

Nachgiebige Mechanismen

Lena Zentner

ISBN: 978-3-486-76881-7

© 2014 Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH

Abbildungsübersicht / List of Figures

Tabellenübersicht / List of Tables

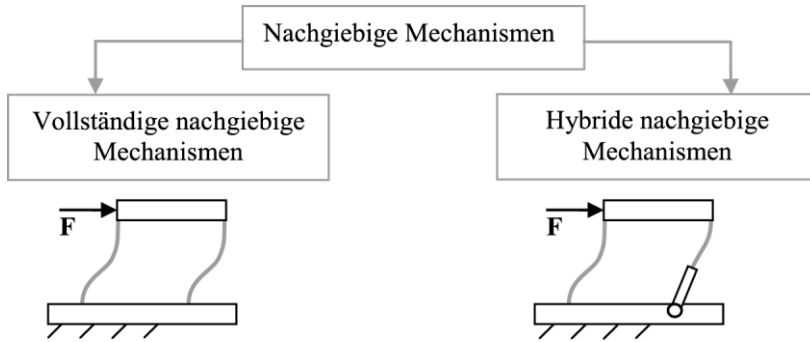


Abb. 2.1: Aufteilung nachgiebiger Mechanismen

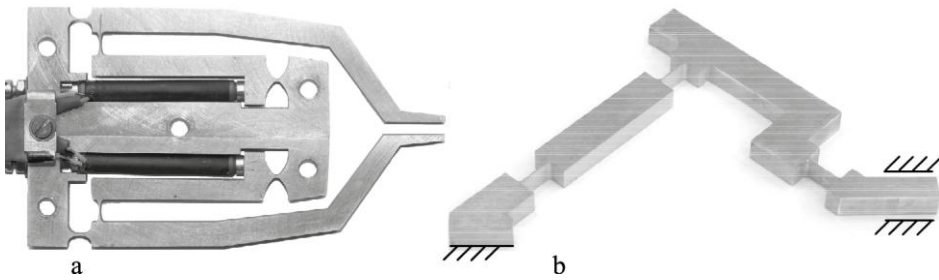


Abb. 2.2: Beispiele nachgiebiger Mechanismen; a – ein Greifer als ein vollständiger nachgiebiger Mechanismus, b – ein hybrider nachgiebiger Mechanismus mit einem Schubgelenk

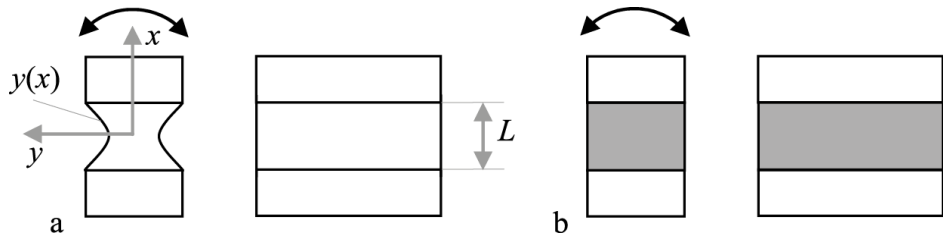


Abb. 2.3: Stoffschlüssige Gelenke eines nachgiebigen Mechanismus in zwei Ansichten, realisiert durch:
 a – geometrische Gestaltung, b – Materialien mit höherer Nachgiebigkeit

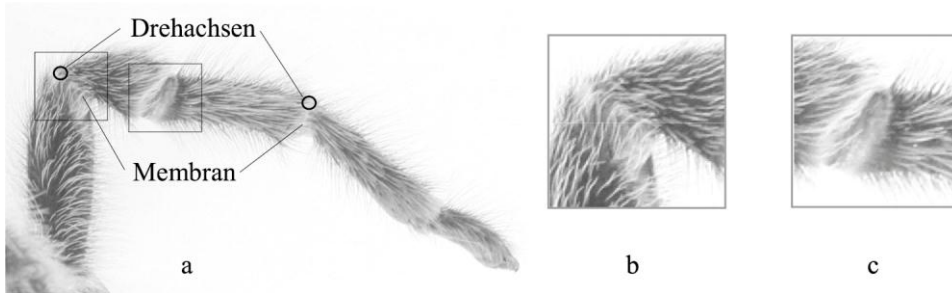


Abb. 2.4: Ein Beispiel eines nachgiebigen Systems in der Natur; a – Streckung eines Spinnenbeines wird unter Erhöhung des hydraulischen Druckes in Gelenkbereichen erreicht, b – ein rein hydraulisches Gelenk, die Drehachse verläuft durch einen Peripheriepunkt des Beines, c – Bewegung erfolgt hauptsächlich durch den Einsatz der Muskeln, die Drehachse schneidet die Querschnittsfläche des Beines

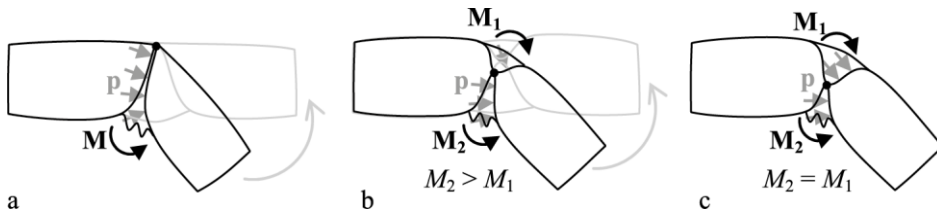


Abb. 2.5 Schematische Darstellung von Spinnengelenken; a – ein rein hydraulisches Gelenk; b – ein kombiniertes Gelenk, eine Streckung wird hydraulisch und durch Muskeln erzeugt; c – ein Gelenk, in welchem eine Streckung rein durch Muskeln erzeugt wird

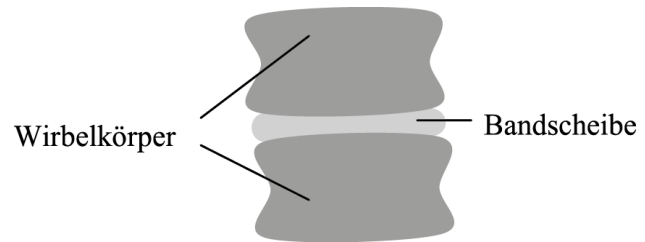


Abb. 2.6: Schematische Darstellung von zwei Wirbelkörpern der Wirbelsäule; Wirbelkörper sind untereinander durch eine Bandscheibe verbunden, die elastische Bandscheibe stellt ein Gelenk dar

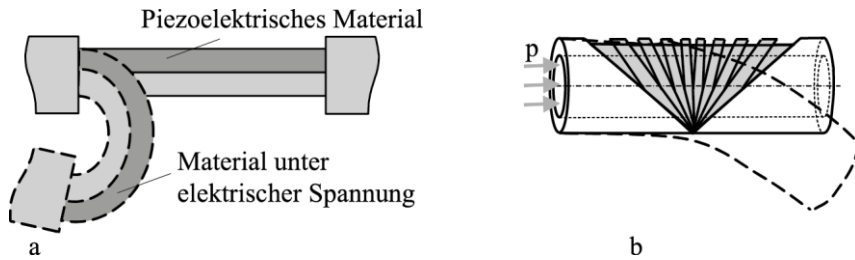


Abb. 2.7: Schematische Darstellung nachgiebiger Aktuatoren; a – unter Anwendung von funktionellen Materialien, z. B. piezoelektrische Materialien, die ihre Länge unter Wirkung von elektrischer Spannung verändern, b – ein fluidmechanischer Aktuator, welcher unter Erhöhung des Innendruckes eine Biegung erfährt

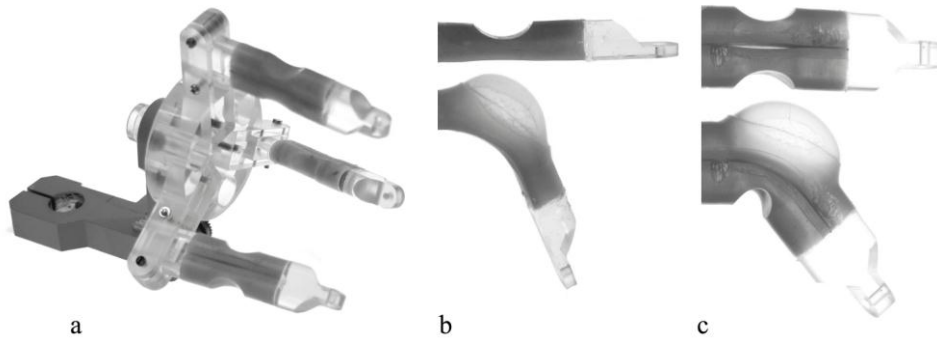


Abb. 2.8: Ein Greifersystem; a – ein Greifer als ein nachgiebiger Mechanismus mit fluidmechanischen Aktuatoren ([34]), b – ein fluidmechanischer Aktuator, c – parallel kaskadierte fluidmechanische Aktuatoren

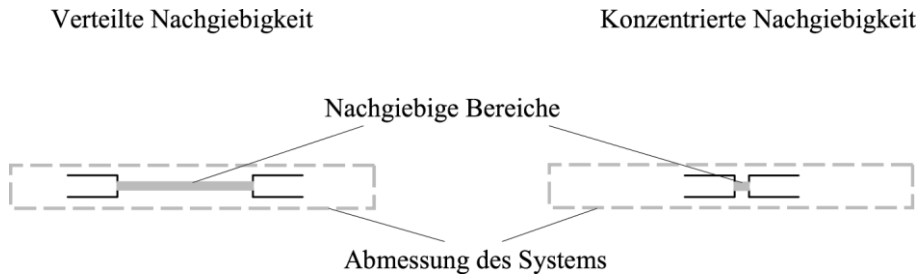


Abb. 2.9: Schematische Darstellung des Unterschiedes zwischen verteilter und konzentrierter Nachgiebigkeit

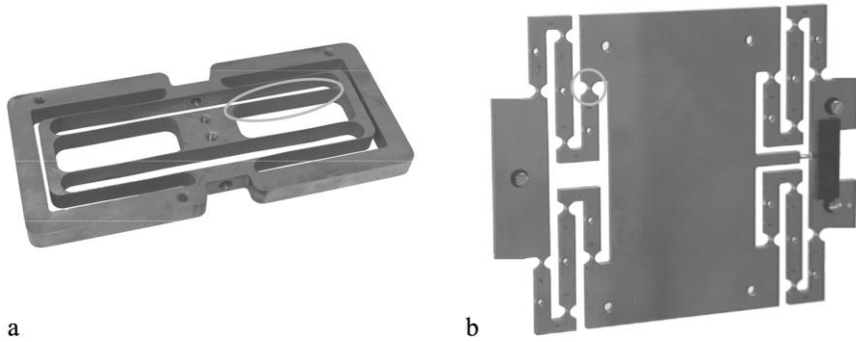


Abb. 2.10: Beispiele nachgiebiger Mechanismen mit stoffschlüssigen Gelenken; a – mit verteilter Nachgiebigkeit und b – mit konzentrierter Nachgiebigkeit

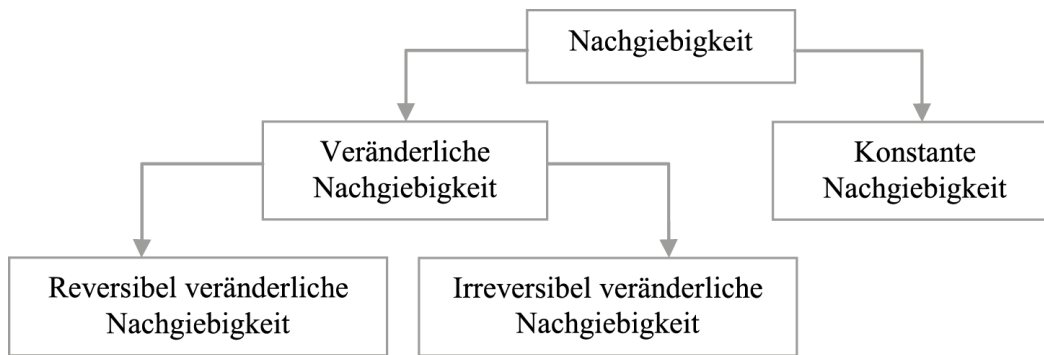


Abb. 2.11: Einteilung der Nachgiebigkeit nach der Fähigkeit sich zu verändern

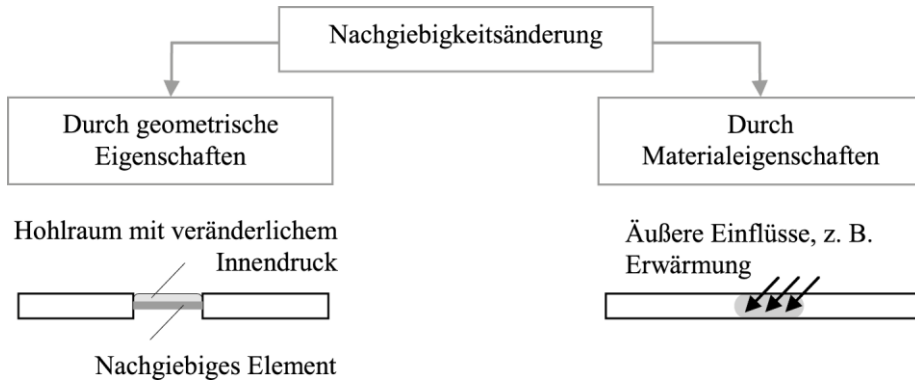


Abb. 2.12: Arten der Nachgiebigkeitsänderung mit Beispielen (unten)

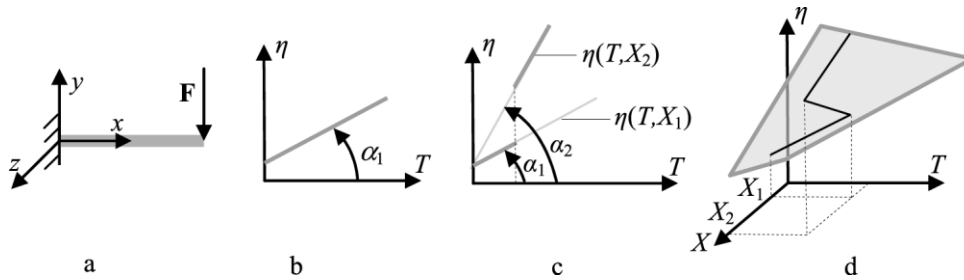


Abb. 2.13: Zur Empfindlichkeit bezogen auf die Nachgiebigkeit; a – ein Beispiel eines eingespannten durch eine Kraft belasteten Balkens, b – Nachgiebigkeit $\eta(T)$ mit unveränderlicher Empfindlichkeit, c – die Nachgiebigkeit hängt von zwei Parametern ab $\eta(T, X)$, wodurch eine Veränderung der Empfindlichkeit möglich ist, charakterisiert durch α_1 und α_2 , d – räumliche Darstellung des Weges für Änderung der Empfindlichkeit auf der Fläche $\eta(T, X)$

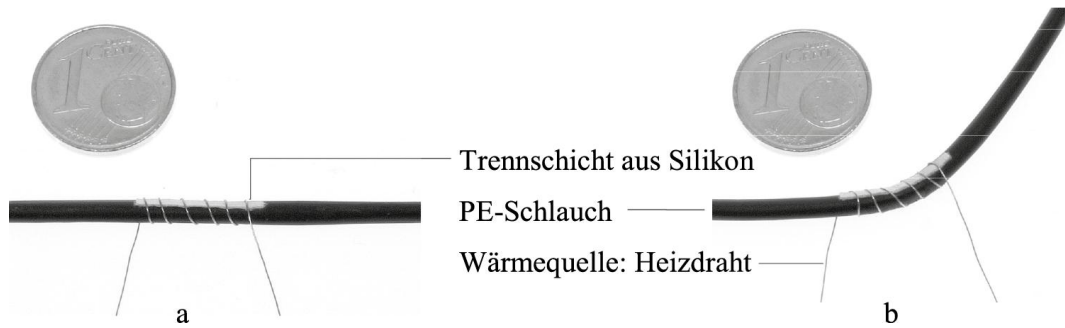


Abb. 2.14: Änderung der Nachgiebigkeit eines Systems infolge des Temperatureinflusses; a – ein Schlauch (Schrumpfschlauch) mit einem Heizdraht umwickelt und einseitig mit einer Trennschicht aus Silikon als Thermoisolierung auf einer Seite des Schlauches gestaltet, kein Druck im Innenraum; b – das System steht unter dem Einfluss der Temperaturerhöhung und des Innendruckes

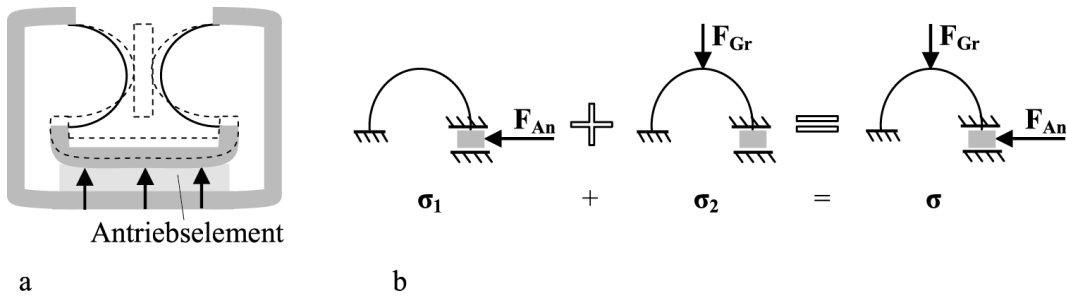


Abb. 2.15: Beispiel eines nachgiebigen Greifers; a – Greiferlagen im entspannten Zustand und unter der Wirkung der Antriebskraft mit einem gegriffenen Objekt; b – Darstellung des Superpositionsprinzips für die Spannungen im nachgiebigen Element

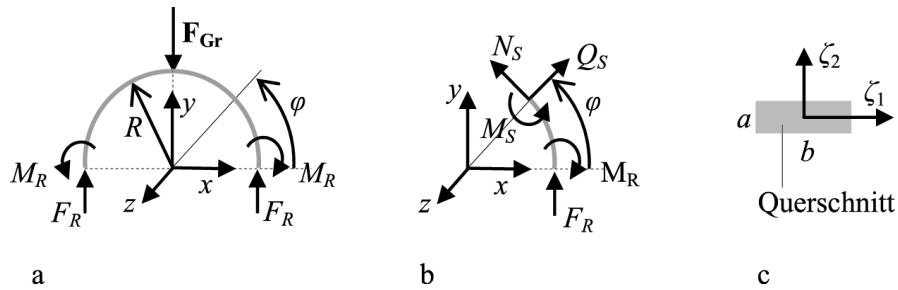


Abb. 2.16: Nachgiebiges Element; a – Lagerreaktionen am nachgiebigen Element; b – Darstellung eines Schnittteils vom nachgiebigen Element; c – Querschnitt des nachgiebigen Elementes

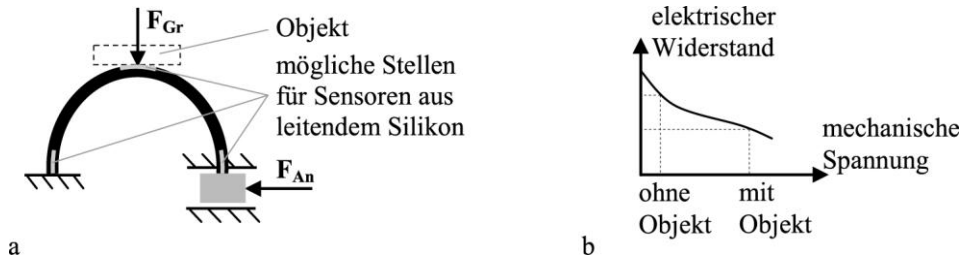


Abb. 2.17: Einsatz elektrisch leitfähiger Polymere; a – nachgiebiges Element eines Greifersystems mit möglichen Stellen für das Einbringen des inhärenten Sensorik; b – Darstellung eines qualitativen Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der mechanischen Spannung für elektrisch leitfähige Polymere, die mit Grafitpartikeln dotiert sind

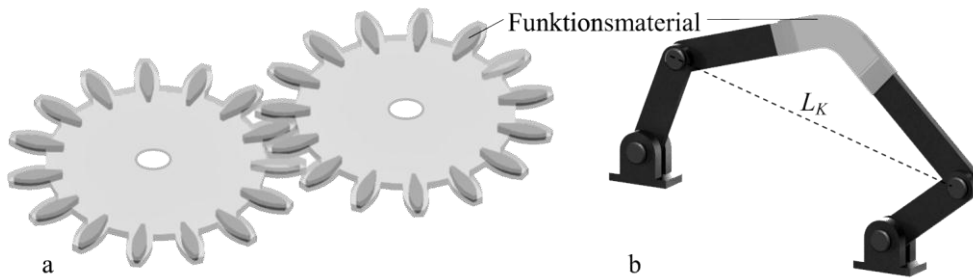


Abb. 2.18: Anwendung funktioneller Materialien in Mechanismen; a – schematische Darstellung nachgiebiger Zahnräder mit Kern, bestehend aus einem funktionellem Material, mit einer geschwindigkeitsabhängigen selbstschaltenden Kupplung; b – Darstellung eines fünfgliedrigen Koppelmechanismus; ein Gelenk ist mit einem funktionellem Material gefüllt, um eine energieeffiziente Bewegung zu erzielen (s. [41])

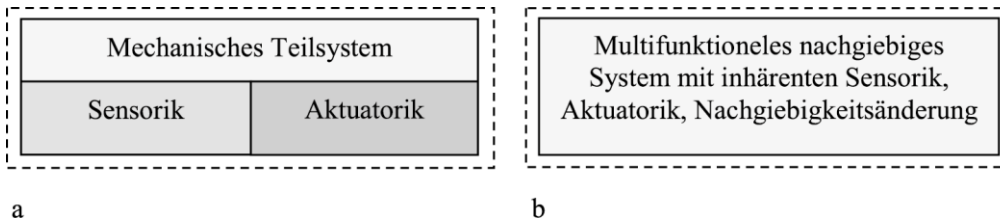


Abb. 2.19: Zwei Systeme im Vergleich; a – schematische Darstellung wesentlicher Bestandteile eines Starrkörper-Bewegungssystems; b – Darstellung eines nachgiebigen Bewegungssystems; das mechanische Teilsystem übernimmt die Funktion einzelner Bestandteile

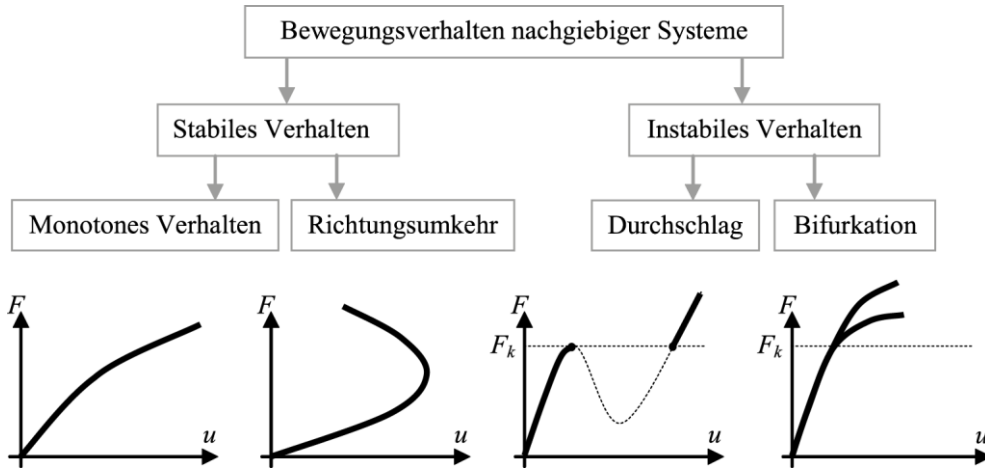


Abb. 2.20: Klassifizierung des Bewegungsverhaltens nachgiebiger Strukturen (s. auch [32])

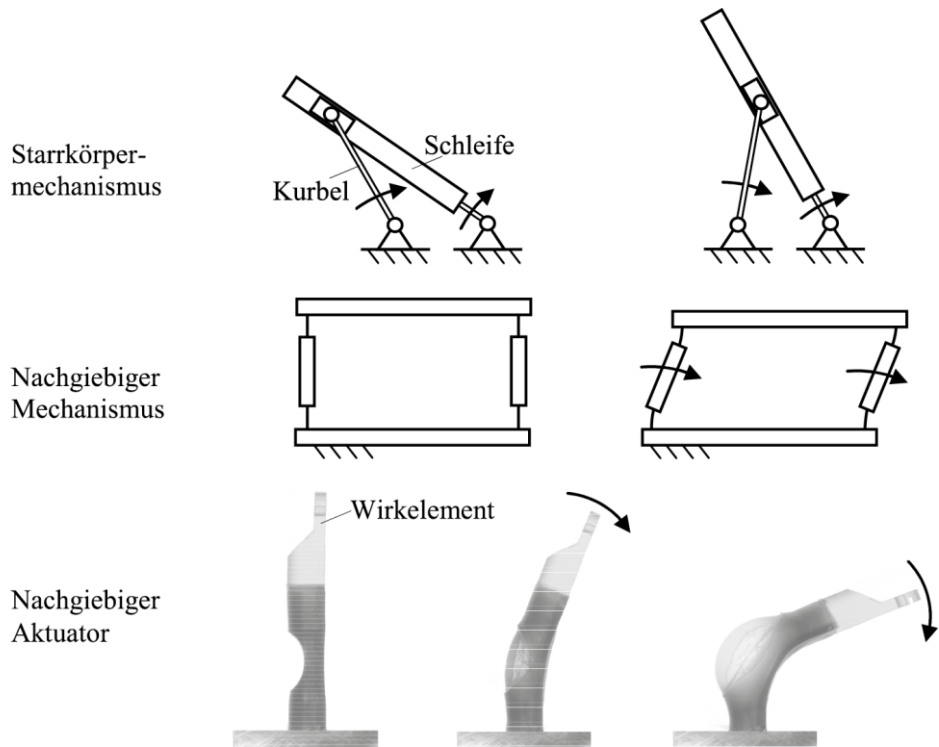


Abb. 2.21: Monotones Verhalten; Starrkörpermechanismus als eine Kurbelschleife, ein nachgiebiger Mechanismus und ein nachgiebiger Aktuator, mit dem Wachstum des Antriebswinkels vergrößert sich auch der Abtriebswinkel; nachgiebiger Aktuator mit Wirkelement bewegt sich unter der Druckerhöhung im Hohlraum des fluidmechanischen Aktuators

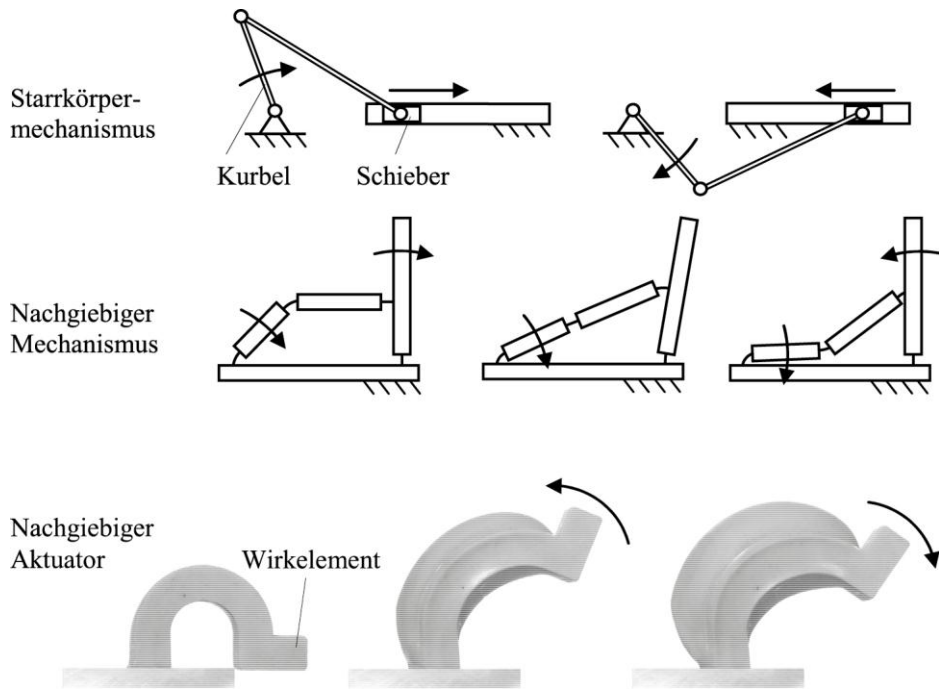


Abb. 2.22: Verhalten mit Richtungsumkehr; ein Starrkörpermechanismus, eine Schubkurbel und ein nachgiebiger Mechanismus: links wird eine Antriebsbewegung eingeleitet, rechts befindet sich das Abtriebsglied, welches seine Richtung ändert, während das Antriebsglied seine Bewegungsrichtung beibehält; nachgiebiger Aktuator mit Wirkelement ändert seine Bewegungsrichtung unter der Druckerhöhung im Hohlraum des fluidmechanischen Aktuators

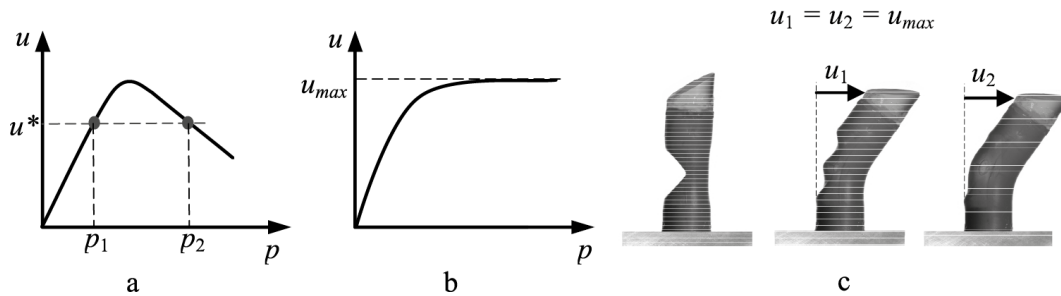


Abb. 2.23: Ein Bewegungsverhalten zwischen dem monotonen und dem mit Richtungsumkehr; a – zum Verhalten mit Richtungsumkehr: einer Lage u^* kann anhand unterschiedlicher Belastungen p_1 und p_2 erreicht werden, beide Lagen weisen unterschiedliche Nachgiebigkeiten auf, b – ein Verhalten, welches zwischen dem monotonen Verhalten und dem Verhalten mit Richtungsumkehr zu zuordnen ist, c – ein fluidmechanischer Aktuator mit einem Verhalten, wie unter b dargestellt

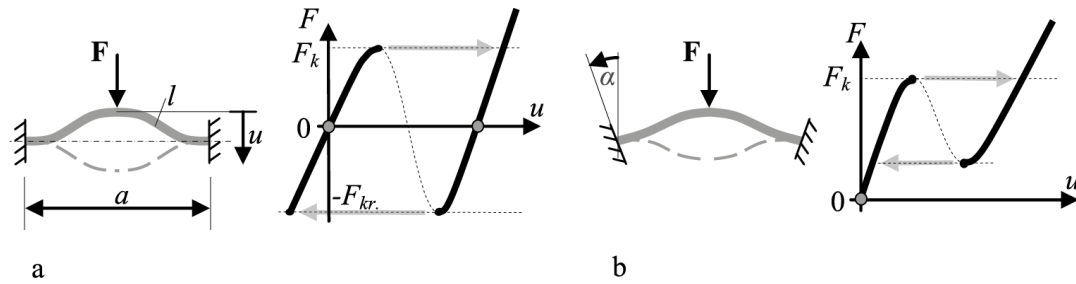


Abb. 2.24: Beidseitig eingespannter Balken als ein Beispiel für ein Verhalten mit Durchschlag eines nachgiebigen Systems; a – ein System mit zwei symmetrischen Gleichgewichtslagen für einen unbelasteten Zustand $F = 0$; b – ein System mit einer Gleichgewichtslage für einen unbelasteten Zustand bei $F = 0$

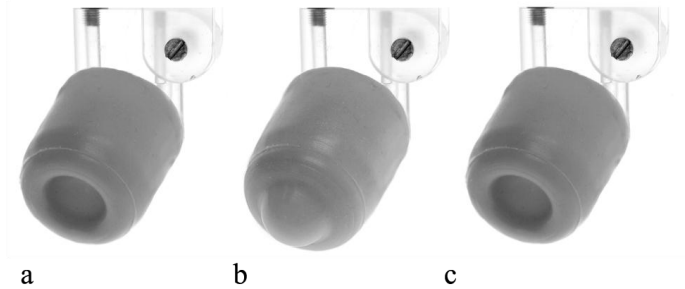


Abb. 2.25: Durchschlag einer gewölbten Struktur mit monostabilem Bewegungsverhalten; a – ursprünglicher Zustand, b – ein Zustand nach einer Belastung mit einem kritischen Druck, c – ein Zustand nach Wegnahme der Belastung, dieser entspricht dem ursprünglichen Zustand

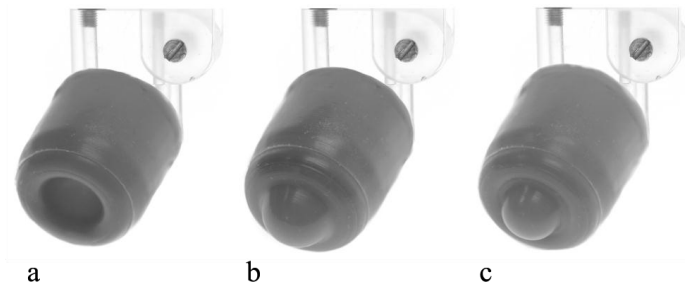


Abb. 2.26: Durchschlag einer gewölbten Struktur mit bistabilem Bewegungsverhalten; a – ursprünglicher Zustand, b – ein Zustand nach einer Belastung mit einem kritischen Druck, c – nach Wegnahme der Belastung, neben dem Zustand unter a, stellt sich eine neue Gleichgewichtslage ein, die dem unbelastetem Zustand entspricht

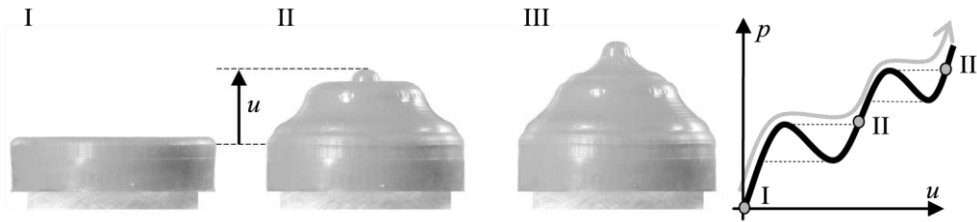


Abb. 2.27: Ein nachgiebiger fluidmechanischer Aktuator mit mehrfachem Durchschlageffekt und die entsprechende Abhängigkeit zwischen dem Innendruck und der Verschiebung u des mittleren Kuppelpunktes nach oben (s. auch [12])

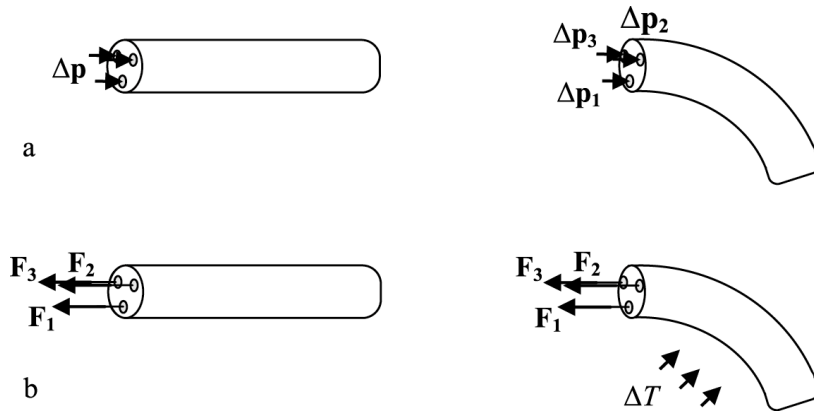


Abb. 2.28: Beispiele zur Anwendung von nachgiebigen Systemen, die zu einem Bifurkationsverhalten fähig sind; a – ein Stab mit drei Hohlräumen, in denen Unterdruck herrscht, links: in den Hohlräumen herrscht jeweils ein gleicher Unterdruck $\Delta p < 0$, rechts: der Unterdruck in einem der Hohlräume besitzt einen höheren Betrag $|\Delta p_1| > |\Delta p_2|$, $\Delta p_2 = \Delta p_3$, wodurch es zu einer Biegung des Stabes kommt; b – ein Stab mit drei Hohlräumen, in denen Fäden, wie beispielsweise SMA-Drähte (shape memory alloy) eingebracht sind, links: $F_1 = F_2 = F_3$, ein unterkritischer Zustand, rechts: eine Belastung mit $F_1 = F_2 = F_3$ und Erwärmung durch ΔT der unteren Seite des Systems, es kommt zur Biegung des Stabes

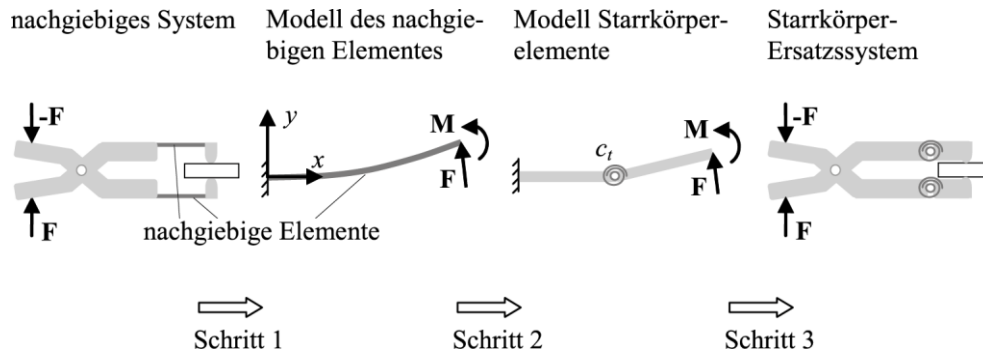


Abb. 3.1: Eine schematische Darstellung der Modellierungsschritte für einen Übergang von einem nachgiebigen System zu einem Starrkörpersystem am Beispiel einer nachgiebigen Zange

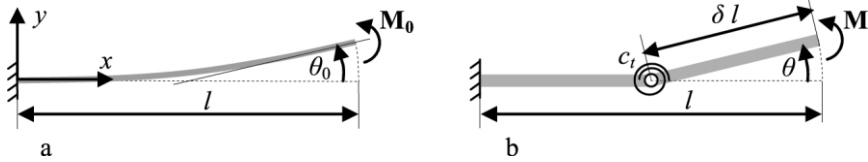


Abb. 3.2: Belastung durch ein reines Moment; a – nachgiebiger Stab, b – Starrkörper-Ersatzsystem unter Belastung durch ein Moment

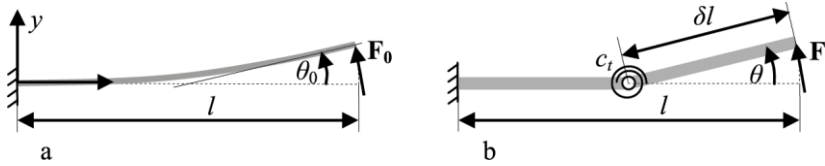


Abb. 3.3: Belastung durch eine Kraft; a – nachgiebiger Stab, b – Starrkörper-Ersatzsystem für den Fall der Belastung durch eine Kraft

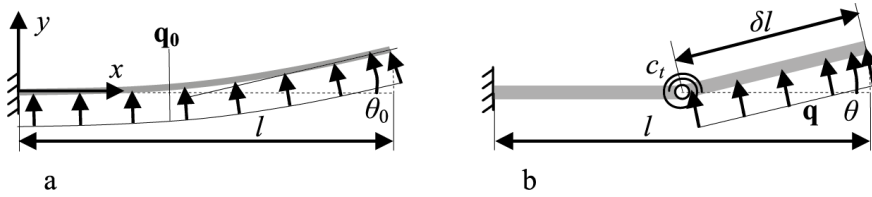





Abb. 3.4: Belastung durch eine Streckenlast; a – nachgiebiger Stab, b – Starrkörper-Ersatzsystem unter Belastung durch eine Streckenlast

n	δ	c_t	Darstellung
1	$\frac{1}{2}$	$\frac{EI_z}{l}$	
2	$\frac{2}{3}$	$\frac{4 EI_z}{3 l}$	
3	$\frac{3}{4}$	$\frac{27 EI_z}{16 l}$	

Tab. 3.1: Werte für Lagen des Gelenkes und entsprechende Federkonstanten eines Starrkörpersystems für einzelne Belastungsfälle

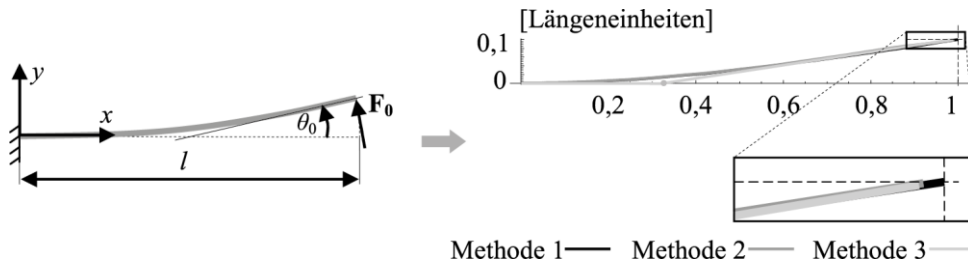


Abb. 3.5: Verschiebungen des freien Stabendes unter der Wirkung einer Kraft ($n = 2$) bei Anwendung von drei unterschiedlichen Methoden im Vergleich; 1: lineare Theorie, 2: nichtlineare Theorie, 3: Starrkörper-Ersatzsystem

Art und Größe der Belastung	Verschiebung	Methode 1: lineare Theorie		Methode 2: nichtlineare Theorie (große Verschiebungen)		Methode 3: als ein Starrkörpersystem		
		Berechnungsformeln	Ergebnis	Berechnungsformeln	Ergebnis [Längeneinheit]	Berechnungsformeln	Ergebnis [Längeneinheit]	
$n = 1$ $\frac{M_0}{EI_z} = 0.2$ [Längeneinheit]	u_x	$u_x = 0$ $u_y = \frac{l^2}{EI_z} \frac{M_n^H}{n+1}$	0	$\frac{dQ_1}{ds} - Q_2 \kappa_3 = 0$	-0.00665	$u_x = \delta l \cos \theta$ $- \delta l$ $u_y = \delta l \theta$	-0.00996	
	u_y		0.1	$\frac{dQ_2}{ds} + Q_1 + q_2 = 0$	0.09966		0.1	
$n = 2$ $\frac{F_0}{EI_z} = 0.3$ [Längeneinheit ¹]	u_x		0	$\frac{dM_3}{ds} + Q_2 = 0$	-0.00599		$u_x = \delta l \cos \theta$ $- \delta l$	-0.00748
	u_y		0.1	$M_3 = EI_z \kappa_3$	0.09974			0.1
$n = 3$ $\frac{q_0}{EI_z} = 0.8$ [Längeneinheit ²]	u_x		0	$\frac{du_x}{ds} = \cos \theta_3 - 1$	-0.00570		$u_y = \delta l \theta$	-0.00665
	u_y		0.1	$\frac{du_y}{ds} = \sin \theta_3$	0.09977			0.1

Tab. 3.2: Vergleich der Ergebnisse für die Verschiebung am Balkenende nach drei unterschiedlichen Methoden: nach der linearen Theorie, der nichtlinearen Theorie und nach der Modellbildung als ein Starrkörpersystem; die drei einzelnen Belastungen wurden so gewählt, dass die Verschiebung vom Stabende 10% der Stablänge, die mit der Länge 1 (in Längeneinheiten) versehen ist, nach der linearen Theorie annimmt.

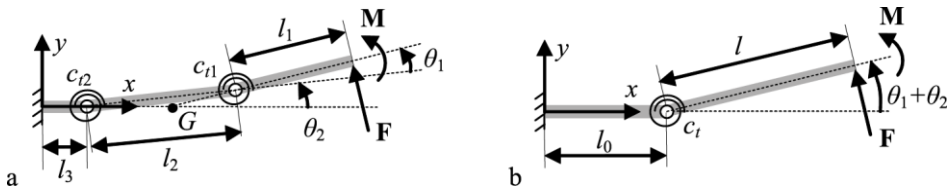


Abb. 3.6: Zwei Starrkörpersysteme; a – ein System mit zwei Gelenken; b – ein System mit einem Gelenk

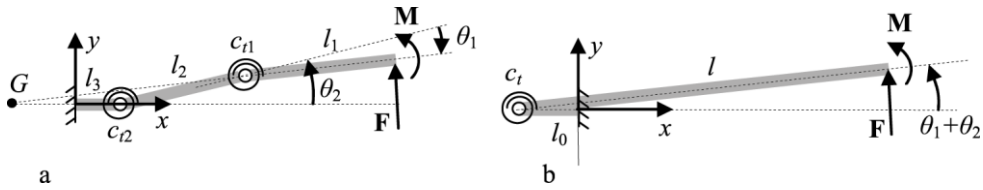


Abb. 3.7: Darstellung eines Systems mit einem negativen Winkel θ_1 ; a – ein System mit zwei Gelenken; b – Realisierung eines einzelnen Gelenkes links von der Einspannung

Fall	c_t	L
$M \neq 0, F \neq 0,$ $l_1 \neq l_2, c_{i1} \neq c_{i2}$	$\frac{1}{c_t} = \frac{1}{c_{i2}} \cdot \frac{M + F(l_1 + l_2)}{M + Fl} + \frac{1}{c_{i1}} \cdot \frac{M + Fl_1}{M + Fl}$	$l = \frac{M(c_{i1}(l_1 + l_2) + c_{i2}l_1) + F(c_{i1}(l_1 + l_2)^2 + c_{i2}l_1^2)}{M(c_{i1} + c_{i2}) + F(c_{i1}(l_1 + l_2) + c_{i2}l_1)}$
$M \neq 0, F = 0,$ $l_1 \neq l_2, c_{i1} \neq c_{i2}$	$\frac{1}{c_t} = \frac{1}{c_{i2}} + \frac{1}{c_{i1}}$	$l = \frac{c_{i1}(l_1 + l_2) + c_{i2}l_1}{c_{i1} + c_{i2}}$
$M = 0, F \neq 0,$ $l_1 \neq l_2, c_{i1} \neq c_{i2}$	$\frac{1}{c_t} = \frac{1}{c_{i2}} \cdot \frac{l_1 + l_2}{l} + \frac{1}{c_{i1}} \cdot \frac{l_1}{l}$	$l = \frac{c_{i1}(l_1 + l_2)^2 + c_{i2}l_1^2}{c_{i1}(l_1 + l_2) + c_{i2}l_1}$
$M = hF, F \neq 0,$ $l_1 \neq l_2, c_{i1} \neq c_{i2}$	$\frac{1}{c_t} = \frac{1}{c_{i2}} \cdot \frac{h + l_1 + l_2}{h + l} + \frac{1}{c_{i1}} \cdot \frac{h + l_1}{h + l}$	$l = \frac{c_{i1}(l_1 + l_2)(h + l_1 + l_2) + c_{i2}l_1(h + l_1)}{c_{i1}(h + l_1 + l_2) + c_{i2}l_1}$

Tab. 3.3: Zusammenhang zwischen Parametern eines Starrkörpersystems mit einem Gelenk aus Abb. 3.6b und eines Starrkörpersystems mit zwei Gelenken aus Abb. 3.6a; die Systeme sind äquivalent

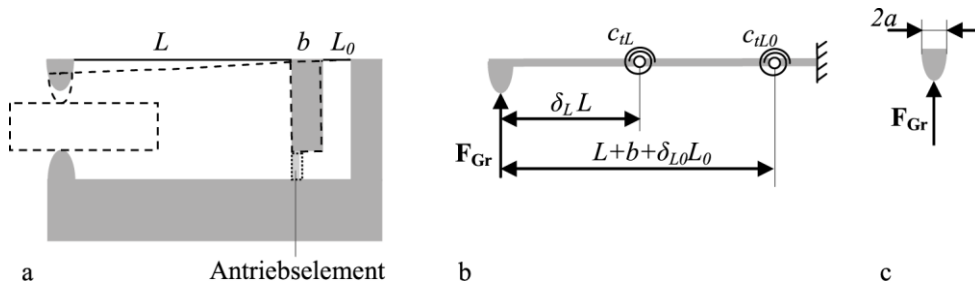


Abb. 3.8: Beispiel eines nachgiebigen Greifers; a – ein Greifersystem mit einem Gelenk mit verteilter und einem mit konzentrierter Nachgiebigkeit; b – ein entsprechendes Starrkörper-Ersatzsystem; c – Halteelement

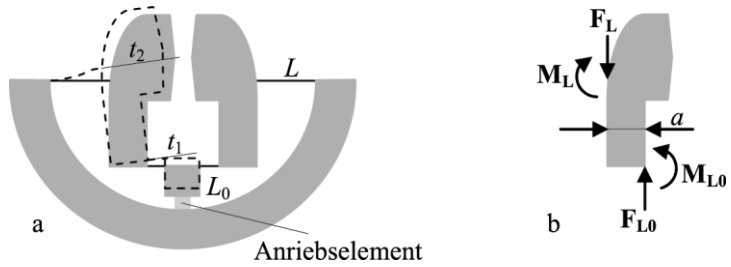


Abb. 3.9: Beispiel eines nachgiebigen Greifers mit mehreren Gelenken; a – ein Greifersystem mit zwei Gelenken mit verteilter und zwei mit konzentrierter Nachgiebigkeit; b – Darstellung der eingreifenden Belastungen auf ein Greiferelement (Gleichgewicht)

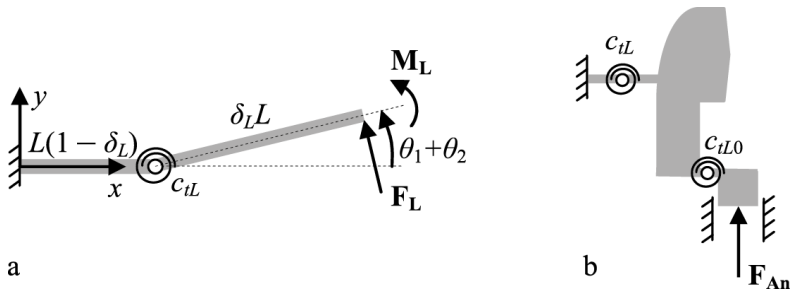


Abb. 3.10: Ein Starrkörper-Ersatzsystem; a – ein Starrkörper-Ersatzsystem eines nachgiebigen Elementes der Länge L , b – ein Starrkörper-Ersatzsystem des Greifers mit einem Freiheitsgrad von Null

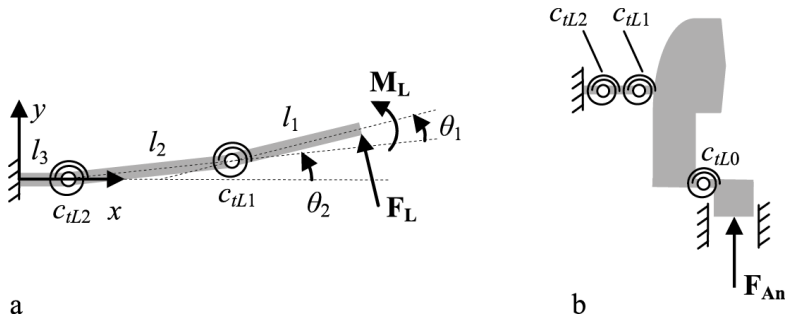


Abb. 3.11: Ein Starrkörper-Ersatzsystem; a – ein Starrkörper-Ersatzsystem mit zwei Gelenken für ein nachgiebiges Element der Länge L , b – ein Starrkörper-Ersatzsystem des Greifers mit einem Freiheitsgrad von Eins

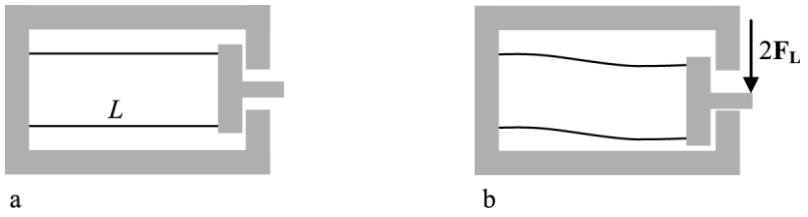


Abb. 3.12: Mechanisches Teilsystem einer optischen Sensoreinheit; a – im unbelasteten Zustand und b – im belasteten Zustand

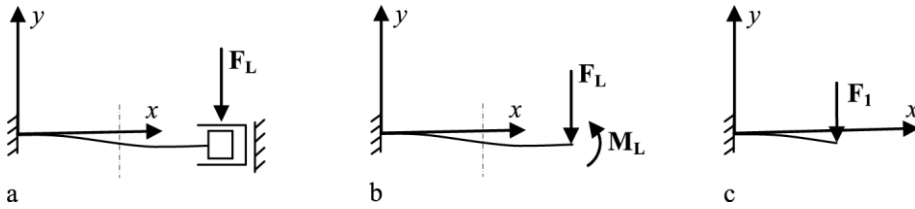


Abb. 3.13: Nachgiebiges Element als ein Teilsystem einer optischen Sensoreinheit; a – Darstellung der Lager, b – Darstellung der eingreifenden Belastungen (Lagerreaktionen) auf das nachgiebige Element der Länge L , c – eine Hälfte (aus Symmetriegründen) des nachgiebigen Elementes mit einer Länge $L/2$

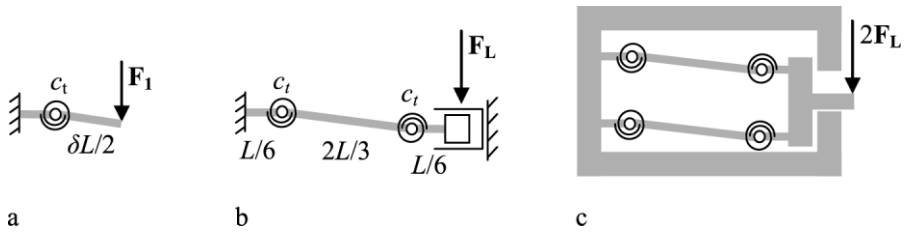


Abb. 3.14: Starrkörper-Ersatzsystem; a – für eine Hälfte des nachgiebigen Elementes und b – für das ganze nachgiebige Element; c – Starrkörpersystem-Modell für das Gesamtsystem

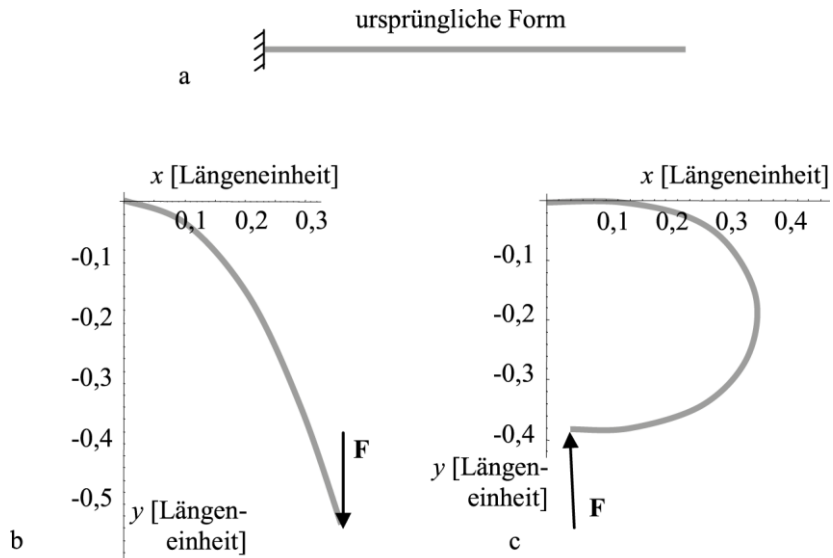


Abb. 4.1: Darstellung der Verformungen unter einer richtungstreuen und einer mitgeführten Kraft; a – unbelasteter Stab, b – Verformung eines Stabes unter Belastung durch eine richtungstreue Kraft, c – Verformung eines Stabes unter der Wirkung einer mitgeführten Kraft; die Kräfte sind für die Fälle b und c vom Betrag her gleich

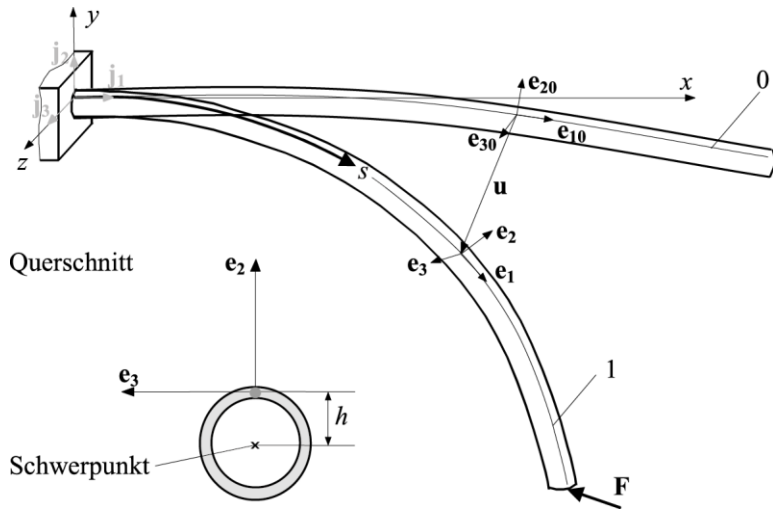


Abb. 4.2: Verformung eines Stabes: 0 – ursprünglicher Zustand, 1 – verformter Zustand

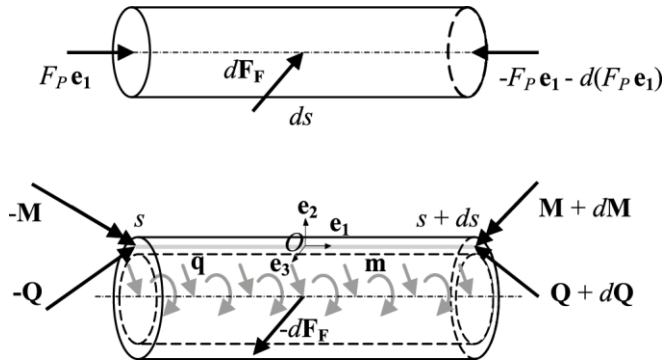


Abb. 4.3: Ein Stabelement mit Fluidfüllung; oben: Fluidelement, unten: Stabelement

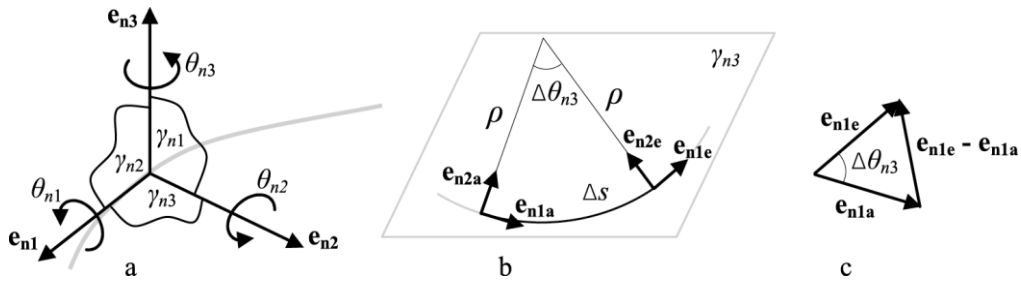


Abb. 4.4: Natürliches Koordinatensystem mit Bezeichnungen; a – Dreibein, Ebenen und Winkel; b – Bewegung des Dreibeins vom Anfang zum Ende des Kurvenelementes Δs mit dem Krümmungsradius ρ ; c – Differenz der Basisvektoren (s. Gleichung (4.27))

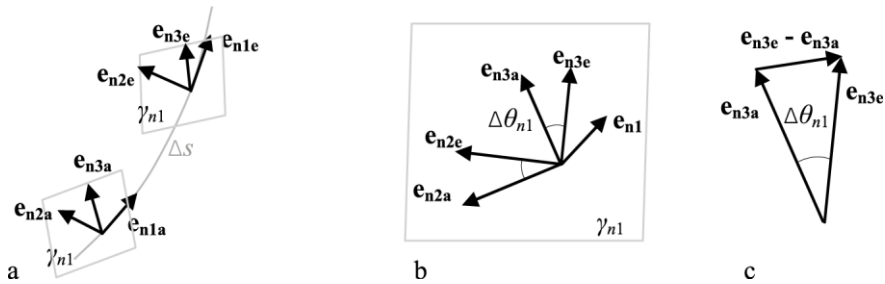


Abb. 4.5: Zur Ableitung des Basisvektors \mathbf{e}_{n3} ; a – Änderung des Dreibeins entlang der Kurve; b – Änderung des Basisvektors \mathbf{e}_{n3} in der Ebene γ_{n1} ; c – Differenz der Basisvektoren (s. Gleichung (4.31))

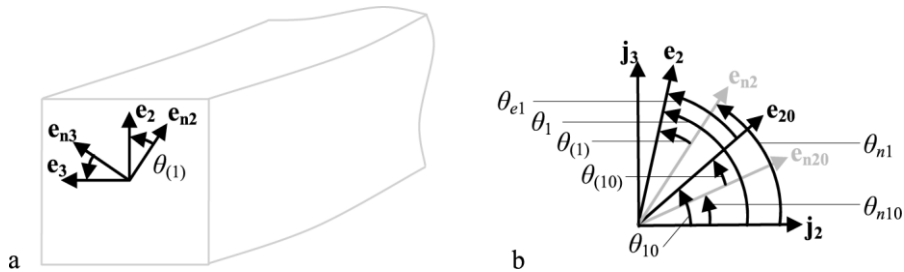


Abb. 4.6: Lage und Bezeichnungen der Basisvektoren; a – Vektorpaare \mathbf{e}_{n2} , \mathbf{e}_{n3} und \mathbf{e}_2 , \mathbf{e}_3 in der Querschnittsebene eines Stabes; b – Bezeichnungen für Indizes des Winkels θ_1 anhand des Basisvektors \mathbf{e}_2 , für folgende Zustände und Koordinatensysteme: \mathbf{e}_{2n0} – für natürliches Koordinatensystem, unbelasteter Zustand, \mathbf{e}_{2n} – für natürliches Koordinatensystem, belasteter Zustand, \mathbf{e}_{20} – für Stabkoordinatensystem, unbelasteter Zustand, \mathbf{e}_{20} – für Stabkoordinatensystem, belasteter Zustand, \mathbf{j}_2 – für kartesisches Koordinatensystem

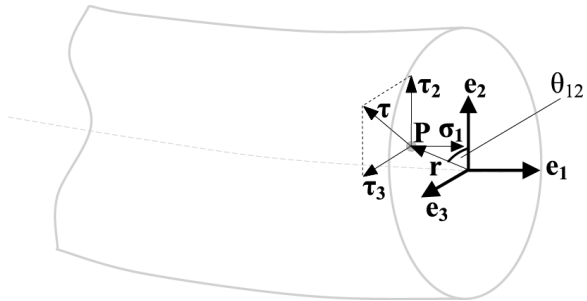


Abb. 4.7: Komponenten der Spannung σ im Querschnitt: Normalspannung σ_1 und Schubspannungen τ_2 und τ_3 für einen Punkt, welcher im Querschnitt durch ein Radiusvektor \mathbf{r} bestimmt wird

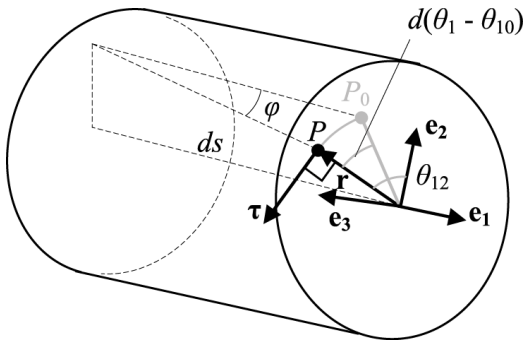


Abb. 4.8: Darstellung der Schubspannung und der entsprechenden Verdrehung des Stabelementes

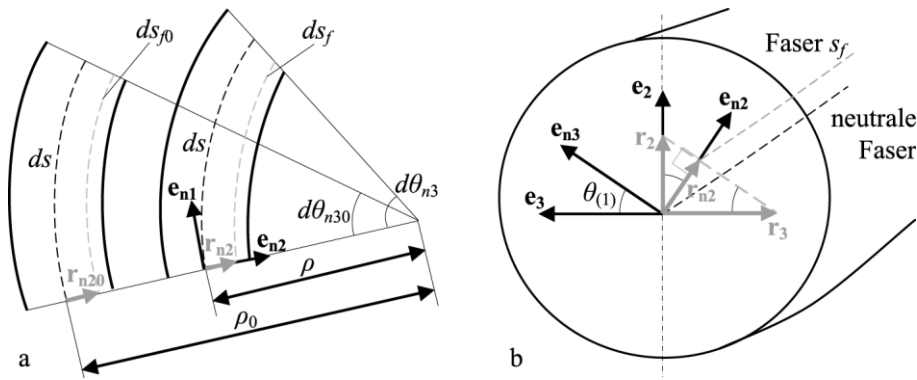


Abb. 4.9: Längenänderung einer Stabfaser; a – Änderung der Faserlängen und der Krümmung nach einer Verformung des Stabelementes der Länge ds ; b – schematische Darstellung der Lage des Vektors \mathbf{r}_{n2} sowie der Vektorpaare $\mathbf{e}_{n2}, \mathbf{e}_{n3}$ und $\mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ in einer Querschnittsebene des Stabes

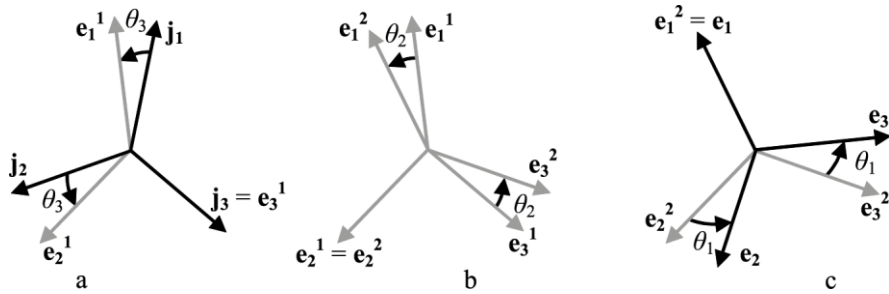


Abb. 4.10: Transformation der Basisvektoren $\{j_i\}$ in die Basisvektoren $\{e_i\}$ anhand drei Drehungen; a – Drehung um die Achse j_3 mit dem Winkel θ_3 ; b – Drehung um die Achse e_2^1 mit dem Winkel θ_2 ; c – Drehung um die Achse e_1^2 mit dem Winkel θ_1

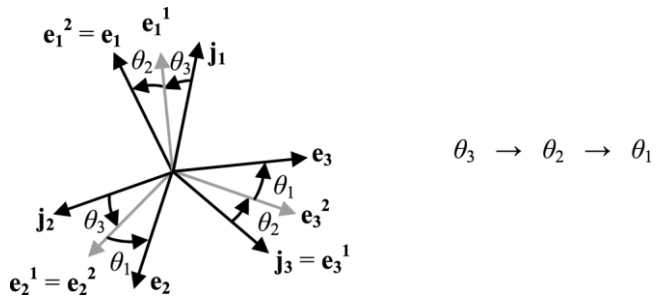


Abb. 4.11: Darstellung der Transformation $\{j_i\}$ zu $\{e_i\}$

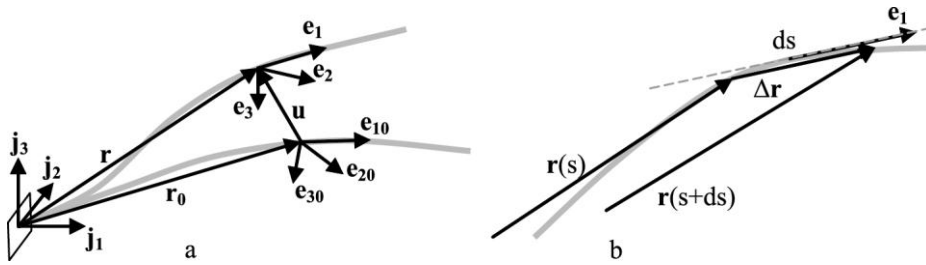


Abb. 4.12: Verschiebungen der neutralen Faser; a – Darstellung des Verschiebungsvektors u ; b – Darstellung der Ableitung des Radiusvektors r

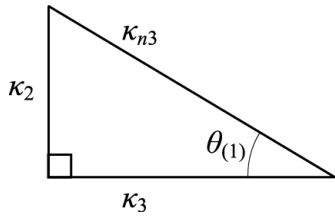


Abb. 4.13: Schematische Darstellung der Zusammenhänge aus (4.142) und für die zwei letzten Gleichungen aus (4.37): ein rechteckiges Dreieck mit einer Hypotenuse κ_{n3} und Katheten κ_2 und κ_3

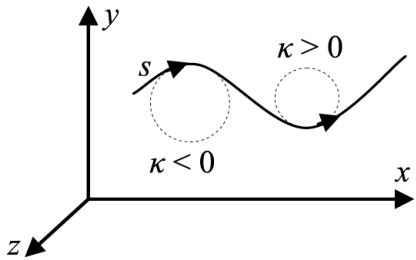


Abb. 4.14: Darstellung zur Erläuterung des Vorzeichens einer Kurvenkrümmung

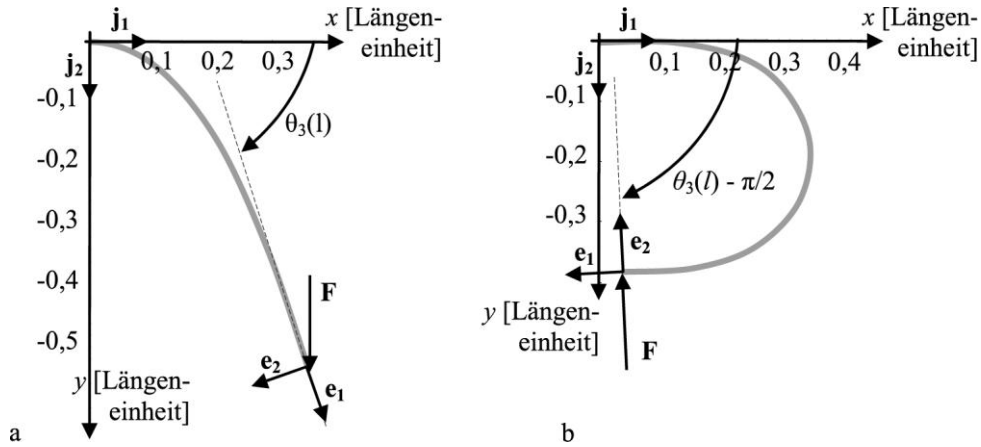


Abb. 5.1: Zu Randbedingungen für die richtungstreue und mitgeführte Belastungen; a – Verformung eines Stabes unter Belastung durch eine richtungstreue Kraft; b – Verformung eines Stabes unter der Wirkung einer mitgeführten Kraft; die Kräfte sind in den Fällen a und b vom Betrag gleich (vgl. Abb. 4.1)

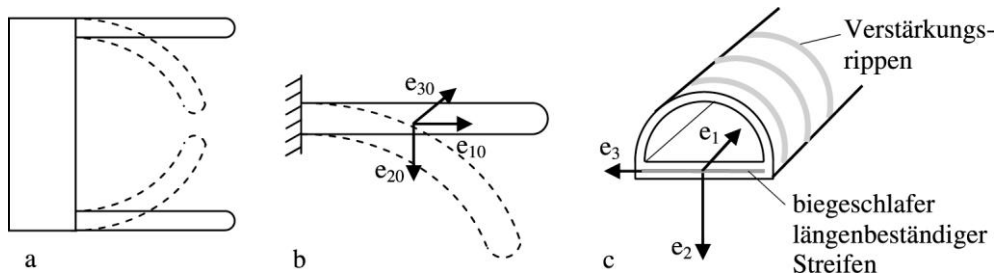


Abb. 5.2: Ein Greifer mit nachgiebigen hohlräumigen Fingern, die fluidmechanischen Aktuatoren darstellen; a – eine ursprüngliche und eine belastete Lagen der Finger, b – ein Dreibein $\{\mathbf{e}_{10}, \mathbf{e}_{20}, \mathbf{e}_{30}\}$, verbunden mit einer neutralen Achse des Fingers in einem unbelasteten Zustand, c – ein halbkreisförmiger Innenraumquerschnitt mit einem längenbeständigen und biegeschlaflen Streifen

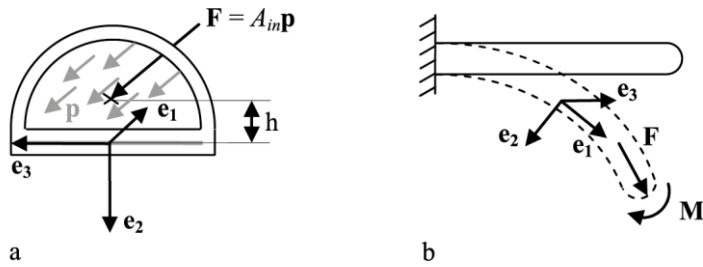


Abb. 5.3: Äußere Belastungen auf den Finger; a – eine resultierende Kraft F des Druckes p auf die innere Stirnfläche A_{in} des Fingers, die auch zum Moment M führt, b – das Moment M um die Achse e_3 und die Kraft F

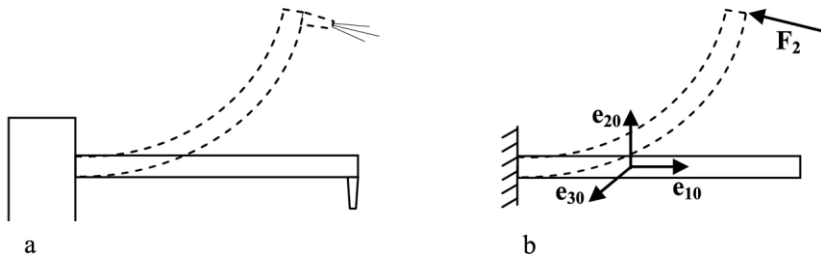


Abb. 5.4: Ein Schlauch mit ausströmender Flüssigkeit; a – ein ursprünglicher und ein belasteter Zustand des Schlauches, b – ein Modellstab mit einer einwirkenden Kraft, die durch die ausströmende Flüssigkeit entsteht

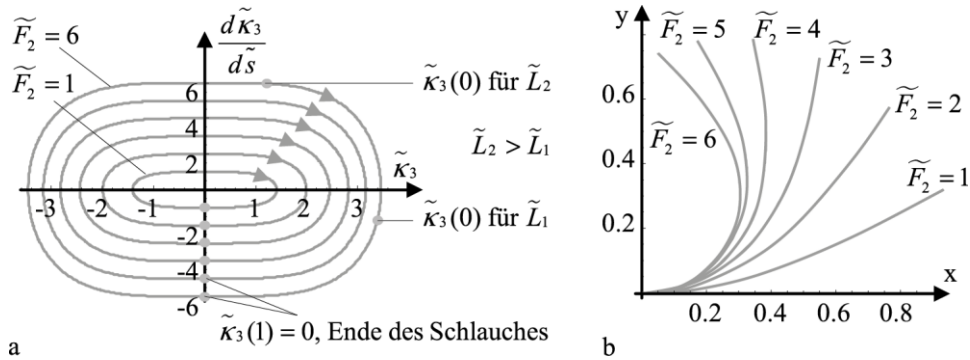


Abb. 5.5: Ergebnisse für verschiedene Werte der dimensionslosen Kraft von 1 bis 6 mit einem Schritt von 1; a – Niveaulinien, als ein Zusammenhang zwischen der Krümmung und deren Ableitung; einer längeren Länge des Schlauches entspricht ein längerer Weg auf einer Niveaulinie, die Punkte auf Niveaulinien stehen für eine Einspannstelle bzw. für ein Ende des Modellstabes; b – sechs Formen des belasteten Schlauches für unterschiedlich große Kräfte

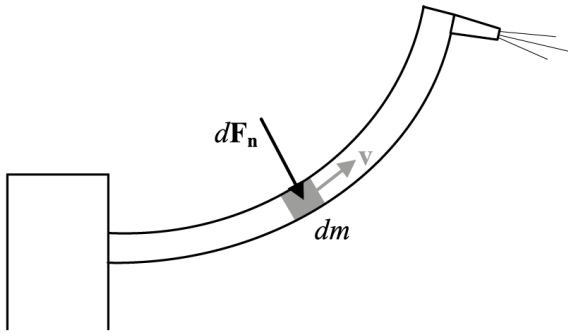


Abb. 5.6: Wirkung der strömenden Flüssigkeit auf den verformten Schlauch: ein Flüssigkeitselement dm , das eine konstante Geschwindigkeit v besitzt, wirkt mit einer Kraft $d\mathbf{F}_n$ stets normal zu der Stabachse auf den Schlauch

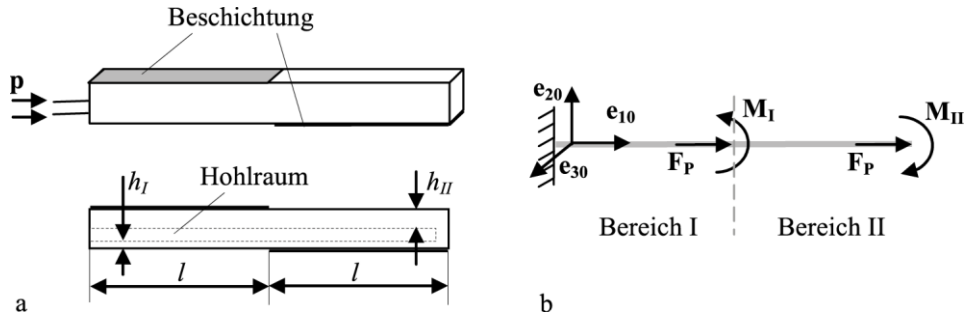


Abb. 5.7: Ein beschichteter Hohlraumstab mit äußeren Belastungen; a – ein hohler Stab mit einem außen quadratisch geformten Querschnitt mit Beschichtung (biegeschlaff und längenbeständig); b – Modellstab unter Wirkung von zwei Momenten und zwei Kräften, die durch eine Erhöhung des Innendruckes hervorgerufen werden

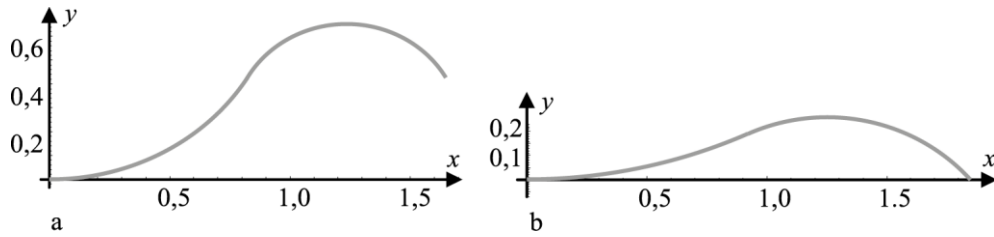


Abb. 5.8: Verformung des beschichteten hohlraumigen Stabes; a – ein verformter Stab mit Parametern aus (5.65), b – ein verformter Stab mit Parametern aus (5.67), das Ende des Stabes liegt auf der x-Achse

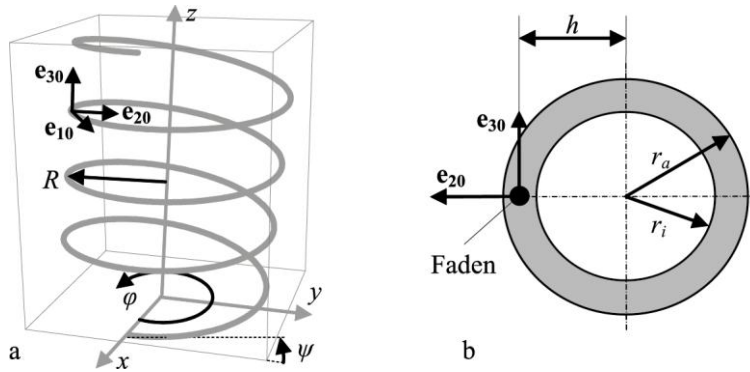


Abb. 5.9: Ein schraubenlinienförmiger Stab mit einem Hohlraum und einem eingebetteten Faden, als eine neutrale Faser, unter Innendruck; a – der Winkel ψ und der Radius R charakterisieren die Form des Stabes; b – Querschnitt des Stabes mit Basisvektoren \mathbf{e}_{30} sowie \mathbf{e}_{20} , deren Ursprung auf dem eingebetteten Faden liegt; r_i und r_a sind der Radius des Innenraumes und der Außenradius des Querschnittes

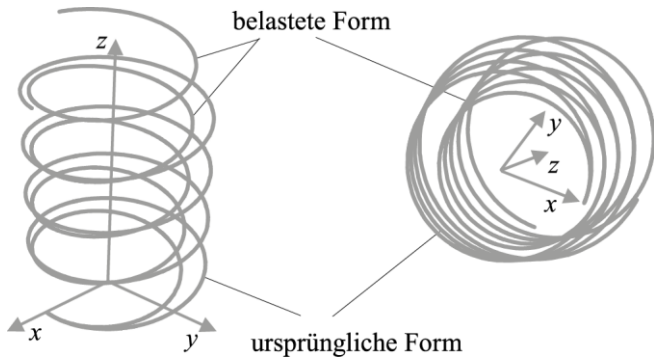


Abb. 5.10: Darstellung der ursprünglichen und der belasteten Form des schraubenlinienförmigen Stabes in zwei Ansichten

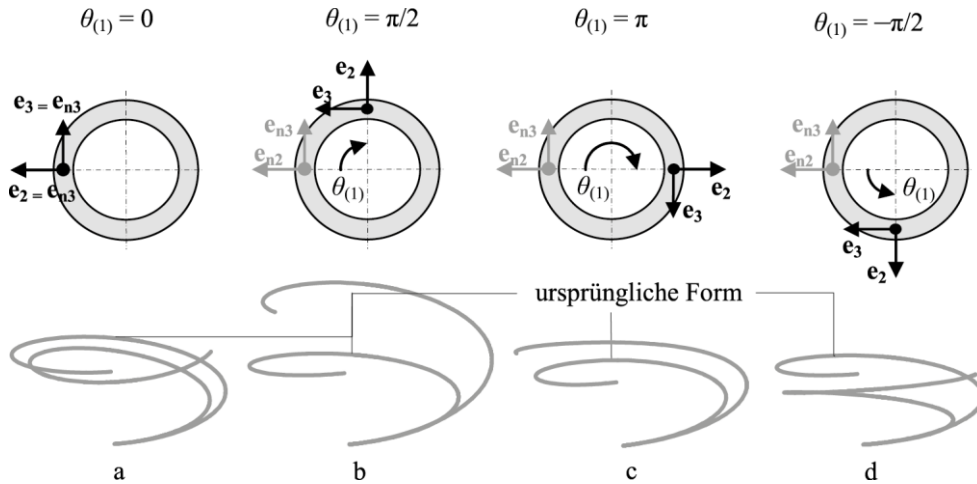


Abb. 5.11: Perspektivische Darstellung der Verformung des Stabes, welcher aus einer Windung in seinem unbelasteten Zustand besteht, unter einem Innendruck bei unterschiedlicher Positionierung des Fadens; a – für $\theta_{(1)} = 0$, b – für $\theta_{(1)} = \pi/2$, c – für $\theta_{(1)} = \pi$, d – für $\theta_{(1)} = -\pi/2$

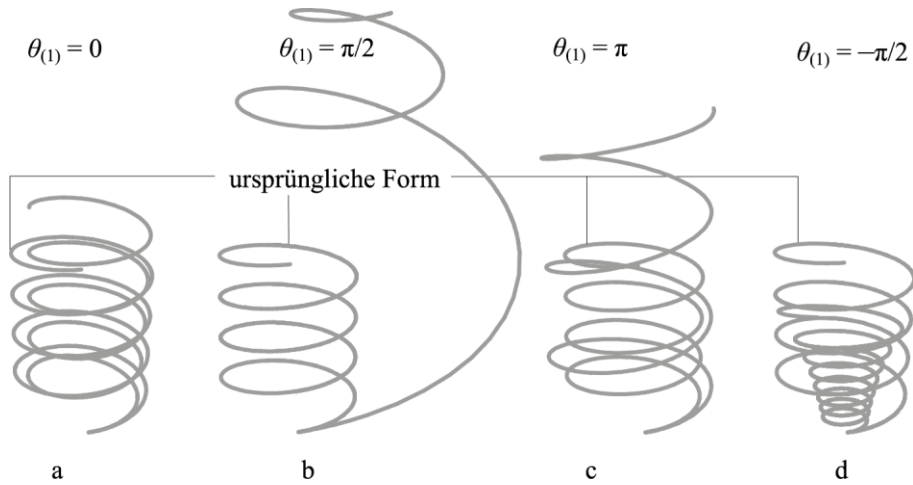


Abb. 5.12: Perspektivische Darstellung der Stabverformung mit vier Windungen unter einem Innendruck bei unterschiedlicher Positionierung des Fadens: a – für $\theta_{(1)} = 0$, b – für $\theta_{(1)} = \pi/2$, c – für $\theta_{(1)} = \pi$, d – für $\theta_{(1)} = -\pi/2$

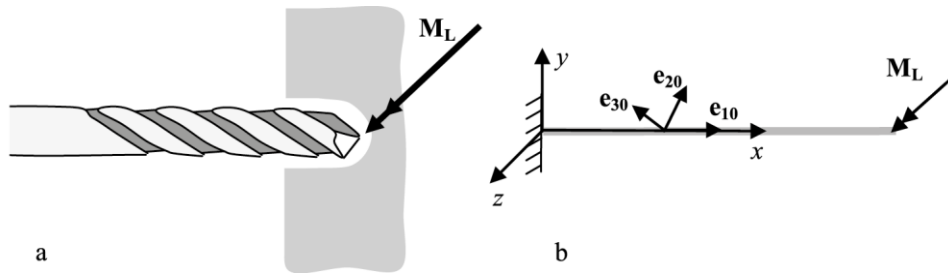


Abb. 5.13: Ein Bohrer unter Belastung durch ein Moment; a – ein Bohrer mit einem einwirkenden Moment an seinem Ende, b – ein Modell des Bohrers, der Stab besitzt eine Drillung

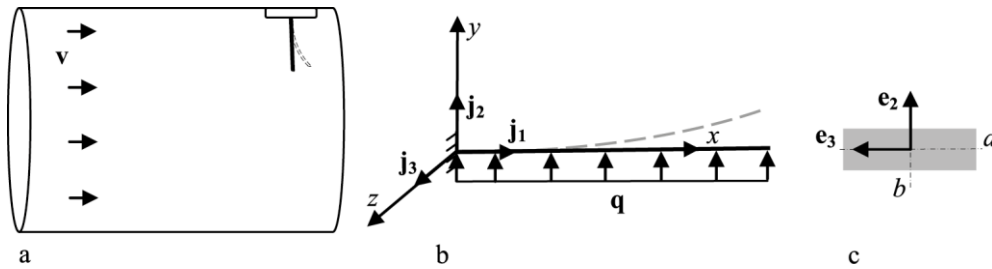


Abb. 5.14: Ein Fühler zur Messung dynamischer Drücke; a – schematische Darstellung eines nachgiebigen Elementes, welches zur Messung des dynamischen Druckes einer Rohrströmung verwendet wird; b – ein Modell des nachgiebigen Elementes, konstante verteilte Kraft als eine richtungstreue Belastung; c – Querschnitt des nachgiebigen Elementes mit Abmessungen b und a

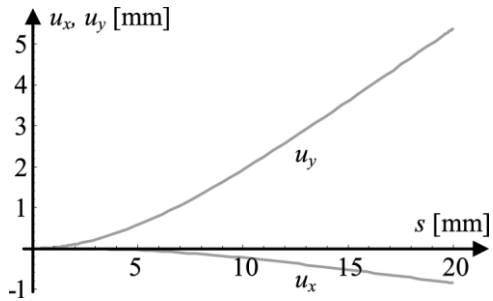


Abb. 5.15: Eine numerische Lösung für $u_x(s)$ und $u_y(s)$ für gegebene Werte der Parameter aus (5.116) für ein Modell eines nachgiebigen Elementes aus Abb. 5.14

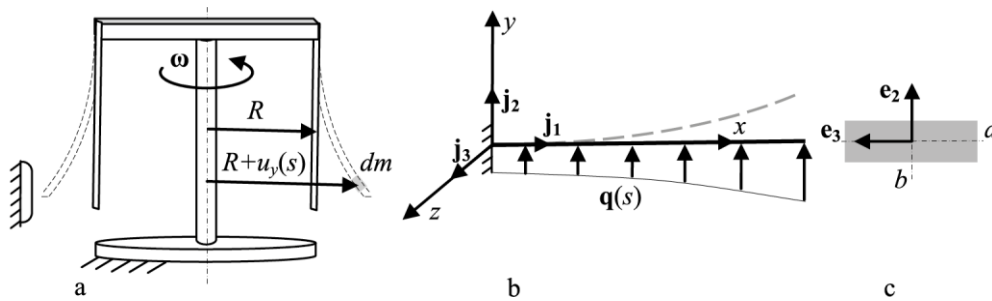


Abb. 5.16: Nachgiebige Elemente zur Überwachung der Winkelgeschwindigkeit; a – schematische Darstellung eines nachgiebigen Elementes in einem Überwachungssystem der Winkelgeschwindigkeit; b – ein Modell des nachgiebigen Elementes, von der Winkelgeschwindigkeit abhängige verteilte Kraft als eine richtungstreue Belastung; c – Querschnitt des nachgiebigen Elementes mit Abmessungen b und a

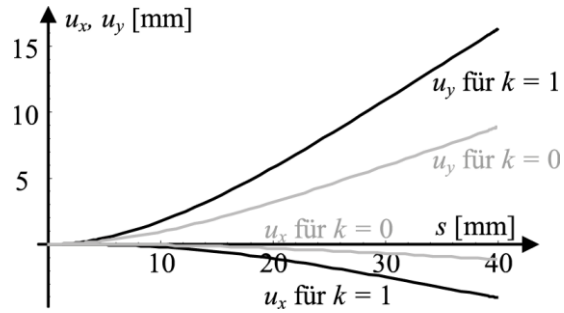


Abb. 5.17: Eine numerische Lösung für $u_x(s)$ und $u_y(s)$ für gegebene Werte der Parameter nach (5.122) für ein Modell des nachgiebigen Elementes aus Abb. 5.16

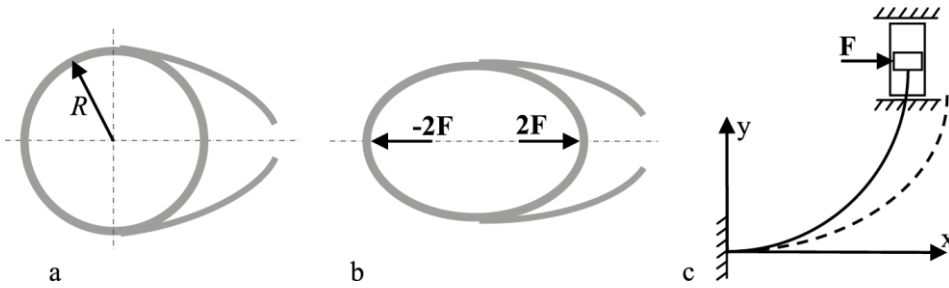


Abb. 5.18: Eine Greiferstruktur mit einem nachgiebigen Ringkörper; a – im ursprünglichen Zustand; b – im belasteten Zustand; c – ein Modell eines Viertels des Ringkörpers anhand der Symmetrie

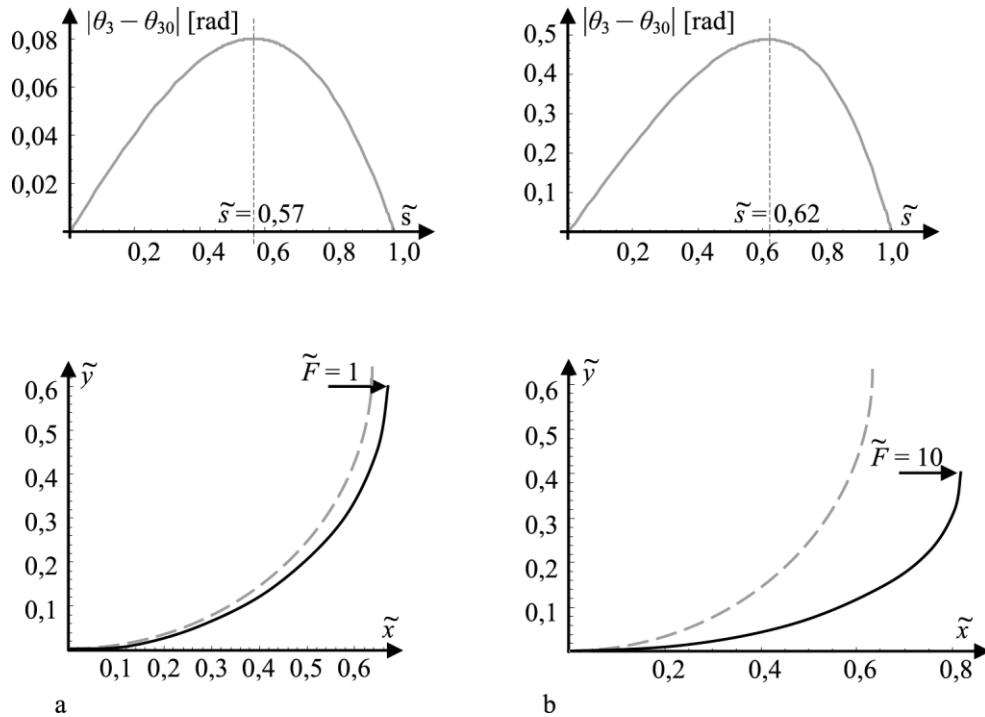


Abb. 5.19: Differenz $|\theta_3 - \theta_{30}|$ und die Form des Viertelringes vor Verformung (gestrichelte Linie) sowie ein unbelasteter und ein verformter Modellstab aus Abb. 5.18c unter Wirkung einer Kraft im kartesischen Koordinatensystem; a – für eine dimensionslose Kraft mit einem Wert von 1, b – für eine dimensionslose Kraft mit einem Wert von 10

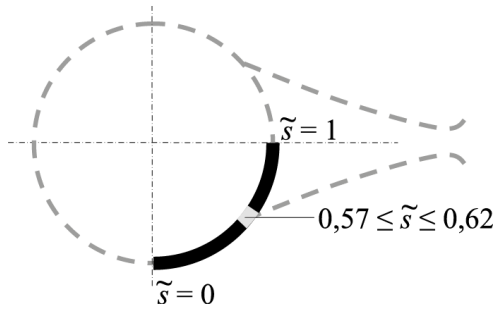


Abb. 5.20: Schematische Darstellung des Intervalls für die Befestigung der Finger am Greiferkörper und eine mögliche Form der Finger

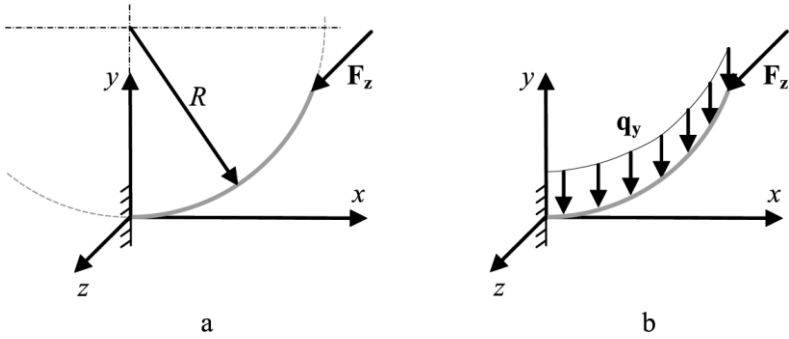


Abb. 5.21: Ein einseitig eingespanntes Ringsegment; a – belastet durch eine Kraft F_z an seinem freien Ende, b – belastet durch eine Kraft F_z und eine Streckenlast infolge seines Gewichtes, dargestellt als eine Streckenlast q_y

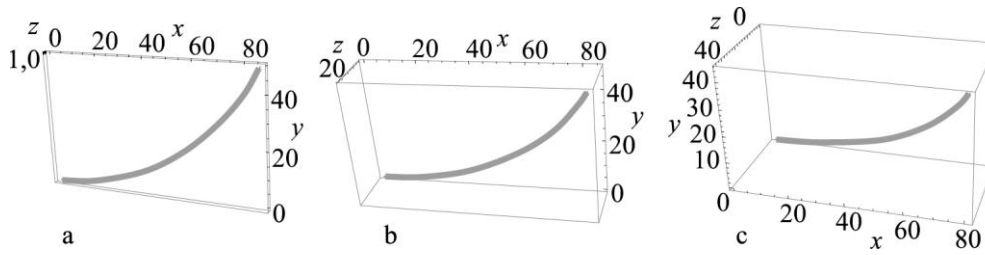


Abb. 5.22: Form des verformten Stabes unter Wirkung verschiedener Kräfte; a – Kraft F_{z1} und Streckenlast, b – Kraft F_{z2} und Streckenlast, c – Kraft F_{z3} und Streckenlast

Nr.	Berechnete Größen	$F_{z1} = 1 \text{ N}$	$F_{z2} = 10 \text{ N}$	$F_{z3} = 20 \text{ N}$
1	$\Delta u = \mathbf{u}(k=1) - \mathbf{u}(k=0) $	0,0183 mm	0,0179 mm	0,0167 mm
2	$u = \mathbf{u}(k=1) $	2,19 mm	21,16 mm	34,47 mm
3	$100 \% \cdot \Delta u / u$	0,84 %	0,085 %	0,048 %

Tab. 5.1: Vergleich der Ergebnisse für die Verschiebung vom Balkenende für drei unterschiedliche Kräfte; 1. Zeile: Unterschied der Verschiebung zwischen der Belastung durch nur eine Kraft und durch eine Summe der Kraft und der Streckenlast, 2. Zeile: Verschiebung unter Belastung durch eine Kraft und Streckenlast, 3. Zeile: relativer Betrag der ersten Größe bezogen auf die zweite Größe, als ein Wert zur Abschätzung der Auswirkung des Eigengewichtes auf die Verformung des Stabes

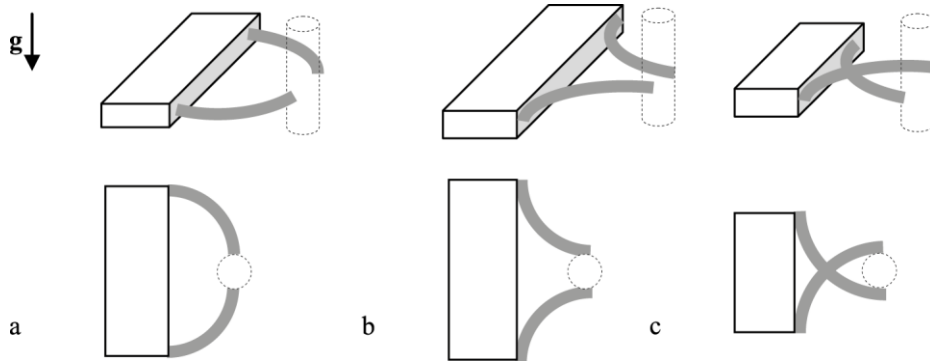


Abb. 5.23: Drei verschiedene Positionierungen der Greiferfinger; oben – eine räumliche Ansicht der Greifer, **g** ist die Erdbeschleunigung zur Berücksichtigung der Schwerkraft des Objektes; unten – eine Ansicht in der zur Erdbeschleunigung orthogonalen Ebene

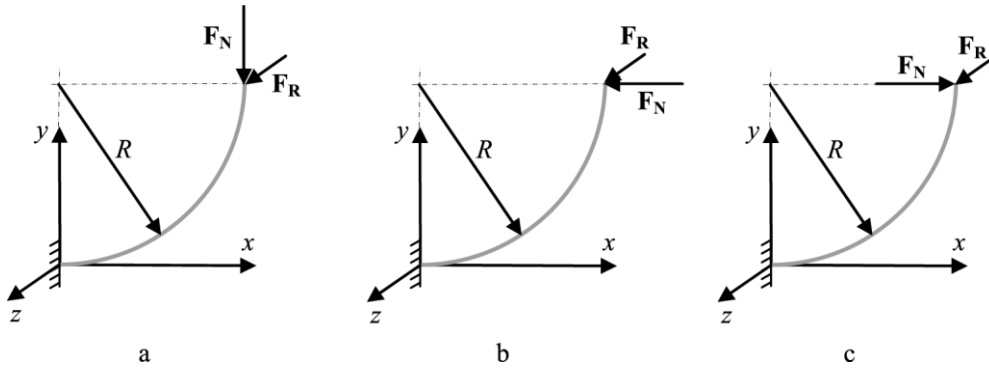


Abb. 5.24: Drei Modelle eines Greiferfingers als ein einseitig eingespannter Viertelringsegment nach Abb. 5.23a–c: F_R – eine Reibungskraft, F_N – eine Normalkraft

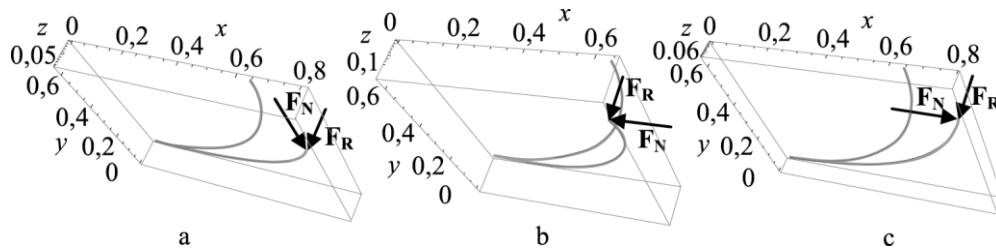


Abb. 5.25: Unbelastete Form und ein verformter Zustand der Greiferfinger aus Abb. 5.24 für drei Belastungsfälle unter Wirkung der Normalkraft und der Reibungskraft

Nr.	Berechnete Größen	Fall a	Fall b	Fall c	Belastung nur unter F_R
1	Gesamtverschiebung	0,2476	0.2728	0.2069	0.0730
2	Verschiebung in z-Richtung	0.1007	0.0802	0.0599	0.0729

Tab. 5.2: Ergebnisse in dimensionsloser Form für Verschiebungen eines gekrümmten Greiferfingers; es sind eine gesamte Verschiebung im Raum und eine Verschiebung in z-Richtung für drei Belastungsfälle aus Abb. 5.24 dargestellt; letzte Spalte beinhaltet die Werte für die genannten Verschiebungen unter Wirkung der Kraft F_R ($F_N = 0$)