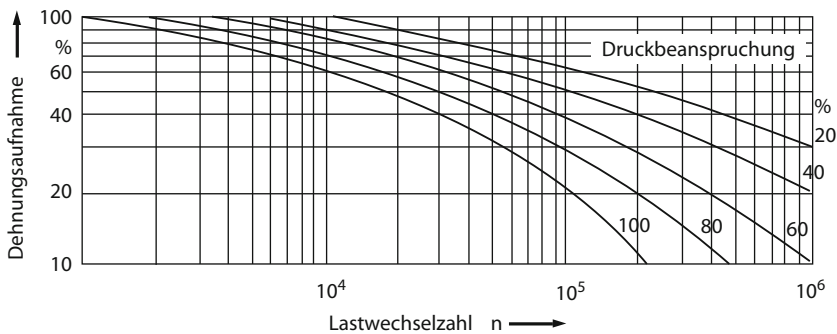


Abb. 2.55 Sonderausführungen von Axialkompensatoren

Wasser oder Feststoffansammlungen im Balg würden zu Betriebsstörungen führen.

Axialkompensatoren mit Längenbegrenzung nach Abb. 2.55 verhindern die Streckung des Kompensators und entlasten die Festpunkte. Der Festpunkt hat dann nur noch die Reaktions- oder Federkraft des Kompensators aufzunehmen. Axialkompensatoren werden bis zu PN 25 serienmäßig gefertigt.

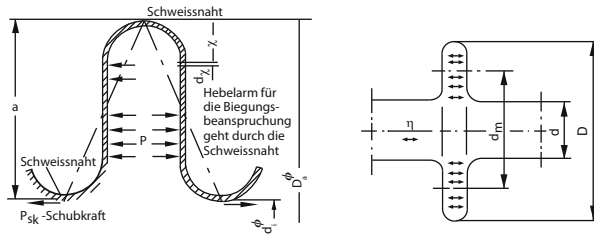
### 2.3.1.2 Berechnung

Zum Ausgleich der Längenänderung von gradlinig verlegten Rohrleitungen können Wellrohrausgleicher, wie in Abb. 2.56 dargestellt, zur Aufnahme der axialen Verschiebung eingebaut werden.

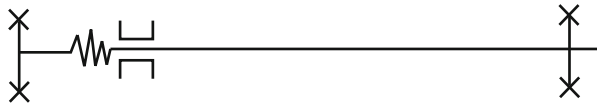
Für die einwandfreie Funktion der Wellrohrausgleicher ist aber der Einbau zwischen zwei ausreichend bemessenen Festpunkten und der Einbau von Zwangsführungen im Abstand von maximal  $2 \cdot d_a$  erforderlich (s. hierzu Abb. 2.57).

In der Fachliteratur wird immer wieder darauf hingewiesen, dass handelsübliche Dehnungsausgleicher, vor allem Axialkompensatoren, keinen störungsfreien

**Abb. 2.56** Bezeichnungen und Funktionsskizze für einen Wellrohrausgleicher



**Abb. 2.57** Einbauskizze für einen Axial-Wellrohrausgleicher



Betrieb ermöglichen und in der Praxis Betriebsstörungen und Schäden oft an diesen Bauelementen auftreten.

Der Verfasser hat aber in seiner Praxis, auch als vereidigter Sachverständiger, immer wieder feststellen müssen, dass die bei Fernheizleitungen entdeckten Schäden an Axialkompensatoren nur deshalb entstanden sind, weil diese falsch eingebaut wurden, also die Zwangsführungen zu weit vom Kompensator oder gar nicht eingebaut und weil die Festpunkte zu schwach oder fehlerhaft ausgelegt und ausgeführt worden waren. Aus diesem Grund wird hier die Berechnung der erforderlichen Festpunktkraftaufnahme, speziell bei Axialkompensatoren, nochmals beschrieben und in einem Beispiel gezeigt.

Die von den Festpunkten aufzunehmende Kraft  $F$  setzt sich aus den nachfolgend beschriebenen Teilkräften zusammen:

$$F_F = F_{p1} + F_{p2} + F_f + F_R \text{ [N]}, \quad (2.42)$$

darin ist  $F_{p1}$  die vom Betriebsdruck auf die Fläche des Wellrohrausgleichers erzeugte Kraft, die den Kompensator auseinanderdrücken will.

Die wirksame Wellrohrfläche ergibt sich aus:

$$A_a = \pi \cdot \int_0^a x(D_a - 2x) \cdot dx$$

zu

$$A_a = \frac{\pi(D_a^2 + D_a \cdot d_i - 2 \cdot d_i^2)}{12} \text{ [cm]} \quad (2.43)$$

und  $F_{p1} = p \cdot A_a \cdot 9,81 \text{ [N]}$ .

Die Kraft  $F_{p1}$  ist die Kraft, die auch als Längskraft vom Innendruck in jedem Rohr wirkt und dort eine Längsspannung erzeugt:

$$F_{p2} = p \cdot \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4}$$

$$F_{p2} = p \cdot \frac{d_i^2 \cdot \pi \cdot 9,81}{4} \text{ [N]} \quad (2.44)$$

Die Gl. 2.43 und 2.44 lassen sich zusammenfassen zu

$$F_p = F_{p1} + F_{p2} = 9,81 \cdot \pi \cdot p \frac{(D_a^2 + D_a \cdot d_i + d_i^2)}{12} \text{ [N]}. \quad (2.45)$$

Die Wirkfläche eines Wellrohrkompensators wird aber auch von allen Herstellern für den jeweiligen Kompensator-Typ und Rohrdurchmesser bekannt gegeben. Mit der genannten Wirkfläche  $A \text{ [cm}^2\text{]}$  aus dem Herstellerkatalog erhält man dann die einfache Gleichung:

$$F_p = A[\text{cm}^2] \cdot p[\text{bar Überdruck}] \cdot 9,81 \text{ [N]},$$

darin ist wie vorher  $p$  der tatsächliche Betriebsdruck oder Prüfdruck und  $A$  die wirksame Balgquerschnittfläche. Der Faktor 9,81 dient zur Umrechnung von kg in N.

Für die Bemessung des Festpunkts ist noch die Federkraft  $F$  des Kompensators zu berücksichtigen. Dies ist die Kraft, die beim Zusammendrücken des Kompensators aufzuwenden ist und die als Reaktionskraft auf den Festpunkt wirkt. Als Eigenwiderstand oder Federrate wird diese Reaktionskraft in N/mm im Katalog der Hersteller angegeben. In einigen Katalogen werden diese Eigenwiderstände auch in N/mm und je Balg aufgeführt (Tab. 2.8).

Bei der Berechnung muss der Ingenieur die tatsächliche Angabe und deren Dimension beachten. Der tatsächliche Wert kann nur vom Hersteller im Versuch ermittelt werden und wird dem Herstellerkatalog entnommen. Die Berechnungsformel lautet bei der für Axialkompensatoren üblichen Vorspannung von 50 %:

$$F_f = C \cdot \frac{\Delta L}{2} \text{ [N]}, \quad (2.46)$$

darin sind  $\Delta L$  die vom Kompensator aufzunehmende Gesamtausdehnung in mm und  $C$  der Eigenwiderstand oder die Federrate in N/mm.

Als weitere Kraft ist noch der Reibungswiderstand von allen Gleitlagern und Zwangsführungen vom Festpunkt aufzunehmen. Die Berechnung von  $F_R$  erfolgt nach Gl. 2.41 und entsprechend Beispiel 2.12.

Damit ergibt sich die Festpunktkraft zu

$$F_F = F_p + F_f + F_R \text{ [N]}, \quad (2.47)$$

darin ist  $F_p$  nach Gl. 2.45 und  $F_f$  nach Gl. 2.46 zu berechnen.

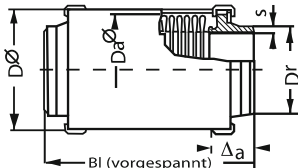
Die Festpunkte und Zwangsführungen sind im Abstand von  $l = 2 \cdot d_a$  anzuordnen. Bei langen Rohrstrecken zwischen zwei Festpunkten oder zwischen einer Zwangsführung und einem Festpunkt muss die Rohrstrecke noch hinsichtlich Knickung und Ausbeulung untersucht werden. Bei der Nachrechnung der kritischen Knicklänge oder kritischen Knickkraft ist Fall IV der Eulerschen Knickkraftformel mit der Einspannung nach Abb. 2.55 und der Knicklänge  $L_k = 0,5 L$  anzuwenden.

Für die kritische Knicklast gilt danach

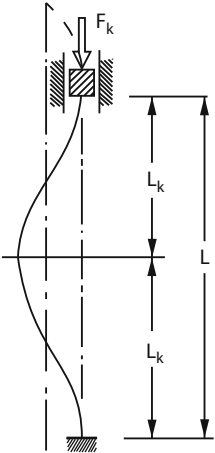
$$F_k = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \text{ [N]}. \quad (2.48)$$

Wenn die Festpunktkraft größer oder gleich  $F_k$  ist, muss bei  $L_k = 0,5 L$  eine weitere Zwangsführung installiert werden (Abb. 2.58).

**Tab. 2.8** Maße und technische Daten, Gelenkkompensator GHF, Hersteller IWK, DN300

Wellenzahl		totale Dehnungsaufnahme bei 50 % Vorspannung								Balg		
			axial mm	a	D <sub>r</sub> mm	s mm	BL mm	Gew. ca. kg	D mm	D <sub>a</sub> mm	A cm <sup>2</sup>	wirksame Querschnittfläche
												± N/mm ± 30 %
200	10	20	60			340	21					530
		40	110			565	32					265
		60	160			790	42					190
		80	200			1010	52					130
	16	20	60			340	21					530
		40	110			565	32					265
		60	160	219,1	5,9	790	42	256	245	397		190
		80	200			1010	52					130
25	20	60			340	21					530	
	40	110			565	32					265	
	60	160			790	42					190	
	80	200			1010	52					130	

**Abb. 2.58** Fall IV der Eulerschen Lagerungsarten



### Beispiel 2.13: Auswahl eines Axialkompensators und Berechnung der Festpunktkräfte

**Aufgabenstellung** Für eine Hochdruckdampfleitung DN 200 ( $207,3 \times 5,9$ ) ist ein Axialkompensator aus der Herstellerliste auszuwählen und die von den Festpunkten aufzunehmende Kraft zu berechnen.

Gegeben:

Leitungslänge 100 m  
 Betriebsdruck 20 bar Überdruck  
 Betriebstemperatur 250 °C  
 Werkstoff der Rohrleitung St 35  
 Montageendtemperatur 20 °C  
 Dicke der Wärmedämmung 140 mm, Steinwolle

Gesucht:

- erforderliche Dehnungsaufnahme*
- Wahl des Axialkompensators*
- Berechnung der Festpunktkraft*
- Berechnung der kritischen Knickkraft und Anordnung der Zwangsführung*

### Lösung

- erforderliche Dehnungsaufnahme*

Berechnung nach Gl. 2.1:

$$\Delta L = 12,5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{mK}} \cdot 230 \text{ K} \cdot 100 \text{ m} = 0,287,5 \text{ m} = 287,5 \text{ mm}$$

- Wahl des Axialkompensators*

Gewählt wird der Typ 307/214 mit Anschweißenden PN 25 mit 60 Wellen und einer Dehnungsaufnahme von axial 160 mm bei 50 % Vorspannung. Es werden 2 Kompensatoren DN 200 mit einer Einbaulänge 790 mm nach der folgenden Einbauskizze installiert (s. Tab. 2.9).

- Berechnung der Festpunktkraft*

Die wirksame Querschnittfläche je Balgwelle wird vom Hersteller mit  $397 \text{ cm}^2$  angegeben. Die Nachrechnung nach Gl. 2.43 ergibt:

$$A_a = \frac{\pi(24,5^2 + 24,5 \cdot 20,73 - 2 \cdot 20,73^2)}{12} = 65,1 \text{ cm}^2$$

$$A_R = \frac{20,73^2 \cdot \pi}{4} = 337,5 \text{ cm}^2$$

$$A_{ges} = 65,1 \text{ cm}^2 + 337,5 \text{ cm}^2 = 402,6 \text{ cm}^2$$

Die angegebene Querschnittfläche stellt die wirksame Fläche vom Balgaußen-durchmesser einschließlich Rohrquerschnitt dar. Damit wird

$$F_p = 9,81 \cdot 20 \text{ bar} \cdot 397 \text{ cm}^2 = 77.891 \text{ N.}$$

Tab. 2.9 Maße, technische Daten des Gelenkkompensators, Typ GHF, Herst. IWK, DN 300

										Balgwerkstoff			CrMo		CrMoV 18/8 CrNi		CrMo		CrMoV 18/8 CrNi														
										zulässige Dehnspannung																							
										500		Vorspannung 100 % -		75		100		113		150													
										475				-		95		108		142		162											
										450		Vorspannung 50 %		150		150		150		225		225		225									
										425				184		184		160		276		276		240									
350 400														200		200		166		300		300		249									
ND Bei den obigen Temperatu- ren in °C ist Gelenkkompensa- tor mit ND und aus Werk- stoff										Flansch			Ver- stell- moment		Wellen/Balg				Gewicht		Wellen/Balg				Gewicht								
St.358/Hi l/19Mn5			13CrMo44			A		B		M		Mr		BL		L <sub>1</sub>		Gewicht		BL		L <sub>1</sub>		Gewicht									
geeignet für bar Überdruck										mm		mm		kpm		mm		mm		kg		-		mm		mm		kg					
10										520		445		310		1		9		1300		685		169		9		1650		1035		192	
16 10 8										520		460		290		1,5		9		1400		745		204		9		1750		1095		229	
25 16 13 22 21 20 18										570		485		270		1,7		9		1450		795		273		9		1850		1195		304	
40 24 21 35 34 33 29										630		515		220		2,6		9		1650		955		410		9		2100		1405		457	

Der Eigenwiderstand des Kompensators wird für den gewählten Typ mit 19 Kp/mm angegeben, dies entspricht 190 N/mm.

Der Kompensator muss

$$\Delta L = \frac{287,5 \text{ mm}}{2} = 143,75 \text{ mm}$$

Dehnung bei 50 % Vorspannung aufnehmen.

Damit ergibt sich eine Reaktions- oder Federkraft von

$$F_F = 143,75 \text{ mm} \cdot 190 \text{ N/mm} = 27.360 \text{ N}.$$

Das Gewicht von Rohrleitung und Wärmedämmung ergibt sich nach Tab. 2.4 und aus Abb. 2.11 zu 31 + 30 = 61 kg/m.

Damit wird nach Gl. 2.41

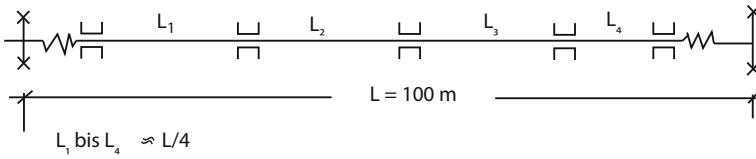
$$F_R = 0,15 \cdot 9,81 \text{ N/kg} \cdot 61 \text{ kg/m} \cdot 100 \text{ m} = 8.976 \text{ N}.$$

Die vom Festpunkt aufzunehmende Kraft ergibt sich somit nach Gl. 2.42 zu:

$$F_F = 77.891,4 + 27.312,5 + 8.976 = \underline{115.760 \text{ N}}.$$

Das entspricht einer Gewichtskraft von ca. 12 t





**Abb. 2.59** Einbauskeizze einschließlich Zwangsführung

d) *Berechnung der kritischen Knickkraft nach Gl. 2.48*

$$F_k = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot 19,1 \cdot 10^{10} \cdot 224,7}{10.000 \cdot 10^7} = 16.943 \text{ N}$$

Die kritische Knickkraft ist überschritten. Es muss eine Zwangsführung bei  $L/2$  installiert werden!

Eine weitere Nachrechnung zeigt, dass im Abstand von 25 m Zwangsführungen vorzusehen sind (Abb. 2.59).

## 2.3.2 Gelenkkompensator

### 2.3.2.1 Bauarten und Funktion

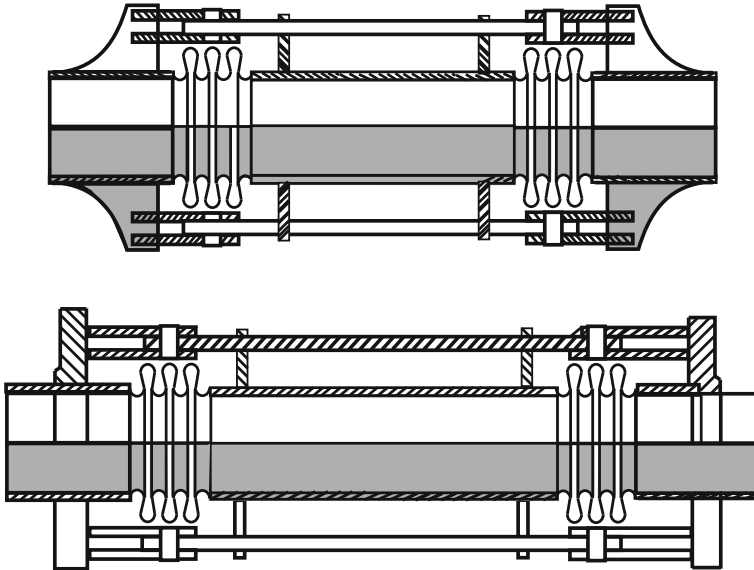
Ein Kompensator aus zwei an einem Zwischenrohrstück eingebauten Bälgen oder Wellenrohren mit Längenbegrenzern, die gleichzeitig als Gelenk dienen, wird als Gelenkkompensator bezeichnet. Als Gelenk dienen die an beiden Seiten des Rohrzwischenstücks angebrachten Bälge, die eine Winkeldrehung des Schenkels zulassen. In die Begrenzungsschienen sind in Höhe der Bälge ebenfalls Gelenke eingebaut (s. Abb. 2.60).

Je mehr Wellen im Balg vorhanden sind und je länger das Rohrzwischenstück ist, umso größer ist die Dehnungsaufnahme des Gelenkkompensators. Abbildung 2.61 zeigt die möglichen Einbausituationen von Gelenkkompensatoren, und in Abb. 2.62 ist der Einbau von Gelenkkompensatoren in einen U-Bogen-Dehnungsausgleicher dargestellt.

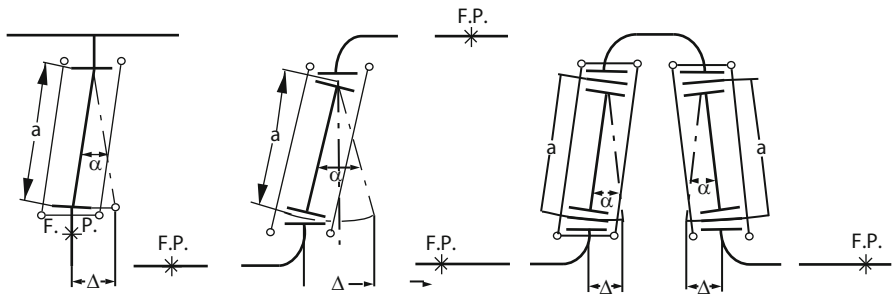
Die Größe der Verstellkraft  $M_\alpha$  (Reaktionskraft oder Federkraft) eines Gelenkkompensators ergibt sich aus den Verstellmomenten.

Die Verstellmomente entstehen durch das Zusammendrücken der Gelenkbälge in den Innenseiten und durch das Auseinanderziehen der Wellenbälge auf der Außenseite und sind von Winkel  $\alpha$  und von der Dehnungsaufnahme abhängig. Ein weiteres Verstellmoment  $M_r$  ergibt sich aus der Reibung in den Dehnungsbegrenzungsschienen und deren Gelenken.

Beide Verstellmomente (Federreaktion und Reibungsmoment im Gelenk) können nur vom Hersteller gemessen werden und sind für die Berechnung aus den Herstellerlisten zu entnehmen.

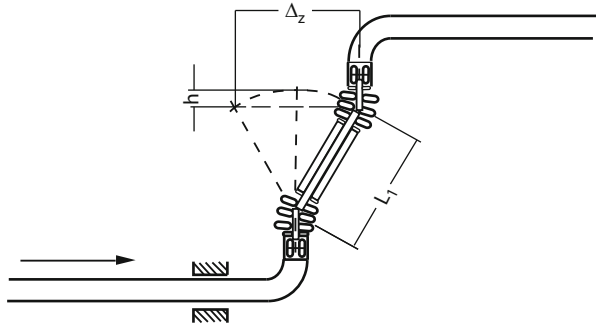


**Abb. 2.60** Gelenkkompensatoren mit Anschweißende oder festem Flansch

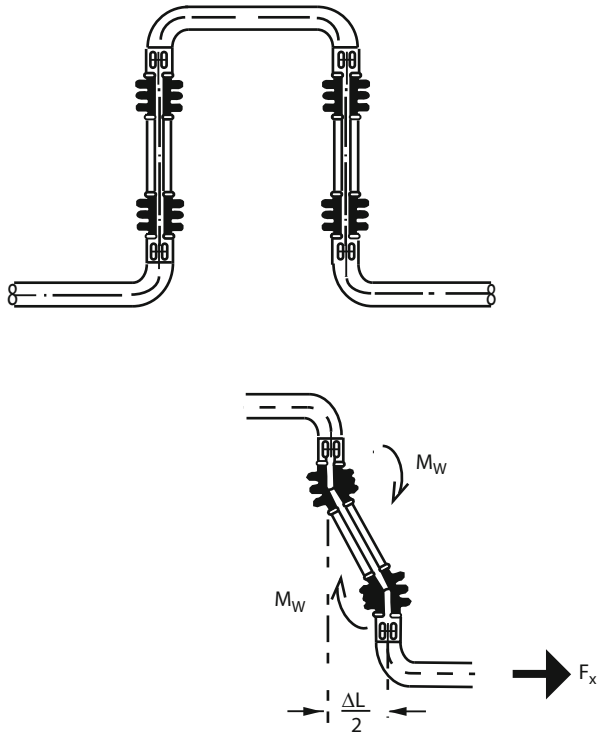


**Abb. 2.61** Anwendungs- und mögliche Einbausituationen für Gelenkkompensatoren

**Abb. 2.62** U-Bogen-  
Dehnungsausgleicher mit  
Gelenkkompensatoren in  
neutraler Stellung und mit  
eingebrachter Vorspannung  
als Teil des U-Bogens



**Abb. 2.63** Verschiebung um  $h$  in  $y$ -Richtung in Abhängigkeit von  $\Delta Z$



Das obere Verbindungsrohr des U-Bogen-Ausgleichers darf keine Zwangsführung erhalten und ist mit einem Gleitschutz auf einer Konsole oder Gleitplatte so zu lagern, dass keine Gewichtslast auf die Gelenkkompensatoren einwirkt und jede Bewegung in  $y$ -Richtung möglich ist.

Sowohl beim Einbringen der Vorspannung als auch bei der Aufnahme der Dehnung verschiebt sich das obere Rohrverbindungsstück um eine Strecke  $h$ , wie in Abb. 2.62 gezeigt (Abb. 2.63). Die Strecke kann in Abhängigkeit von der Dehnungsaufnahme  $\Delta L$  bzw.  $\Delta Z$  aus dem Diagramm Abb. 2.64 entnommen werden.

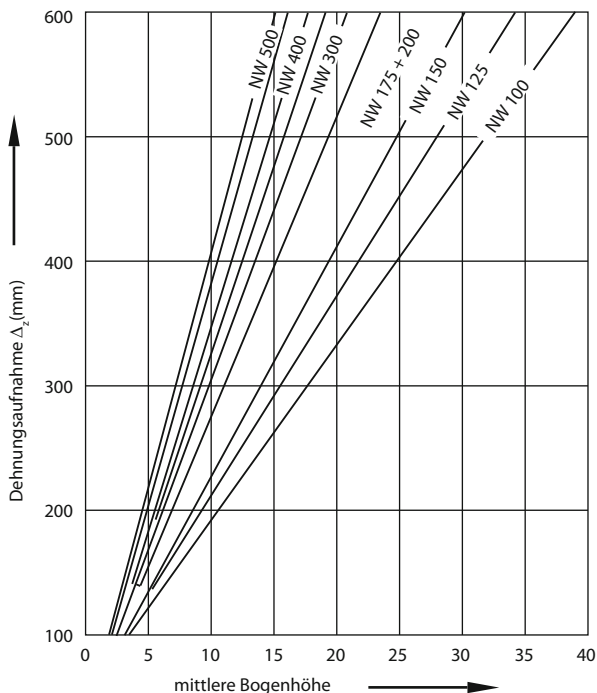
### 2.3.2.2 Berechnung

Das Reibungsmoment  $M_r$  nimmt linear mit dem Betriebsdruck zu, weil der Betriebsdruck die Kraft und damit die Reibung in den Gelenken erhöht. Das Stellmoment im Balg für eine Wellenzahl und die Nenndeformationsaufnahme werden vom Hersteller bekannt gegeben und muss mit dem Verhältnis der tatsächlichen Dehnungsaufnahme zur Nenndeformationsaufnahme multipliziert werden.

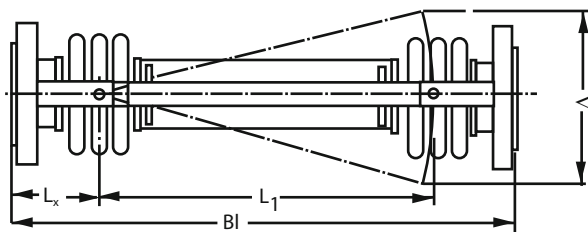
Das Gesamtstellmoment ergibt sich damit zu:

$$M_w = p \cdot M_r + M_\alpha \cdot \frac{\Delta L}{\Delta L_N} \text{ [Nm]}. \quad (2.49)$$

**Abb. 2.64** Diagramm zur Ermittlung der Bogenhöhe  $h$



**Abb. 2.65** Einbauskizze zu Beispiel 2.14



Die Angaben der Hersteller für Gelenkkompensatoren beziehen sich immer auf die übliche Vorspannung von 50 %. Wenn eine andere Vorspannung vorgesehen wird, dann muss für das Verstellmoment noch ein zusätzlicher Faktor, z.B. bei 100 % =  $100/50 = 2$  oder bei einer Vorspannung von 75 % =  $75/50 = 1,5$ , eingesetzt werden.

In Gl. 2.49 sind

- P Betriebsdruck in bar Überdruck
- $M_r, M_\alpha$  die Verstellmomente in Nm nach Angaben des Herstellers
- $\Delta L$  die tatsächlich aufzunehmende Dehnung in mm
- $\Delta L_N$  die Nenndechnung nach Herstellerlisten

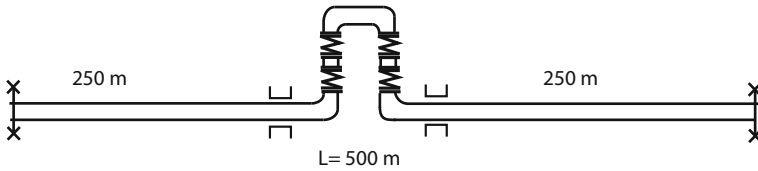


Abb. 2.66 Maßskizze zu Tab. 2.9

Die Reaktionskraft, die auf den Festpunkt wirkt, errechnet sich aus:

$$F_x = \frac{2 \cdot M_w}{L_1} \text{ [N]}, \quad (2.50)$$

darin ist  $L_1$  der Mittelabstand zwischen beiden Wellenbalgen nach Herstellerangaben in m.

#### Beispiel 2.14: Auswahl von Gelenkkompensatoren und Berechnung der Festpunktkräfte

**Aufgabenstellung** Für eine Heißwasserfernleitung DN 300 ( $309,7 \times 7,1$ ) sind die geeigneten Gelenkkompensatoren für einen damit zu erstellenden U-Bogen-Dehnungsausgleicher auszuwählen.

Die Festpunktkräfte sind zu berechnen und die U-Bogen-Dehnungsausgleicher in einer Skizze darzustellen. Die Leitungslänge zwischen den Festpunkten beträgt 500 m.

Betriebsdaten:

Werkstoff	St35
Betriebstemperatur	$t_v = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ , $t_R = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
Montageendtemperatur	$20 \text{ }^\circ\text{C}$
Wärmedämmung	160 mm aus Steinwolle
Betriebsdruck	20 bar Überdruck

#### Lösung

- a) Berechnung der erforderlichen Dehnungsaufnahme für Vor- und Rücklauf getrennt

$$\Delta l_v = 12,0 \cdot 10^{-6} \cdot 180 \cdot 500 = 1,0 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$$

$$\Delta l_R = 12,0 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot 500 = 0,48 \text{ m} = 480 \text{ mm}$$

- b) Auswahl des Gelenkkompensators aus der Herstellerliste für den Vorlauf

Die Kompensatoren im Vorlauf müssen je 250 mm bei 50 % Vorspannung aufnehmen.

Gewählt wird ein Gelenkkompensator DN 300, PN 25 mit 9 Wellen je Balg, Baulänge  $BL = 1850 \text{ mm}$ ,  $L_1 = 1195 \text{ mm}$ , Gewicht 304 kg, Nenndehnungsaufnahme 300 mm, Werkstoff CrMo,  $M_\alpha = 2700 \text{ Nm}$  und  $M_v = 16,7 \text{ Nm}$ .

c) *Berechnung der von den Festpunkten aufzunehmenden Kraft für den Vorlauf*

Das Verstellmoment  $M_w$  an einem Gelenk errechnet sich nach Gl. 2.49 zu:

$$M_w = 20 \cdot 16,7 \text{ Nm} + 2700 \text{ Nm} \cdot 250/300 = 2583 \text{ Nm}.$$

Die Reaktionskraft, die auf den Festpunkt wirkt, errechnet sich nach Gl. 2.50 zu:

$$F_x = \frac{2 \cdot 2.583 \text{ Nm}}{1,195 \text{ m}} = 4.323 \text{ N}.$$

Das Gewicht der Rohrleitung, des Wasserinhalts und der Wärmedämmung ergibt sich nach Tab. 2.4 und Abb. 2.11 zu:

$$55,6 + 75,33 + 47 = 178 \text{ kg/m}$$

$$F_R = 0,15 \cdot 10 \cdot 178 \cdot 250 = 66.750 \text{ N}$$

$$F_F = F_x + F_R = 71.073 \text{ N}$$

d) *Auswahl des Gelenkkompensators aus der Herstellerliste für den Rücklauf*

Die Kompensatoren für den Rücklauf müssen je 120 mm bei 50 % Vorspannung aufnehmen. Gewählt wird ein Gelenkkompensator DN 300, PN 25 mit 9 Wellen je Balg, Baulänge  $BL = 1450 \text{ mm}$ ,  $L_1 = 795 \text{ mm}$ , Gewicht 273 kg, Nenndehnungsaufnahme 200 mm, Werkstoff  $C_x M_o$ ,  $M_\alpha = 2700 \text{ Nm}$ ,  $M_v = 16,7 \text{ Nm}$ .

e) *Berechnung der von den Festpunkten aufzunehmenden Kraft für den Rücklauf*

Das Verstellmoment  $M_w$  berechnet sich wie vorher nach Gl. 2.49 zu:

$$M_w = 20 \cdot 16,7 \text{ Nm} + 2.700 \text{ Nm} \cdot 120/200 = 1.954 \text{ Nm}.$$

Die Reaktionskraft ergibt sich mit Gl. 2.50 zu:

$$F_x = \frac{2 \cdot 1.954 \text{ Nm}}{0,795 \text{ m}} = 4.916 \text{ N}.$$

Mit  $F_R$  wie vor wird

$$F_F = F_x + F_R = 71.666 \text{ N}.$$

f) *Berechnung der Momente und Spannungen in den Rohrbögen*

Die Momente in den Anschlussbögen berechnen sich nach Herstellerangaben aus folgenden Gleichungen und mit den Baumaßen aus Abb. 2.67:

$$M_{y1} = -M_w - P_X \cdot L_a \text{ [Nm]} \quad (2.51)$$

und aus

$$M_{y2} = M_w + P_X \cdot L_b \text{ [Nm]}. \quad (2.52)$$

Zur Kontrolle kann die Gleichgewichtsbedingung angewandt werden:

$$M_{y1} - M_{y2} + P_X(L_b + L_1 + L_a) = 0. \quad (2.53)$$

Die Anschluss- oder Bogenmomente und die Biegespannungen in den Bogen werden umso kleiner, je kürzer die Abstände  $L_a$  und  $L_b$  ausgeführt werden.

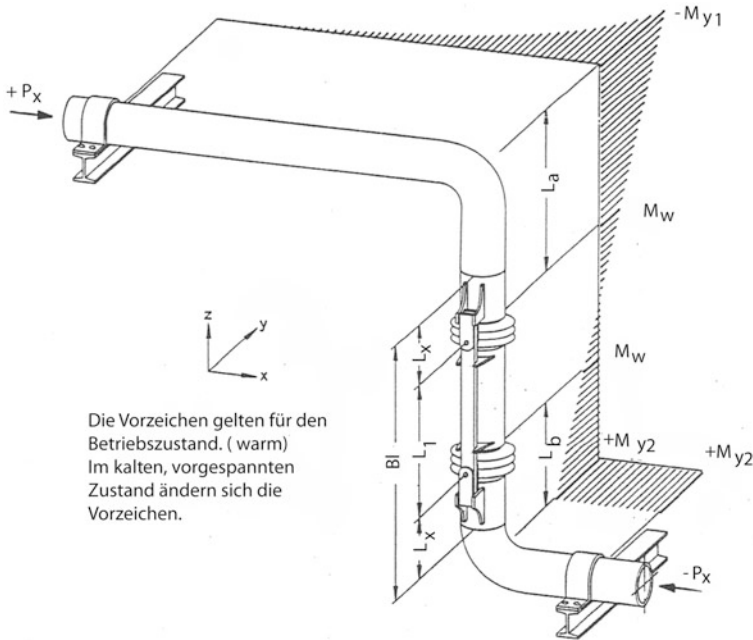


Abb. 2.67 Momentenverlauf und Bauteilbezeichnungen am Gelenkkompensator

In den Gl. 2.51 bis 2.53 sind:

BL Baulänge des Gelenkkompensators nach Herstellerlisten in m

$L_a, L_b$  Schenkellänge von Gelenk bis Mitte Bogen in m

$L_x = 0,5 (BL - L_1)$  Abstand von Gelenkmitte bis Ende des Kompensators in m

Es genügt, wenn die Biegespannung und die Spannung, die der Betriebsdruck erzeugt, in einem Bogen, z. B. in der höher beanspruchten Vorlaufleitung, überprüft werden.

Für einen Rohrbogen 4D mit  $R = 2 \cdot d_i$  wird  $R = 620$  mm und  $L_x = 0,5 (1850 - 1195) = 328$  mm.

Wenn zwischen dem Rohrbogen und dem Kompensator noch ein Passstück von 305 mm für das Anbringen einer doppelten Rohrschelle mit Gleitschuh eingeschweißt wird, dann wird

$$L_a = L_b = 1,3 \text{ m} \quad \text{und} \quad M_{y2} = 2.583 \text{ Nm} + 4.323 \text{ N} \cdot 1,3 \text{ m} = 8.203 \text{ Nm}$$

$$\sigma_b = \frac{M_{y2}}{W} = \frac{8.203 \text{ Nm} \cdot 100 \frac{\text{cm}}{\text{m}}}{547,7 \text{ cm}^3} = 1.498 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} = 14,98 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}.$$

Die durch den Betriebsdruck erzeugte Spannung beträgt nach Gleichung

$$\sigma_{tp} = \frac{p \cdot d_i}{20 \cdot s} = \frac{20 \cdot 309,7}{20 \cdot 7,1} = 43,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_b + \sigma_{tp} = 14,98 + 43,6 = 58,58 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < 185 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

bzw.  $S = 185/58,58 \approx 3$ .

Es ist eine 3-fache Sicherheit für die zulässige Spannung gegeben.

g) *Berechnen der kritischen Knickkraft*

$$F_k = \frac{4 \cdot 9,9 \cdot 19,1 \cdot 10^{10} \cdot 885,9 \cdot 10^{-7}}{62.500} = 10.720 \text{ N}$$

$F_x < F_k$  für kritische Knickkraft wird nicht überschritten.

Das Beispiel zeigt, dass beim Einbau von Gelenkkompensatoren mit Dehnungsbegrenzung keine hohen Festpunktkräfte zu erwarten sind. Bei der Verlegung von Rohrleitungen in Fernheizkanälen können die Bauwerke für die Unterbringung der Kompensatoren erheblich kleiner bemessen und dadurch Kosten gespart werden. Dies gilt auch für Verlegung von Rohren auf Rohrbrücken. Hier können die Plattformen für zu installierende Kompensatoren kleiner bemessen und auch zusätzliche Stützen eingespart werden. Die um ein Vielfaches kleiner ausfallenden Festpunktkräfte erfordern ebenfalls einen geringeren Kostenaufwand bei der Erstellung der Festpunkt konstruktion und bei den Kanalbauwerken oder Rohrbrückenkonstruktionen zur Aufnahme der Festpunktkräfte. Gelenkkompensatoren werden bis PN64 serienmäßig gefertigt.

### 2.3.3 Rohrgelenkstücke

#### 2.3.3.1 Bauart und Funktion

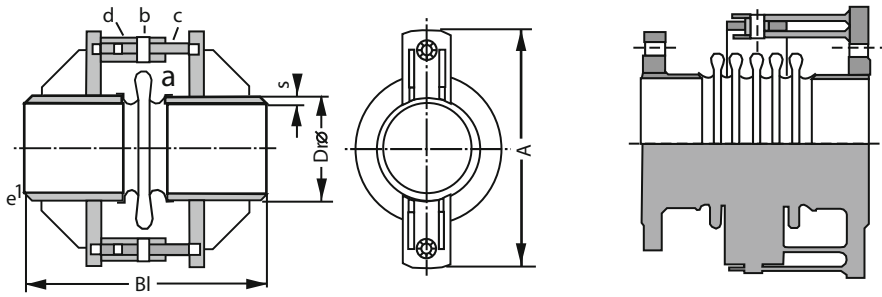
Für Fernheizleitungen sind nur die außen verspannten Rohrgelenke zu empfehlen. Rohrgelenkstücke bestehen aus einem Balg mit einer oder mehreren Wellen und einem außen verspannten Gelenk, das auch als Längenbegrenzer dient, und aus den Anschweißenden oder Flanschen, wie in Abb. 2.68 dargestellt.

Drei Rohrgelenkstücke beim Z-Bogensystem und mindestens drei Rohrgelenkstücke beim Winkelbogen- oder U-Bogen-Dehnungsausgleicher bilden ein Gelenksystem zur Dehnungsaufnahme, wie in Abb. 2.69 dargestellt.

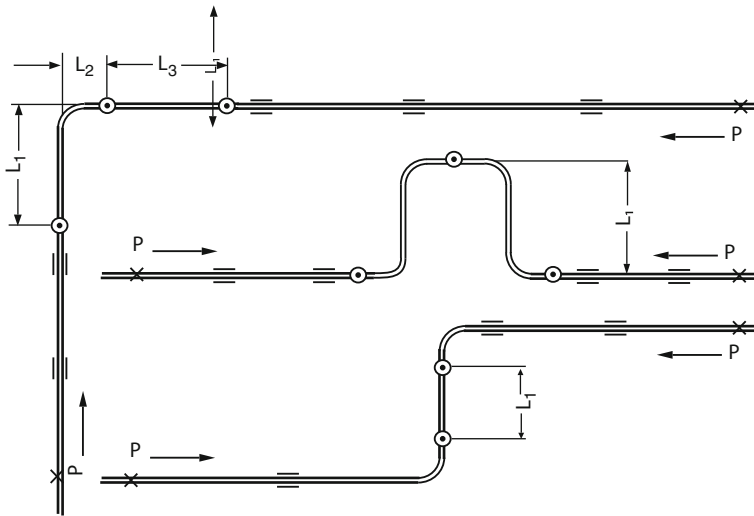
Abbildung 2.70 zeigt ein U-Bogen-Dehnungsausgleicher aus drei Rohrgelenkstücken in den verschiedenen Montage- und Betriebsstellungen.

Bei liegenden Rohrgelenksystemen ist das Gewicht der Rohrschenkel zwischen den Rohrgelenkstücken durch einfache Rohrauflagerungen abzufangen. Bei stehend ausgeführten Gelenksystemen ist das Gewicht der Rohrschenkel durch Gewichts- oder Federaufhängung auszugleichen.





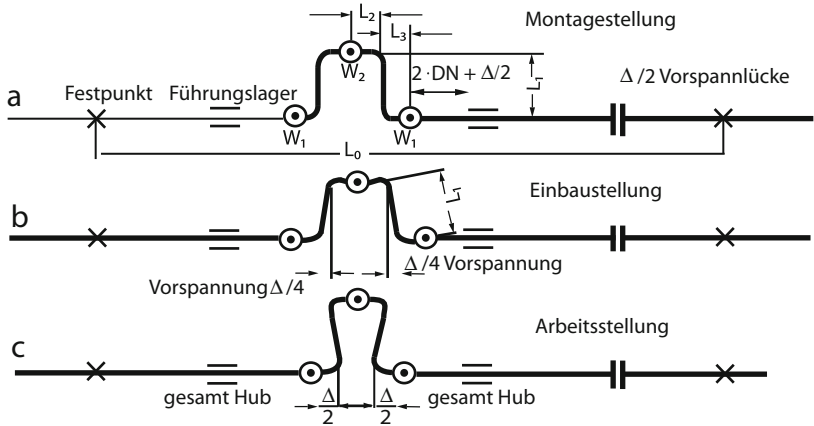
**Abb. 2.68** Rohrgelenkstück mit außen verspannter Dehnungsbegrenzung



**Abb. 2.69** Verschiedene Rohrgelenksysteme mit Rohrgelenkstücken

Die Funktion der Rohrgelenkstücke ist die gleiche wie bei den zuvor beschriebenen Gelenkkompensatoren. Die Zwischenstücke gehören aber nicht mehr zum Lieferprogramm des Herstellers, sondern werden vom Anlagenplaner oder der ausführenden Firma, nach vorheriger Berechnung des gesamten Gelenksystems, aus Rohr gefertigt und zwischen- oder angeschweißt oder angeflanscht.

Der Anlagenplaner oder -hersteller muss also die Geometrie und die beabsichtigte Dehnung bzw. Verschiebung und Dehnungsaufnahme des Gelenksystems genau planen und berechnen. Auch die Anordnung von einfachen Gleitlagern und von Zwangsführungen ist bei der Festlegung des kompletten Gelenksystems zu berücksichtigen. Alle Bedingungen sind in die Montagepläne einzutragen und bei der Montage vollständig einzuhalten.



**Abb. 2.70** U-Bogen-Dehnungsausgleicher in verschiedenen Montagestellungen und in der Betriebsstellung

**Tab. 2.10** Temperaturfaktor T

Werkstoff	Betriebstemperatur						
(Werkstoff-Nr.)	Bis 300 °C	400 °C	425 °C	450 °C	475 °C	500 °C	525 °C
16CrMo4 (7242)	1	0,9	0,85	0,64	–	–	–
Cr-Mo-V-Stahl	–	–	–	0,64	0,5	0,36	–
Austenit (4541)/(4571)	0,83	0,7	0,69	0,66	0,63	0,6	0,56
(4306)	0,55	0,5	–	–	–	–	–

**2.3.3.2 Berechnung**

*Berechnung der Festpunktbelastung* Bei Verwendung von Rohrgelenkstücken werden die Festpunkte nur durch die Verstellkraft des Gelenksystems und durch die Summe der Reibungswiderstände der Führungslager beansprucht. Die Reaktionskräfte, die aus der wirksamen Balgquerschnittfläche und dem maximalen Betriebsdruck resultieren, werden durch die Gelenkankerkonstruktion aufgenommen.

Die Berechnungsgleichungen entsprechen in etwa den Gleichungen für Gelenkkompensatoren, weil auch die gleiche Funktion vorliegt:

$$F_x = \frac{2 \cdot \left( p \cdot M_r + T \cdot M_\alpha \cdot \frac{W_e}{W_g} \right)}{L_1} \text{ [N]}, \tag{2.54}$$

darin ist:

- $M_v$  = Verstellmoment eines Rohrgelenkstücks aus der Bolzenreibung im Gelenk bei 1 bar Betriebsdruck in Nm und aus der Herstellerliste zu entnehmen
- $M_\alpha$  = Verstellmoment eines Rohrgelenkstücks resultierend aus der Federkonstante des Balges in Nm und aus den Listen der Hersteller zu entnehmen
- T = Temperaturfaktor, werkstoffabhängig nach Tab. 2.10

$W_e$  = errechnete Wellenzahl

$W_g$  = gewählte Wellenzahl entsprechend der Herstellerliste

$L_1$  = Mittenabstand der Rohrgelenkstücke in m

$p$  = Betriebsdruck in bar Überdruck

Die Gl. 2.54 gilt für eine Vorspannung von 50 %.

*Berechnung der Wellenzahl* Bekannt sei die Rohrleitungslänge und die Temperatur, aus der die Dehnung resultiert. Gesucht wird bei einem Rohrgelenkssystem die Länge der Rohrschenkel zwischen den Rohrgelenkstücken oder, wenn die Schenkellänge durch die Trassenführung gegeben ist, die erforderliche Wellenzahl der Bälge.

Bei Zwei-Gelenkssystemen ergeben sich für jedes Rohrgelenkstück gleiche, bei Drei-Gelenkssystemen verschiedene Wellenzahlen.

Die Rohrgelenkstücke werden mit 3, 5 und 9 genormten Wellen geliefert.

Werden beispielsweise bei einem Drei-Gelenk-W-Bogensystem NW 350 für das Rohrgelenkstück

$$W_1 = 2,9 \text{ Wellen} \quad W_3 = 3,2 \text{ Wellen} \quad W_2 = 6,1 \text{ Wellen}$$

errechnet, so wird die Wellenzahl für das Rohrgelenkstück entsprechend der obigen Fabrikationswellenzahl aufgerundet, so dass sich für

$$W_1 = 3 \text{ Wellen} \quad W_3 = 5 \text{ Wellen} \quad W_2 = 9 \text{ Wellen}$$

ergeben. Die Aufrundung erbringt weitere Sicherheit in Bezug auf die Lebensdauer und eine Verminderung der Verstellmomente. Bei gewählter Wellenzahl lassen sich die erforderlichen Rohrschenkel Längen  $L_1$  und  $L_3$  ermitteln, wobei  $L_2$  so klein wie möglich zu wählen ist. Wenn genügend Platz vorhanden ist, können die errechneten Rohrschenkel  $L_1$  und  $L_3$  größer gewählt werden, wodurch sich noch größere Sicherheiten und kleinere Verstellmomente erreichen lassen.

Für die folgenden Berechnungen der einzelnen Gelenkssysteme wird die jeweils in der Rohrleitung herrschende Temperatur durch den Temperaturfaktor  $T$  berücksichtigt, der aus Tab. 2.11 zu entnehmen ist.

Die Berechnung und Bemessung bzw. Auswahl der einzelnen Bauteile wird am zweckmäßigsten an Hand von Beispielen gezeigt:

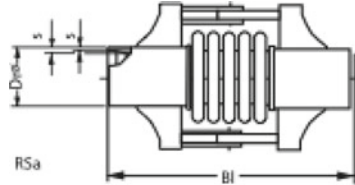
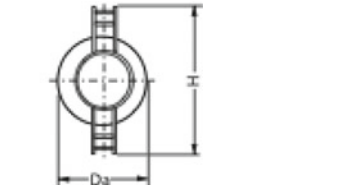
### **Beispiel 2.15: Berechnung eines Umlenkbogens mit Rohrgelenkstücken**

*Aufgabenstellung* Für eine HD-Dampfleitung ist ein Winkelbogen mit 3 Rohrgelenkstücken nach Abb. 2.71 zu konstruieren und nachzurechnen.

Gegeben:

Die Rohrleitung hat einen Rohrdurchmesser DN 200 ( $207,3 \times 5,9$ ) und dient zur Förderung von Dampf mit 20 bar Überdruck und 250 °C Überhitzungstemperatur; Rohrwerkstoff St35, Montagetemperatur 20 °C.

**Tab. 2.11** Maße und technische Daten von Rohrgelenkstücken, Hersteller IWK, DN 200 mit Anschweißenden oder Flanschverbindung

																			
Rohrgelenkstück mit Abmessung entspr. ND (Spalte 2) aus PN Werkstoff										RSa	RFa	Verstellmoment eines Rohrgelenkstücks							
St 35.8/HH/19 Mn 5 13 Cr Mo 44 Rohr										Balg-Flansch außen				aus Eigenwid erstand des Balges bei 50 % Vorsp.				aus Bolzenreibung bei 1 atü In-nendruck	
ist bei °C										Höhe		Ø	Höhe		Brei-te				
120	200	300	400	425	450	475	500	D <sub>r</sub>	S	H	D <sub>a</sub>	A	B	M	M <sub>r</sub>				
geeignet für bar Überdruck								mm	Mm	mm	mm	mm	mm	kpm	±15 %				
10	8	6	-	-	-	-	-	219,1	5,9	425	314	460	340	190	0,55				
16	14	11	8	-	-	-	-	219,1	5,9	425	314	470	340	170	0,55				
25	22	17	13	22	21	20	18	219,1	5,9	425	314	510	360	160	0,77				
40	35	28	21	35	34	33	-	219,1	5,9	440	314	570	375	130	0,88				
64	50	40	32	57	56	-	-	219,1	7,1	475	314	610	415	120	1,22				
tg/Welle3 Wellen				5 Wellen				9 Wellen											
tg w	RSa	Ges. Winkel-aus-schlag		RFa	RSa	Ges. Winkel-aus-schlag		RFa	RSa	Ges. Winkel-aus-schlag		RFa	Ges. Winkel-aus-schlag		RFa				
BLGew.				BLGew.		BLGew.		BLGew.		BLGew.		BLGew.		BLGew.					
±	mm	kg		mm	kg	mm	kg	mm	kg	mm	kg	mm	kg	mm	kg				
18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33				
0,02229	575	32	7,5°	305	49	655	38	13,0°	385	55	815	49	23,0°	545	67				
0,0207	575	32	7,0°	325	62	655	38	12,0°	405	68	815	49	21,5°	565	80				
0,01911	1615	41	6,5°	345	86	695	47	11,0°	425	93	855	59	20,0°	585	105				
0,01592	715	61	5,5°	365	129	795	68	9,0°	445	137	955	81	16,5	605	152				
0,01433	715	73	5,0°	365	160	795	81	8,0°	445	169	955	96	15	605	186				

Rohrleitungs- und Apparatebau  
Planungshandbuch für Industrie- und  
Fernwärmeversorgung

Scholz, G.

2012, X, 411 S. 293 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-642-25424-6