
9 Lösungsfelder

Solutions

In diesem Kapitel werden Lösungsfelder angesprochen, die bei der Entwicklung eine bedeutsame Rolle spielen. Sie betreffen in erster Linie die bekannten Schlussarten bei Verbindungen in fester Lagezuordnung (9.1) und die bewährten Maschinenelemente (9.2) sowie die Charakteristiken von Antrieben und Steuerungen (9.3). Bei neuzeitlichen Lösungen werden aber neben dem klassischen Branchenwissen mehr und mehr die Integration von Mechanik, Elektronik und Software in Form von Mechatronik (9.5) und Adaptronik (9.6), letztere in Verbindung mit Verbundbauweisen (9.4), in den Vordergrund treten, um mit deren Hilfe neue Funktionen mit neuartigen Lösungen anbieten zu können. Der konventionelle Maschinenbau wird sich in den kommenden Jahren unter Nutzung solcher Lösungsfelder stark verändern und zu einer erweiterten Leistungsfähigkeit gelangen. Eine solche Entwicklung mag in manchen klassischen Anwendungsfeldern noch als utopisch oder als zu teuer angesehen werden, aber mit zunehmender Anwendung werden sich die Komponenten verbilligen und gebräuchlicher werden. Die heutige Kraftfahrzeugtechnik ist davon schon merklich geprägt und ihre Lösungen werden auf andere Gebiete des Maschinenbaus übergreifen oder sie beeinflussen.

Der maschinenbauliche Entwickler tut gut daran, sich auch mit den neueren Lösungsfeldern auseinander zu setzen und ihre Möglichkeiten bei künftigen Lösungen zu nutzen. Dies ist nur in einer fachlich übergreifenden Teamarbeit (vgl. 4.3) möglich. Nach übereinstimmender Meinung der Fachleute wird aber eine solche Zusammenarbeit nur dann fruchtbar sein, wenn jedes Teammitglied auf seinem eigenen Feld fachlich voll kompetent ist und gleichzeitig soviel Kontaktwissen mitbringt, dass es die anderen Teammitglieder versteht und zweckmäßig mitwirken kann [46].

9.1 Schlussarten bei mechanischen Verbindungen

Principles of mechanical joints

Bauteile und Baugruppen werden zur Funktionserfüllung miteinander verbunden. Die Schlussart kennzeichnet die Art und die Eigenschaften solcher Verbindungen und bestimmt damit das grundsätzliche Verhalten. Ihr richti-

ger Einsatz entscheidet für den Erfolg einer Lösung auch im Zusammenhang mit elektrischen und elektronischen Komponenten. Es gibt Schlussarten in *fester* und solche in *beweglicher Lagezuordnung*.

Bei *beweglicher Lagezuordnung* handelt es sich um Gelenke mit unterschiedlichen Freiheitsgraden. Es gibt z. B. Drehgelenke auf einem Zapfen mit einem rotatorischen Freiheitsgrad um die Zapfenachse, Schubgelenke auf einem Vierkantprofil mit nur einem translatorischen Freiheitsgrad, Kugelgelenke in einer Kugelpfanne mit drei rotatorischen Freiheitsgraden u.s.w. (vgl. [11, G 162]). Roth hat für alle Gelenk-Möglichkeiten eine *logische Schluss-Matrix* aufgestellt, in der Bewegungsfreiheit und -sperre zwecks Suche oder/ und Überprüfung auch binär geeignet für den Rechnereinsatz beschrieben sind [51].

Nachfolgend werden die Schlussarten für eine im Wesentlichen *feste Lagezuordnung* gemäß den methodischen Gesichtspunkten Funktion – Wirkprinzip – Gestaltung dargelegt.

9.1.1 Funktionen und generelle Wirkungen

Functions and general effects

Funktionen (Abb. 9.1):

Verbindungen dienen zum Übertragen von Kräften, Momenten und Bewegungen zwischen Bauteilen bei eindeutiger und fester Lagezuordnung. Gegebenenfalls haben sie zusätzliche Aufgaben:

- Aufnehmen von Relativbewegungen außerhalb der Belastungsrichtung.
- Abdichten gegen Fluide.
- Isolieren oder Leiten von thermischer oder elektrischer Energie.

Wirkungen:

Die Wirkfläche und Gegenwirkfläche an der Fügestelle werden durch eine montagebedingte (vorspannungs- und/oder eigenspannungsbedingte) und/ oder betriebsbedingte Beanspruchung beaufschlagt.

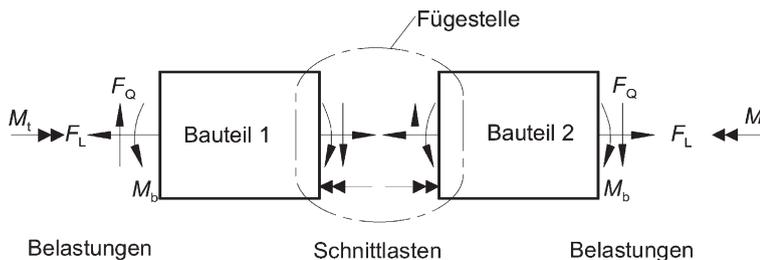


Abb. 9.1. Belastungen und aufzunehmende Schnittgrößen an der Fügestelle zweier Bauteile. F_L Längskraft, F_Q Querkraft, M_b Biegemoment, M_t Drehmoment

9.1.2 Stoffschluss

Material joint

Wirkprinzip (Abb. 9.2):

Der Schluss erfolgt durch stoffliches Vereinen der beteiligten Bauteilwerkstoffe oder durch Zusatzwerkstoffe über Molekular- und Adhäsionskräfte an der Wirkfläche der Fügestelle. Die Verbindung überträgt Längs- und Querkräfte sowie Biege- und Drehmomente.

Strukturelle Merkmale:

Form, Lage, Größe und Anzahl der Fügeflächen,
Beanspruchungen der Fügstellen nach Fertigung (Eigenspannung)
und unter Last,
beteiligte Bauteil-Werkstoffe und Zusatzwerkstoffe,
Fertigungs- und Betriebstemperaturen.

Prinzipielle Eigenschaften:

Positionstreu,
nicht lösbar,
bei Überlast Schädigung durch Bruch oder plastische Verformung.

Bauformen (Abb. 9.3):

Schweißverbindungen [9, 11, 44, 52, 53],
Lötverbindungen [10, 11, 72],
Klebeverbindungen [11, 26].



Abb. 9.2. Stoffschlussverbindung zweier Bauteile bei einachsiger Kraftbelastung. A Fügefläche, F_L Längskraft

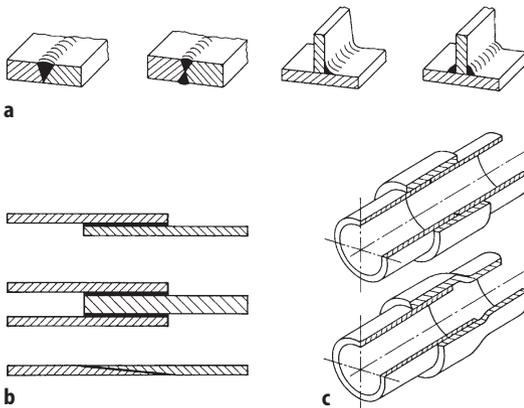


Abb. 9.3. Bauformen von Stoffschlussverbindungen (Auswahl). **a** Schweißverbindungen, **b** Klebeverbindungen, **c** Lötverbindungen

9.1.3 Formschluss

Form joint

Wirkprinzip (Abb. 9.4):

Der Schluss erfolgt durch Normalkräfte an ineinandergreifenden Wirkflächen von Elementen unter Aufnehmen von Flächenpressungen p und resultieren Beanspruchungen in den Fügezonen nach dem Hookeschen Gesetz.

Außerdem werden Zusatzfunktionen (Dichten, Isolieren, Leiten) an den Wirkflächenpaaren unter Flächenpressung erfüllt.

Strukturelle Merkmale:

Form, Lage, Anzahl und Größe der Wirkflächenpaare (Formschlusselemente),
Lasteinleitung in die Fügezone,

Lastaufteilung (Pressungsverteilung) auf Formschlusselemente,
Werkstoffpaarung beeinflusst bei unterschiedlichen Elastizitätsmoduli
die Lastverteilung,

hohe Steifigkeiten der Bauteile und Formschlusselemente,
Beanspruchung der Wirkflächenumgebung, oft mit Kerbwirkungen
verbunden,

Vorspannungsmöglichkeiten,
oftmals Toleranzausgleich nötig, um Doppelpassungseffekt zu begegnen,
Montage- und Demontagemöglichkeiten beachten,
Lockerungsmöglichkeit und daraus folgende Lockerungssicherung nötig.

Prinzipielle Eigenschaften:

Positionstreu,

lösbar,

bei Überlast Schädigung durch plastische Verformung oder Bruch.

Bauformen (Abb. 9.5):

Keil-, Bolzen-, Stift- und Nietverbindungen [11],

Welle-Nabe-Verbindungen [35],

Elemente zur Lagesicherung [11],

Schnapp-, Spann- und Klemmverbindungen [11].

Die hier mit aufgeführte Nietung in Abb. 9.5 a stellt keinen reinen Formschluss dar, sondern bildet durch das Schlagen des Niets gleichzeitig einen Reibkraftschluss zwischen den vernieteten Teilen. Wie hoch jeweils der Übertragungs-

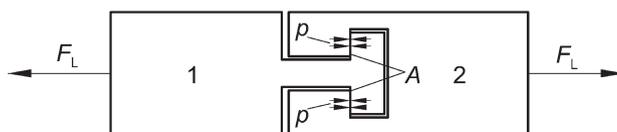


Abb. 9.4. Formschlussverbindung zweier Bauteile bei einachsiger Kraftbelastung. F_L Längskraft, A tragendes Wirkflächenpaar, p Flächenpressung

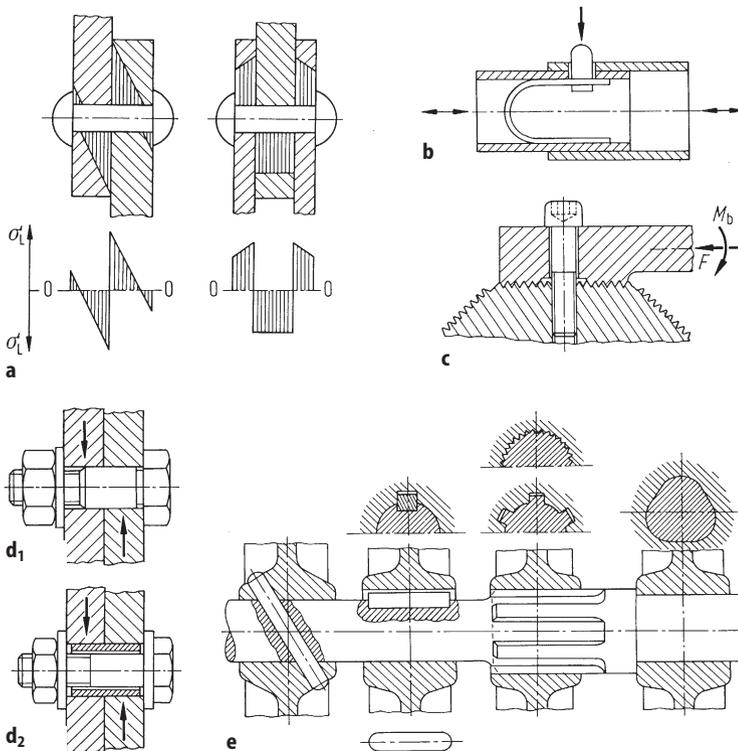


Abb. 9.5. Bauformen von Formschlussverbindungen (Auswahl). a Ein- und zweischnittige Nietung (Lösbarkeit nur erschwert möglich); b Schnappverbindung; c vorgespannte Kerbverzahnung; d₁ querbeanspruchte Schraubenverbindungen mit Passschraube; d₂ mit Scherbuchse; e Welle-Nabe-Formschlussverbindungen

anteil durch Formschluss und durch Reibkraftschluss ist, lässt sich wegen der Uneindeutigkeit der sich einstellenden Kraftflussverhältnisse nicht sagen. Dennoch war die Nietverbindung insbesondere wegen ihrer Nichtlösbarkeit ein vielfach verwendetes Verbindungselement im Stahlbau. Sie fand ihre Wiederverwendung bei Verbundbauweisen zwischen Metall und Kunststoff, um Klebverbindungen gegen den Abschleffeft bei Biegebeanspruchungen zu sichern.

9.1.4 Kraftschluss

Force joint

Wirkungen

Der Schluss erfolgt über die Wirkung von Kräften zwischen den Wirkflächen der zu verbindenden Teile. Entsprechend der physikalisch bedingten, unterschiedlichen Entstehung von Kräften gibt es verschiedene Kraftschlussarten.

1. Reibkraftschluss

Wirkprinzip (Abb. 9.6):

Der Schluss erfolgt durch Reibkräfte an den Wirkflächenpaaren durch Erzeugen von Normalkräften F_N und daraus entstehenden Reibungskräften F_R unter Ausnutzung des Coulombschen Reibungsgesetzes. $F \leq F_R = \mu_H F_N$. Die Übertragung von Kräften ist nur bis zur Höhe dieser Reibkräfte möglich.

Strukturelle Merkmale:

Reibungszahl der Haftreibung (Werkstoffpaarung) maßgebend,
Aufbringen der Normalkraft,
Flächenpressung an Wirkflächen beachten,
Anzahl der Wirkflächenpaare, für gleichmäßige Normalkraftverteilung sorgen,
Steifigkeiten der Bauteile und Vorspannelemente,
Relativverformungen der Verbindungsteile bei Montage und unter Last (Reibkorrosionszonen) (vgl. 7.4.1-3),
Montage- und Demontagemöglichkeiten (Lösbarkeit),
Lockerungsmöglichkeit und -sicherung.

Prinzipielle Eigenschaften:

Positionstreu, so lange $F_L \leq F_R = \mu_H F_N$,

lösbar,

bei Überlast, wenn $F_L \geq F_R = \mu_H F_N$, Relativverschiebung: Bei großer Flächenpressung dann Fressgefahr oder bei dauerndem Rutschen unzulässige Erwärmung.

Bauformen (Abb. 9.7):

Flansch- und Schraubenverbindungen [67, 70]. Welle-Nabe-Pressverbindungen ohne oder mit elastischen Zwischenelementen [35].

2. Feldkraftschluss

Wirkprinzip:

Nutzung von Feldkräften, wie Magnetkräfte in Magnetfeldern, Druckkräften in hydrostatischen oder aerostatischen Druckfeldern, Zähigkeitskräften in viskosen Medien.

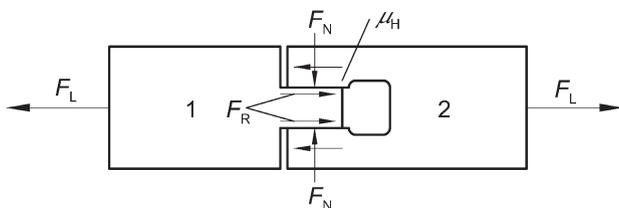


Abb. 9.6. Reibschlussverbindung zweier Bauteile bei einachsiger Kraftbelastung. F_L Längskraft, F_R Reibkraft, F_N Normalkraft, μ_H Haftreibungsbeiwert

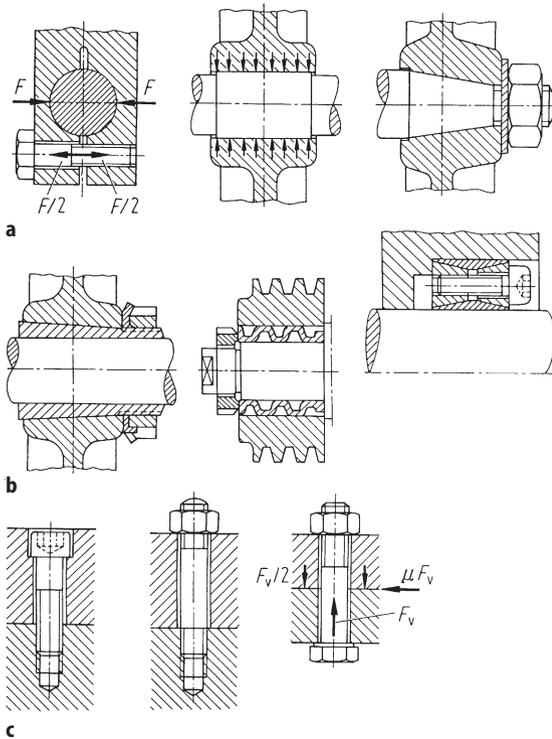


Abb. 9.7. Bauformen von reibschlussigen Verbindungen (Auswahl). **a** Welle-Nabe-Reibschlussverbindung ohne Zwischenelemente; **b** Welle-Nabe-Reibschlussverbindungen mit Zwischenelementen; **c** vorgespannte Schraubenverbindungen

Strukturelle Merkmale:

Aufbau eines Kraftfeldes nötig,
 Fremdenergie oder viskoses Medium bereitstellen,
 Abschirmungs- oder Dichtungsprobleme beachten.

Prinzipielle Eigenschaften:

Kraft-Weg-Abhängigkeit, oft steifes Verhalten,
 lösbar,
 bei Überlast Verschiebung bis zum Anschlag, meistens dann Formschluss unter
 Verzicht auf ursprüngliche Funktionsfähigkeit.

Bauformen:

Hydrostatische oder aerostatische Lagerung, hydrostatische Kupplungen,
 Magnetlager, Magnetverschlüsse.

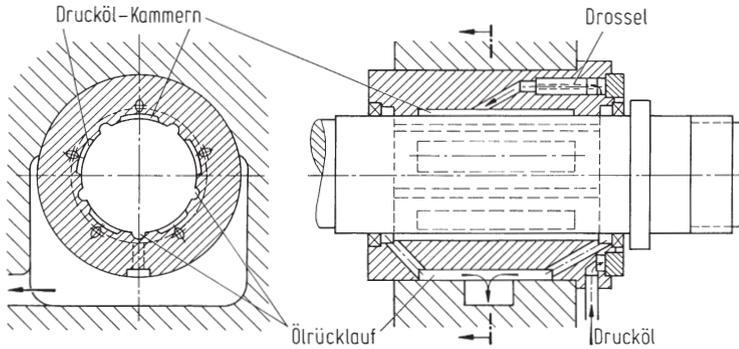


Abb. 9.8. Bauform eines hydrostatischen Lagers

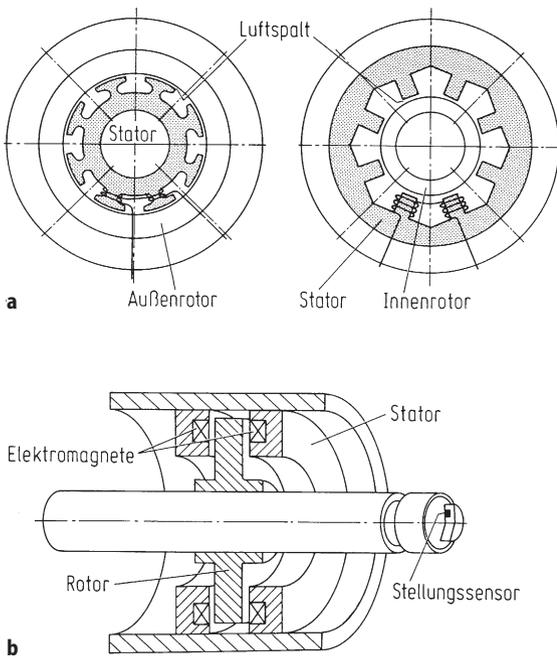


Abb. 9.9. Bauformen von Magnetlagern [1]. a Radiallager; b Axiallager

3. Elastischer Kraftschluss

Wirkprinzip:

Die elastischen Elemente bilden beim Verformen Kraftspeicher. Die Kräfte von zwischengeschalteten elastischen Elementen bestimmen Lage und dynamisches Verhalten der angeschlossenen Bauteile.

Strukturelle Merkmale:

Zwischenschaltung von federnden Elementen,
Auslegung der Federelemente innerhalb ihres elastischen Bereichs,
beim Verformen Bilden von Kraftspeichern mit mehr oder weniger ausgeprägter Hysterese (Metallische Federn haben sehr geringe, gummielastische Federn hohe innere Verlustarbeit),
Dauerhaltbarkeit beachten,
Kombination mit Dämpfungselementen möglich.

Prinzipielle Eigenschaften:

Kraft-Weg-Abhängigkeit,
Speichereigenschaft durch Rückgewinn von Verformungsarbeit,
Schwingungsanfälligkeit, aber auch mit Dämpfungsmöglichkeit, lösbar,
bei Überlast Verschiebung bis zum Anschlag, meistens dann Formschluss oder Blocksetzen unter Verlust elastischer Eigenschaften.

Bauformen:

Nachgiebige Federelemente in Kupplungen und Lagern (vgl. Abb. 7.144), elastische Abstützungen (vgl. Abb. 7.27), elastische Zwischenglieder zur Stoßdämpfung [14, 23, 24].

9.1.5 Anwendungsrichtlinien

Practical guidelines, applications

Stoffschlussverbindungen vorzugsweise zum

- Aufnehmen mehrachsiger, auch dynamischer Belastungen,
- Sichern einer Position,
- kostengünstigen, festen Verbinden von Einzelstücken gleicher Werkstoffgruppe,
- guten Reparieren durch Schweißen, Löten und Kleben,
- Dichten der Fügstellen,
- Verwenden von genormten Bauteilen und Halbzeugen.

Formschlussverbindungen vorzugsweise zum

- häufigen und leichten Lösen,
- eindeutigen Positionieren der Bauteile,
- Aufnehmen von relativ großen Kräften,
- Verbinden von Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen.

Reibkraftschlussverbindungen vorzugsweise zum

- einfachen und kostengünstigen Verbinden auch von Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen,
- Aufnehmen von Überlastungen durch Rutschen,

- Einstellen der Bauteile zueinander,
- leichten Lösen von Bauteilen.

Feldkraftschlussverbindungen vorzugsweise zum

- Verbinden ohne Festkörperkontakt,
- Verringern der Reibungsverluste,
- Steuern der Mikrolage im Raum,
- Beeinflussen dynamischen Verhaltens.

Elastische Kraftschlussverbindungen vorzugsweise zum

- Nutzen als Kraftspeicher,
- Aufnehmen von Stoßbelastungen,
- Beeinflussen des dynamischen Verhaltens einschließlich der Kopplung mit Dämpfungsgliedern
- Ausgleichen von Relativbewegungen,
- Ausgleichen von Toleranz- und Längenunterschieden.