

1 Einleitung

1.1 Belastungsmessungen an Bauteilen

Das Bemessen von Bauteilen wie z. B. Maschinen, Handhabungssysteme, Roboter, Fahr- und Flugzeuge basiert auf der Festigkeitsrechnung. Dafür aber muss die Bauteilbelastung nach Art, Betrag und Wirkrichtung bekannt sein. Moderne Entwicklungsstrategien verlangen aus Kosten- oder Gewichtsersparnisgründen weitgehende Werkstoffeinsparungen, so dass eine Überdimensionierung bei unbekanntem oder nur näherungsweise abschätzbaren Belastungen über die Sicherheitszuschläge nicht mehr möglich ist.

Um dennoch den Forderungen nach Sicherheit und ausreichender Lebensdauer der Bauteile zu genügen, muss man die Werkstoffbeanspruchung durch Messungen unter Betriebsbedingungen ermitteln. Die zur diesbezüglichen Beurteilung wichtigste Größe ist die mechanische Spannung, welcher der Werkstoff ausgesetzt ist. Zur experimentellen Bestimmung von Werkstoffspannungen nutzt man den von Robert Hooke im Jahre 1678 entdeckten Zusammenhang zwischen der mechanischen Spannung σ , also die auf die Fläche wirkende Kraft, und der, auch an der Oberfläche der Bauteile auftretenden Verformung, der sog. Dehnung ϵ , als die relative Längenänderung $\Delta l/l_0$.

Auf dem Prinzip der Dehnungsmessung basiert ein bedeutender Zweig der experimentellen Spannungsanalyse. Bei der konstruktiven Gestaltung und Erprobung komplizierter und hochbeanspruchter Bauteile ist die richtige Auslegung des Systems für eine vorgegebene Nutzungsphase von zentraler Bedeutung. Es muss stets gewährleistet sein, dass in der Nutzungsphase keine unzulässigen Belastungen auftreten und die Grenzwerte für die maximal zulässigen Spannungen σ_{zul} nicht überschritten werden, da dies unweigerlich zu Materialermüdung und somit zu einem frühzeitigen Ausfall des Systems führen würde. Obwohl heute schon viele konstruktive Arbeiten am Rechner unter Nutzung von CAE-Software (Computer Aided Engineering) getätigt werden, kann eine Verifikation speziell bei der dynamischen Auslastung von Bauteilen oftmals erst durch langwierige Erprobungsphasen erfolgen. Dies ist auch darin begründet, dass die tatsächlichen Betriebsbedingungen in der Regel nur unzureichend im Rechner simuliert werden können, da sie in ihrer Manigfaltigkeit und Komplexität in der Regel nicht bekannt sind. Speziell unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit ist eine Verlängerung der Nutzungsphase

und eine höhere Auslastung bei besonders kostenintensiven mechatronischen Systemen wie z. B. im Bereich der Energietechnik [1] sowie der Luft- und Raumfahrt [2] von großem Interesse. Dies bedingt jedoch auch die Implementierung von modernen Inspektions- und Wartungskonzepten im Sinne einer automatischen Inspektion. Unter sicherheitstechnischen Aspekten ist gerade bei extremer Leichtbauweise die Online-Erfassung und -Überwachung der Bauteil- und Baugruppenbelastungen unverzichtbar.

1.2 Ermittlung von Werkstoffspannungen aus Dehnungsmessungen

Sowohl mechanische Materialspannungen σ , die durch Zug, Druck- oder Biegekräfte bzw. Momente hervorgerufen werden, als auch Torsionsspannungen τ , die durch Torsionsmomente bedingt sind, lassen sich über Verformungen messen. Die Grundlage für diese Technologie bildet das Hook'sche Gesetz

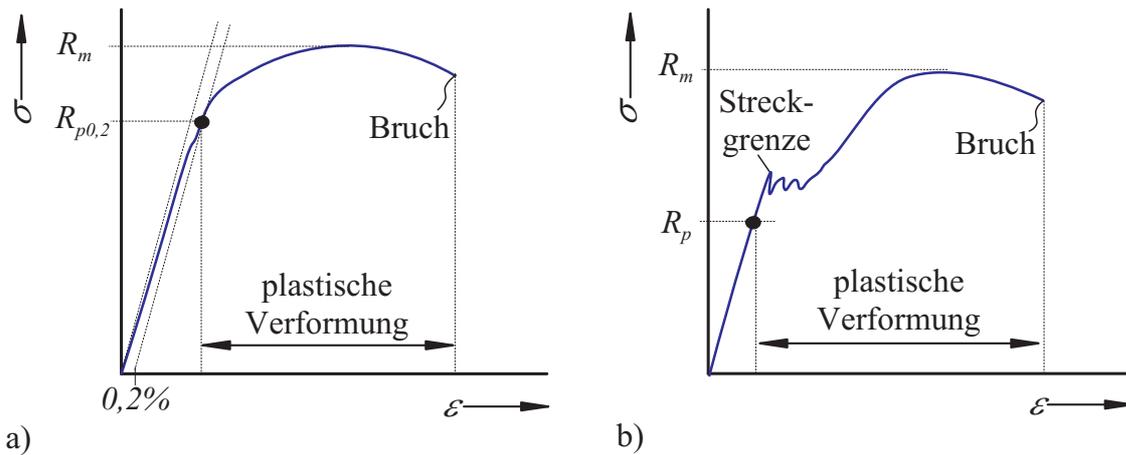
$$\sigma = E \cdot \epsilon, \quad (1.1)$$

welches über den Elastizitätsmodul E einen linearen Zusammenhang zwischen der mechanischen Spannung σ und der Dehnung ϵ für den eindimensionalen elastischen Verformungsbereich herstellt [3]. Oberhalb der Proportionalitätsgrenze R_p erfolgt eine plastische, nichtlineare Werkstoffverformung. Bild 1.1 zeigt beispielhaft die Spannungs-Dehnungs-Diagramme für einen stetigen bzw. unstetigen Übergang vom linear elastischen in den nichtlinear plastischen Verformungsbereich.

Als Beispiel für einen Werkstoff, der einen stetigen bzw. unstetigen Übergang aufweist, ist eine hochfeste Aluminium-Legierung bzw. ein Stahl mit einer geringen Zugfestigkeit zu nennen [4]. Speziell bei einem stetigen Übergang liegt bei genauer Betrachtung auch unterhalb der Proportionalitätsgrenze nichtlineares Werkstoffverhalten vor. Für eine lineare Approximation wird eine Ersatzgröße, die 0,2 % Dehnungsgrenze $R_{p0,2}$, d. h. der Grenzwert, ab dem der Werkstoff um 0,2 % irreversibel verformt wird, definiert. Die maximal zulässige Spannung σ_{zul} eines Werkstoffs ist aus der Grenzspannung σ_{lim} und der Sicherheitszahl S gemäß

$$\sigma_{zul} = \sigma_{lim}/S \quad (1.2)$$

bestimmbar. Es können drei verschiedene Belastungsfälle unterschieden werden: die statisch ruhende, die dynamisch schwellende und die dynamisch wechselnde Belastung. Beim statisch ruhenden Verlauf sind Größe und Richtung der Belastung gleichbleibend. Bei der statisch schwellenden Belastung schwankt die mechanische Spannung zwischen der Nulllage und einem Maximalwert. Hier liegt eine reine Zug- oder Druckbelastung vor. Im dritten Fall, der dynamisch wechselnden Belastung,



σ mechanische Spannung; ϵ mechanische Dehnung; R_p , $R_{p0,2}$ Proportionalitätsgrenze; R_m Streckgrenze

Bild 1.1 : Spannungs-Dehnungs-Diagramme bei a) stetigem b) unstetigem Übergang vom elastischen in den plastischen Verformungsbereich

alterniert der Spannungsverlauf ständig zwischen einer Zug-/Druckbelastung, wobei der Betrag der Höchstwerte der Belastungen jeweils gleich groß ist. Mit steigender zeitlicher Belastung des Werkstoffs reduziert sich die maximal zulässige Spannung beträchtlich. Für diese Belastungsfälle existieren jedoch keine eindeutigen Zahlenwerte für die Sicherheitszahlen, sondern lediglich Zahlenbereiche. Die Sicherheitszahlenbereiche in Abhängigkeit von den Belastungsfällen für zähe und spröde Werkstoffe zeigt Tab. 1.1.

Tabelle 1.1 : Sicherheitszahlen S zäher und spröder Werkstoffe für die Belastungsfälle statisch ruhend (I), statisch schwellend (II) und dynamisch wechselnd (III) [5]

Werkstoffart	zäh			spröde		
	I	II	III	I	II	III
Sicherheitszahl S	1,2..1,5	1,8..2,4	3,0..4,0	2,0..4,0	3,0..5,0	5,0..6,0

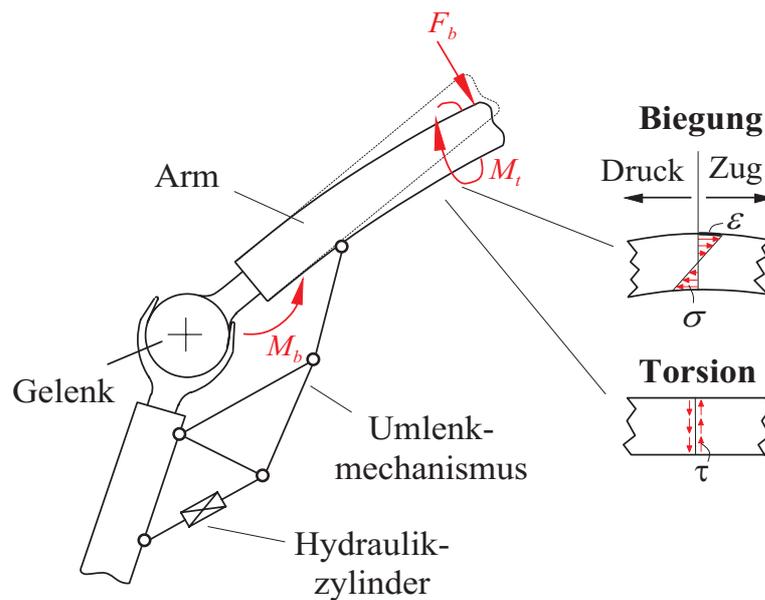
Man erkennt, dass für spröde Werkstoffe im Vergleich zu zähen Werkstoffen die Grenzwerte (vgl. Gl. (1.2)) und damit die maximal zulässigen Spannungen deutlich geringer sind.

In der Praxis ist aufgrund der räumlichen Abmessungen der Dehnungssensoren keine wirklich punktuelle Dehnungsmessung möglich. Es erfolgt stets nur eine Mittelwertbestimmung des Dehnungsintervalls. Speziell bei Werkstoffen, die einen inhomogenen Elastizitätsmodul aufweisen, muss die Messlänge mindestens fünf mal so groß wie die Länge der Werkstoffinhomogenitäten für einen repräsentativen Messwert gewählt werden.

Dynamische, also zeitlich sich ändernde Dehnungen beim Schwingverhalten von Bauteilen lassen Rückschlüsse zu z. B. auf

- ihre Schwingfestigkeit und
- die Werkstoffermüdung infolge einer Dauerschwingungsbeanspruchung.

Bild 1.2 zeigt die Belastungen an einem einfachen Gelenk-Arm-System, z. B. eines Handhabungssystems.



F_b Biegekraft; M_b Biegemoment; M_t Torsionsmoment; σ Normalspannung; τ Schubspannung; ϵ Dehnung

Bild 1.2 : Belastungen eines Gelenk-Arm-Systems

1.3 Geschichtliches und Stand der Technik

Nach den Arbeiten von Robert Hooke [3] über den Zusammenhang von Werkstoffspannung und Dehnung galt es, die Dehnungen zu messen. Bereits 1843 beschrieb C. Wheatstone den Effekt der proportionalen Änderung des Ohm'schen Widerstandes von metallischen Leitern bei deren mechanischer Beanspruchung [6]. Weiterführende Arbeiten sind 1856 von W. Thomson [7] veröffentlicht worden, in denen u. a. die Widerstandsänderung mit Hilfe eines empfindlichen Galvanometers und einer Wheatstone-Brückenschaltung detektiert wurde. Diesen Arbeiten

wurde jedoch zunächst keine große Bedeutung beigemessen, da für die sichere Detektion der sehr kleinen Widerstandsänderungen die erforderlichen messtechnischen Voraussetzungen (Stand der Messverstärker, günstige Laborbedingungen erforderlich, extrem schwingungsempfindliches Galvanometer,..) für eine praktische Nutzung gänzlich fehlten. Im Jahre 1938 erfanden die beiden Wissenschaftler E. E. Simmons und A. C. Ruge unabhängig voneinander den “elektrischen Widerstands-Dehnungsmessstreifen mit gebundenem metallischen Messgitter”, kurz Dehnungsmessstreifen (DMS) genannt [8]. Bereits im Jahre 1941 wurde die industrielle Produktion durch die Gründung der Firma *Baldwin-Southwark Corp.* (USA) aufgenommen. In der Folgezeit versuchte man verschiedenerlei technologische Abwandlungen, die einerseits zu einer Rationalisierung der Fertigungstechnik und andererseits zu einer Steigerung der Empfindlichkeit führen sollten. Die Anwendung der Technologie für “gedruckte Schaltungen” nach einem Patent von P. Eisler im Jahre 1952 führte schließlich zu einem “regelrechten Quantensprung” in der DMS-Technologie [9]. Die bis dahin üblichen Papier-DMS mit Filzabdeckung (Widerstandsdraht in Zick-zack-Windungen auf Seidenpapier) konnten durch Metallfolien-DMS ersetzt werden. Die heutigen, in verschiedenen geometrischen Formen vorliegenden Metall-Folien- und Halbleiter-Dehnungsmessstreifen haben eine äußerst hohe Auflösung (Dehnbereich) von $\Delta\epsilon/\epsilon = 1 \text{ ‰}$ (einmalig 1%) bei einer Dynamik bis $f = 50 \text{ kHz}$, allerdings bei starker Temperaturabhängigkeit. Seit einigen Jahrzehnten ist die Dehnungsmessstreifentechnologie im Bereich der experimentellen Spannungsanalyse sowie im Messwertaufnehmerbau fest etabliert [10], [11], [12]. Dabei ist die Bestimmung der Dehnung ein Maß für mechanische Spannungen, Kräfte und Momente.

Mit der Entwicklung hochreiner Gläser nach 1970 für die optische Nachrichtentechnik wurde die Voraussetzung für eine neuartige optische Sensorik, die sog. Glasfasersensorik, geschaffen. Obwohl schon eine Vielzahl von Prinzipien für eine faseroptische Dehnungsmessung demonstriert wurden, ist erst ab 1988 der vermehrte Einsatz optischer Dehnungssensoren auf der Basis von Faser-Gittern zu beobachten [13], [14]. Zurückzuführen ist diese Entwicklung auf eine Entdeckung nach Ken Hill et. al [15]. Speziell Faser-Bragg-Gitter (FBG) weisen das Potenzial auf, die alt bewährten konventionellen DMS zu ersetzen und neue Anwendungsgebiete zu erschließen. Dies ist auf die herausragenden Eigenschaften dieser Sensoren zurückzuführen, wobei nachfolgend nur einige genannt werden. Durch die kleinen und kompakten Abmessungen der intrinsischen Fasergitter eignen sich diese besonders zur Integration in faserverstärkte Verbundstoffe, sog. smart-structures. Zudem sind FBG deutlich belastbarer als DMS [16], so dass Belastungsmessungen bis in den Bereich der plastischen Verformung und des Versagens des Werkstoffs prinzipiell möglich sind. Besonders hervorzuheben sind die hervorragenden Multiplexeigenschaften der FBG, die eine Integration einer Vielzahl von Sensoren in eine Glasfaser gestatten, so dass eine deutliche Reduzierung des Verkabelungsaufwands im Vergleich zum DMS realisiert werden kann. Schließlich ist noch die Störungsempfindlichkeit der FBG-Sensoren gegen elektromagnetische Felder für den Einsatz in hochfrequenz-verseuchter Umgebung zu nennen.

1.4 Arbeitsvorhaben und Problemstellung

Bei mechatronischen Systemen treten bei dynamischer Belastung Eigenschwingungen auf. Für eine aktive Regelung und Schwingungsdämpfung sowie eine Kollisionsvermeidung ist eine Online-Erfassung der dynamischen Biegelinie und Torsion einzelner Bauteile erforderlich. Bild 1.3 zeigt ein Beispiel für ein elastisches Handhabungssystem für schwere Lasten.

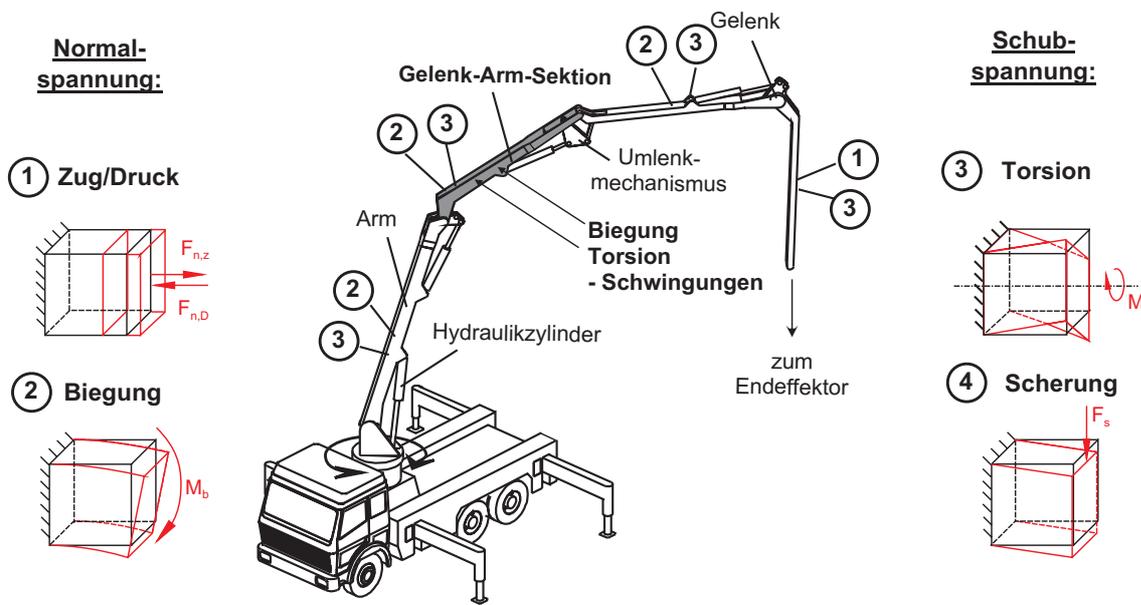
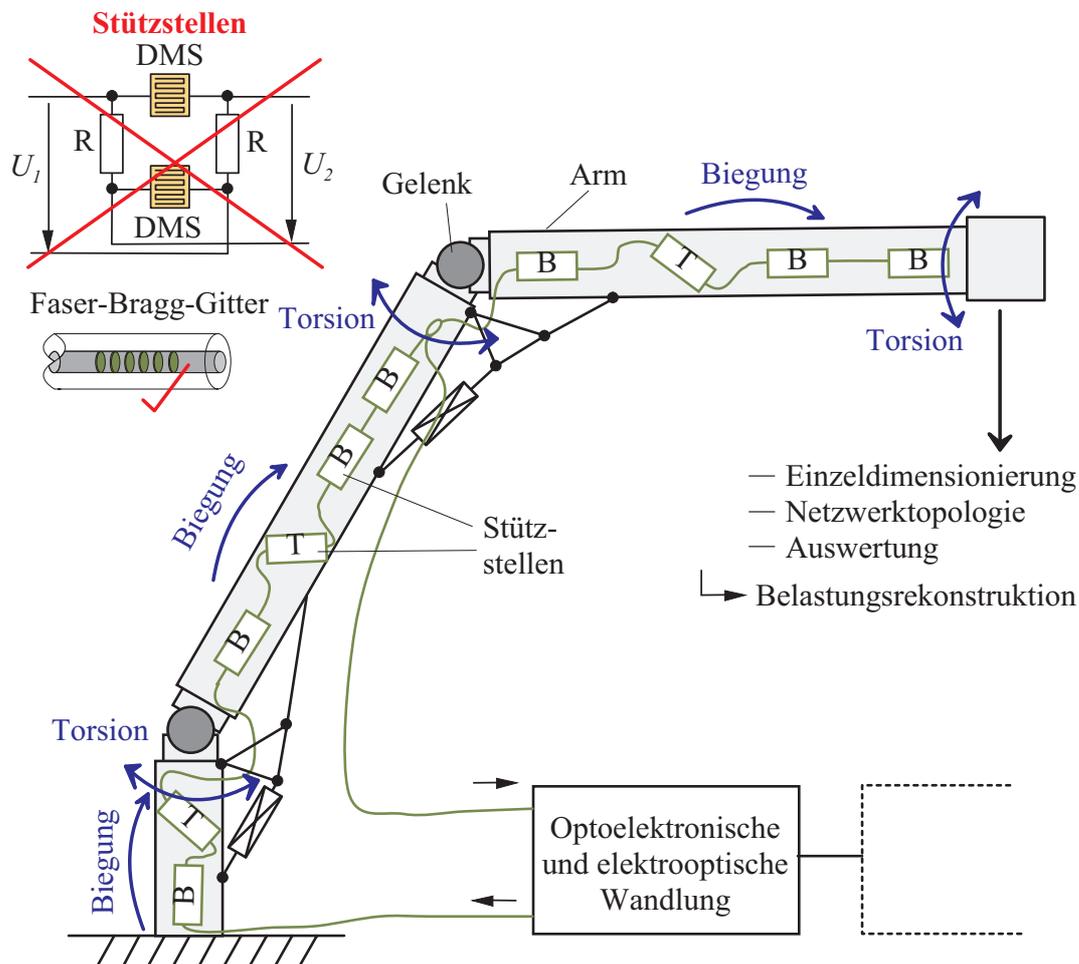


Bild 1.3 : Wirkung von Belastungsgrößen auf ein elastisches Handhabungssystem für schwere Lasten

Je nach Stellung der Arme und Lastverhältnisse treten verschiedene Belastungen in den einzelnen Gelenk-Arm-Sektionen auf. Diese Belastungsgrößen sind durch die Analyse der Spannungen bzw. Dehnungen an der Oberfläche des Körpers erfassbar [17], [18]. Während statische Belastungen mit wenigen Einzelsensoren ermittelt werden können, sind zur Erfassung der dynamischen Belastungsgrößen eine Vielzahl von Dehnungssensoren erforderlich. Mit Hilfe der endlichen Anzahl von Messstellen und der mathematischen Aufbereitung der Messwerte lässt sich der reale Belastungsverlauf approximieren. Die in der Praxis geforderte Approximationsgüte sowie die Geometrie und die Werkstoffparameter des elastischen Körpers haben einen signifikanten Einfluss auf die zu erfassende statische und insbesondere dynamische Verformung. Speziell im Fall eines zeitkontinuierlichen, überlagerten Belastungsverlaufs wie z. B. einer dynamischen Biege- und Torsionsbelastung resultiert eine zeitabhängige Hauptachsenausrichtung. Zur Erfassung dieses hochkomplexen Verformungszustands sind die topologischen Untersuchungen, d.h. das Festlegen von Anzahl und geometrischer Anordnung der Einzelsensoren sowie deren eventuelle Verschaltung zu einem Netzwerk sowie die Online-Signalerfassung von besonderer Bedeutung.

Die Teilprobleme, die zum Entwurf von Netzwerken aus Faser-Bragg-Gitter-Sensoren zu bearbeiten sind, sind in Bild 1.4 dargestellt.



B Dehnungssensor für Biegung; T Dehnungssensor für Torsion; U_1 Quellenspannung; U_2 Diagonalspannung; R elektrischer Widerstand

Bild 1.4 : Übersicht der Teilprobleme für die Erfassung der dynamischen Biege- und Torsionsbelastung an Gelenk-Arm-Systemen von Schwerlasthandhabungssystemen

Zum Entwurf von Netzwerken aus Faser-Bragg-Gitter-Sensoren müssen im einzelnen untersucht werden

- der Zusammenhang zwischen Belastungs- und Verzerrungszustand als Grundlage für eine stützstellenbasierende Belastungsrekonstruktion,
- der allgemeine Aufbau, die Funktion und die Einsatzmöglichkeiten von Faser-Bragg-Gittern,
- die mathematische Beschreibbarkeit verteilter Faser-Bragg-Gitter-Sensoren,

- die Topologie von FBG-Sensoren,
- die Belastungsrekonstruktion bei überlagerter Biege- und Torsionsbelastung sowie
- die Signalerfassung und -verarbeitung bei komplexen Netzwerken.