

## STÖREFFEKTE KONSTRUKTIV BEHERRSCHEN

*Norman L. Firchau, Hans-Joachim Franke*

### Kurzfassung:

Die Konstruktionsmethodik beschäftigt sich hauptsächlich damit, wie gewünschte Funktionen realisiert werden. Praktisch oft ebenso wichtig ist jedoch die Frage, wie unerwünschte Effekte vermieden, gemildert oder doch wenigstens sicher ertragen werden können. Der Beitrag zeigt Ansätze zu einer Systematik störungsbeherrschender Maßnahmen auf und erläutert diese mit Beispielen.

Engineering design principally takes into account how desired functions are implemented. Practically important as well is the question, how undesirable effects can be avoided, moderated or at least endured securely. This article presents systematics for measures to master disturbances and shows respective examples.

### 1 Problemstellung

Der Konstruktionsprozeß ist durch kreative und korrektive Arbeitsschritte gekennzeichnet. Bewertungsmethoden sowie Versuche und Berechnungen helfen, Schwachstellen zu erkennen und zu beseitigen. Dennoch können dem Konstrukteur Fehler unterlaufen, oder sein Erkenntnisstand reicht nicht aus, um fehlerverursachende Zusammenhänge zu erkennen bzw. zu beherrschen [1]. Ein Beispiel aus den Anfängen des Industriezeitalters zeigt Bild 1.

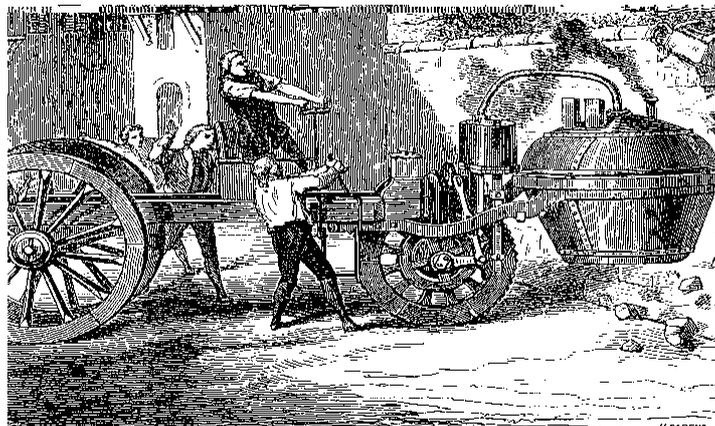


Bild 1. Cugnotscher Dampfwagen, erste Probefahrt 1769. Störeffekt: hohe Vorderachsbelastung behindert Lenkbarkeit.

Oft sind Fehler darauf zurückzuführen, daß Störeffekte nicht oder nicht hinreichend berücksichtigt wurden. Störeffekte können direkt aus dem zu Grunde gelegten Wirkungsprinzip, z.B. Achsschub einer Strömungsmaschine, stammen. Andere Quellen können Umgebungseinflüsse sein, z.B. Korrosion in feuchter Atmosphäre, oder Herstellung und Montage, z.B. Maßabweichungen bzw. unzureichend angezogene Verschraubungen. Bestimmte Störeffekte, etwa der genannte Achsschub einer Strömungsmaschine, gehören i.a. zum üblichen Erkenntnisstand von Konstrukteuren und sind Gegenstand standardmäßiger Lösungsansätze

und entsprechender Auslegungsmethoden. Sie werden daher gar nicht mehr als „Störeffekte“ wahrgenommen.

Fehlerwirksam werden jedoch auch solche an sich bekannten Störeffekte, wenn entweder in einer bestimmten Maschinengattung ungeübte Konstrukteure mit den gleichen Wirkeffekten konstruieren oder wenn Leistungssteigerung oder Miniaturisierung zu deutlich veränderten physikalischen Parametern führen. Ein den Autoren bekanntes Beispiel für den erstgenannten Fall waren z.B. Wasserpumpenschäden in der Automobilindustrie der 70er Jahre, die auf der Unkenntnis der Auswirkungen von Kavitationseffekten auf Gleitringdichtungen beruhten. Ein Beispiel für den zweiten Fall waren etwa Läuferinstabilitäten durch sogenannte Z-Spalte, die infolge von Drehzahl- und Leistungssteigerung bei Kesselspeisepumpen in den 60er Jahren auftraten und z.T. zu schweren Schäden führten. Die damaligen Kreiselpumpenkonstrukteure kannten die bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten stark anwachsende selbsterregende Wirkung dieser Spaltform nicht.

Neben solchen „an sich bekannten“ Störeffekten gibt es, insbesondere bei echten inventiven Neukonstruktionen, natürlich auch immer wieder zunächst unbekannte oder unerwartete Störeffekte. Beispielsweise mußten mit der Zunahme elektronischer Baugruppen in Maschinen und Fahrzeugen nach anfänglichen zunächst unbekanntem Problemen immer mehr „EMV“- Gesichtspunkte (Elektromagnetische Verträglichkeit) berücksichtigt werden. Da heute die unseren Produkten zu Grunde liegende Physik und die angewendeten Herstellungstechnologien weitgehend bekannt sind, können jedoch selbst bisher unbekannte Störeffekte in gewissem Umfang systematisch erkannt und beherrscht werden.

Eine Reihe von Methoden, z.B. FMEA oder Fehlerbaumanalysen [2, 3], nehmen sich auch dieser Problematik an. Wie die Namen schon sagen, werden vorzugsweise analytische Verfahren angeboten. Im Fall der FMEA sind sie zudem im Schwerpunkt rein intuitiv strukturiert und eignen sich nur begrenzt, genau genommen nur „case based“, für eine strukturierte Wissenssammlung. Der folgende Beitrag soll dagegen - nicht nur, aber vorzugsweise - synthetisch orientierte und systematische Hilfsmittel bereitstellen.

## 1.1 Begriff der Störeffekte

Das folgende Bild 2 skizziert den Begriff des „Störeffekts“ schematisch [4].

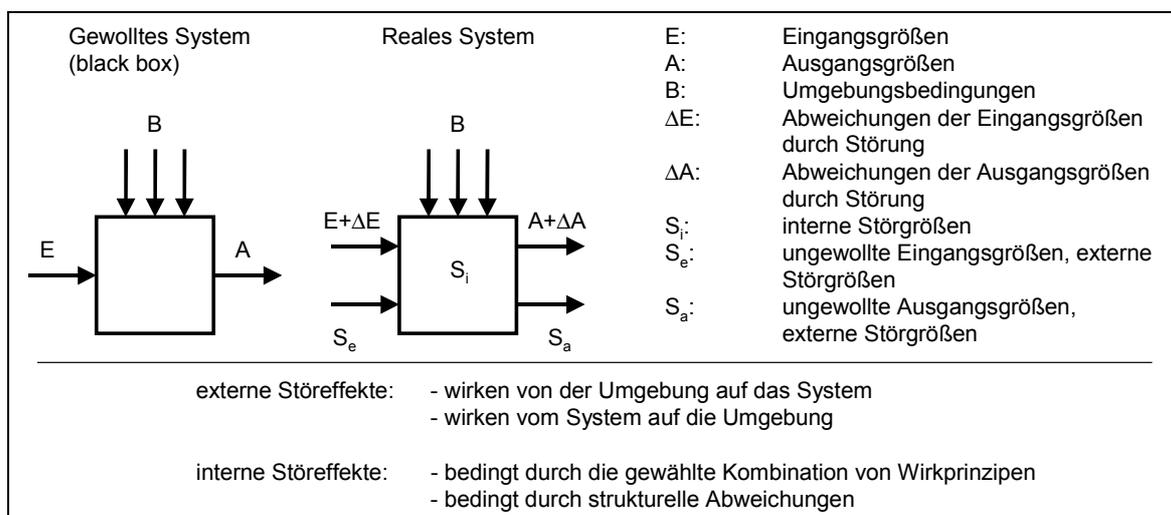


Bild 2. Systemgrößen

Der hierdurch beschriebene Begriff ist weiter, als ihn der erfahrene Konstrukteur einer bestimmten Maschinengattung, vergl. oben, verstehen würde. Da dieser Begriff jedoch hochgradig von der Erfahrung der jeweiligen Konstrukteure abhängt, kann man ihn nicht scharf abgrenzen. Er stellt gewissermaßen die Durchschnittsmenge der Störeffektbegriffe verschiedener Konstrukteure dar. Verbal kann man das folgendermaßen formulieren:

**Störeffekt eines technischen Systems ist jeder Effekt, der Abweichungen der gewollten Eingangs-Ausgangsbeziehung oder ungewollte strukturelle Änderungen des Systems bewirkt.**

## 1.2 Abgrenzung der Begriffe „Fehler“ / „Störeffekt“ / „Schaden“

In Bild 3 ist die Ursache-Wirkungs-Kette der Störeffekte dargestellt.

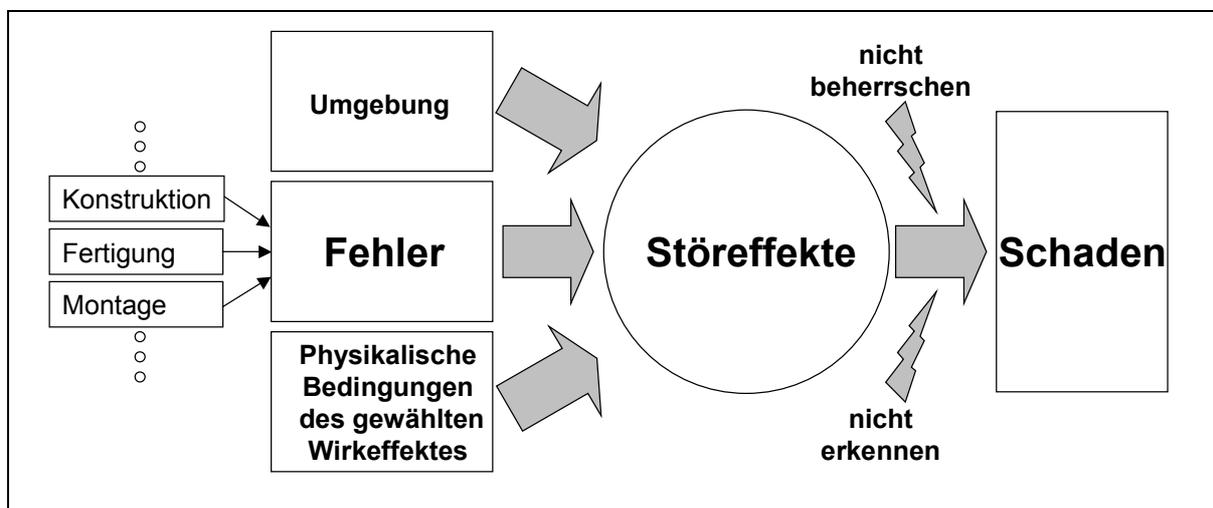


Bild 3. Ursachen und Wirkungen von Störeffekten

## 2 Systematik der Störungsbeherrschung

Zur Störungsbeherrschung sind in der Konstruktionsmethodik eine Vielzahl von spezifischen Strategien und Maßnahmen bekannt. Ein theoretischer Ansatz für eine Systematik soll helfen, Vollständigkeit und Allgemeingültigkeit der Strategien zu gewährleisten.

### 2.1 Theoretischer Ansatz auf der Basis eines „analogen Automaten“

Der Vektor der Ausgangsgrößen  $A$  ist eine Funktion des Systemzustands  $Z$  und des Eingangsvektors  $E$ . Die Umgebungsbedingungen, vergl. Bild 2, werden in dieser Betrachtung als in Eingangsgrößen überführbar angenommen.

$$A = f(Z, E) \quad (1)$$

$$\text{mit } A = \begin{pmatrix} A_e \\ A_u \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} E_e \\ E_u \end{pmatrix},$$

$A_e$ ...erwünschte (gewollte) Ausgangsgrößen,  
 $A_u$ ...unerwünschte Ausgangsgrößen,  
 $E_e$ ...erwünschte (gewollte) Eingangsgrößen und  
 $E_u$ ...unerwünschte Eingangsgrößen.

Der Systemzustand  $Z$  ist einerseits eine Funktion der strukturellen Zustandsgrößen  $K$ , wie Topologie des Teileverbandes, Geometrie der Teile (z.B. Form, Abmessungen), Werkstoff (Art, Behandlung, Zuordnung zu Teilen) usw.

Andererseits ist  $Z$  auch abhängig von den funktionalen Zustandsgrößen  $q$ , wie z.B. Lagen und Geschwindigkeiten bewegter Körper, Mediengeschwindigkeiten, Verformungen, Temperaturen, Drücke, elektrische Spannungen usw. Weiter hängt er von den Eingangsgrößen ab, z.B. führt Überlastung zum Versagen.

$$Z = g(K, q, E) \quad (2)$$

Aus (1) und (2) folgt:

$$A = \varphi(K, q, E) \quad (3)$$

Bildet man aus (3) formal das totale Differential, ergibt sich:

$$dA = \frac{d\varphi}{dK} dK + \frac{d\varphi}{dq} dq + \frac{d\varphi}{dE} dE \quad (4)$$

Oder vereinfacht ausgedrückt:

$$dA = \frac{d\varphi}{dx_i} dx_i \quad (5)$$

Wenn der Ausgangsvektor  $A$  nur funktional gewollte Werte annehmen soll (das bedeutet eine „im Sinne der Funktionalität stationäre“ Übertragungsfunktion  $A = \bar{u}(E)$ ), muß gelten:

$$dA \rightarrow 0 \quad (6)$$

Ein ebensolcher Zusammenhang läßt sich formal für  $dZ$  formulieren, da die Struktur ebenfalls invariant sein muß (mindestens näherungsweise für die geplante Lebensdauer). Anstelle der  $d\varphi/dx_i$  treten lediglich die  $dg/dx_i$ . Die folgende Tabelle hätte daher streng genommen um die  $dZ$ -bezüglichen Ausdrücke ergänzt werden müssen. Darauf wurde der Übersichtlichkeit wegen verzichtet, da sich daraus ohnehin keine zusätzlichen Erkenntnisse ableiten lassen. Es bleibt lediglich festzuhalten, daß die folgenden Erkenntnisse auch für das Vermeiden unerwünschter struktureller Veränderungen gelten. Mit den abgeleiteten Beziehungen läßt sich ganz schematisch ein Satz grundlegender Basisstrategien definieren, der im Rahmen dieser formalen Betrachtung vollständig ist.

Strategie		Anschauliche Beschreibung
0. „sperren“ („triviale“ Strategie)	$dA \rightarrow 0$	Unerwünschte Ausgangsgröße sperren (nicht weiterleiten, an Ausbreitung hindern): „isoliertes System“
1. „robust“	$\frac{d\varphi}{dx_i} \rightarrow 0$	Hinsichtlich des betrachteten Parameters unempfindliche Übertragungsfunktion: „robustes System“
2. „exakt“	$dx_i \rightarrow 0$	Unerwünschte Eingangs- / Zustandsgrößen sperren : „fehlerfreies (exaktes) System“
3. „kompensieren“	$\frac{d\varphi}{dx_i} dx_i + \frac{d\varphi}{dx_j} dx_j \rightarrow 0$	Eingangs- / Zustandsgrößenänderungen gleichen sich in ihrer Summe aus: „kompensatorisches System“

## 2.2 Erfahrungsbasierter Ansatz

Die aufgezeigten vier theoretischen Strategietypen sind alle auch in der Konstruktionspraxis, aber unter bisher oft nicht klar abgegrenzten Begriffen und ohne eindeutige Gliederung bekannt.

- Sperren, dämmen, isolieren, reduzieren, filtern, kapseln, entkoppeln (jeweils auf der Ausgangsseite und der Eingangsseite möglich)

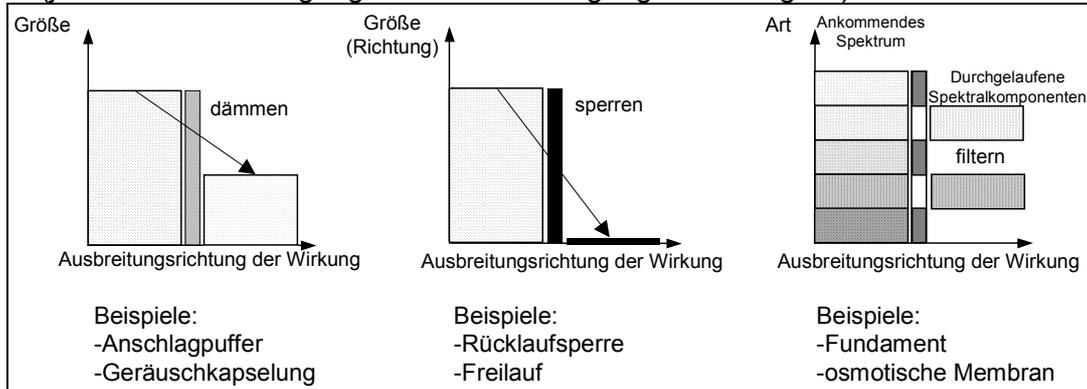


Bild 4. Ausprägungen des Sperrens

- Robuste Prinzipie

Funktionsgrößen weitgehend unabhängig von Störgrößen (Invarianz).

- Niedrige Verstärkungen, bzw. Empfindlichkeiten: z.B. Dehnschrauben:  $F_s = f(F_b)$ ,  $dF_s/dF_b$  ist klein

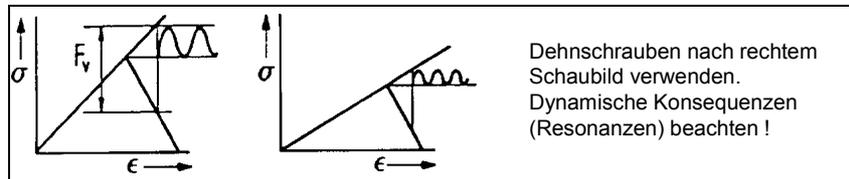


Bild 5. Kraftänderung vermindern

- Degressive Übertragungsfunktionen: z.B. degressives Reibsystem

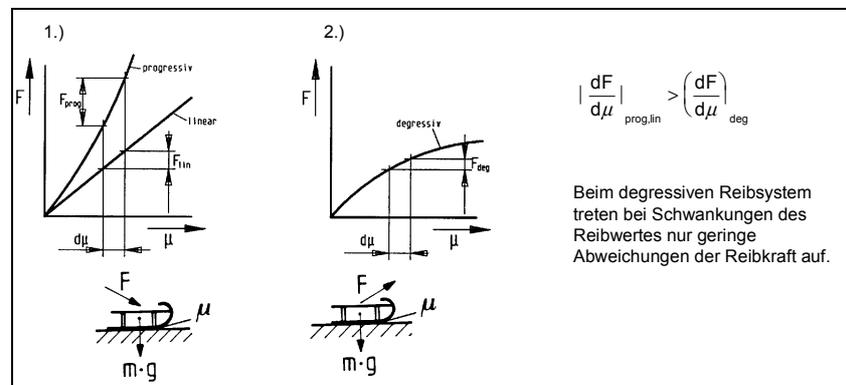


Bild 6. Reibkraftänderung vermindern

- Genau, sorgfältig, fehlerminimiert
- Kompensieren, ausgleichen
  - Funktionssymmetrie (z.B. Kraftausgleich durch spezielle Funktionselemente)
  - Gestaltsymmetrie (z.B. Kraftausgleich durch symmetrische Baugruppen)
  - kompensatorische Mehrfachanordnungen (z.B. Anti-Noise-Vorrichtungen)

Ein triviales Beispiel für „robuste Konstruktionen“, das in der Praxis häufig umgesetzt wird, richtet sich nach dem Prinzip

- Ertragen von Störbeanspruchungen (z.B. tragende Abmessungen vergrößern, „konservative Auslegung“, hochkorrosionsfester Werkstoff, usw.).

Solche Lösungen werden jedoch meist zu groß, zu schwer, zu teuer usw. und können bei sonst vergleichbaren Kosten auf dem Markt nicht mehr konkurrieren. Dem technischen Risiko steht das wirtschaftliche entgegen [1].

Neben den aufgeführten Strategien kann man in gewissem Sinne auch **Analyseschritte in den frühen Konstruktionsphasen** als „synthesewirksam“ betrachten.

### 2.2.1 Analysieren der Produktumgebung (unter besonderer Berücksichtigung von Störeffekten)

ggf. mit problemspezifischen Checklisten

- Welche Störeffekte sind aus der Umgebung zu erwarten ?  
z.B. Schmutz, biolog. Schädlinge, korrosive oder erosive Medien und Atmosphären  
Fehlbedienung, Störsignale,  
Schwingungen, seismische Lasten, Windlasten, "Emergency"-Lastfälle,  
Extremtemperaturen, Temperaturwechsel, ...
- Welche funktionsüblichen Störeffekte auf Nachbarsysteme könnten kritisch sein ?  
z.B. Emissionen, Leckagen, Geräusche, Schwingungen, ...

In diesem Stadium erkannte Störeffekte können unmittelbar dazu beitragen, geeignete prinzipielle Lösungen zu finden, entweder als Kriterien zur Auswahl geeigneter Effekte, oder mit Hilfe der oben erläuterten Strategien zum Auffinden zusätzlicher Funktionsstrukturen, z.B. zum Kompensieren oder Filtern.

### 2.2.2 Analyse der gewählten prinzipiellen Lösungen

Für das Beispiel einer mehrstufigen Heißwasser-Kreiselpumpe:

- Welche Nebenwirkungen haben die gewählten funktionserzeugenden Effekte und Prinzipie unmittelbar / mittelbar ?  
z.B. Achsschub, Radialschub, Spalteeffekte, Druckpulsationen, Erosion,  
Kavitation (Zusammenbrechen von Dampfblasen unter erhöhtem Druck),  
Wellendurchbiegung, Dichtungsleckagen, kritische Drehzahlen, ...

- Welche Effekte sind zusätzlich wahrscheinlich oder zumindest möglich  
z.B. Wärmedehnungsdifferenzen, Biegeschwingungen, Läuferverschleiß durch Wellendurchbiegung beim An- und Abfahren, Fressen beim Anstreifen des Läufers, Wärmeleitung in den Lager- und Dichtungsbereich, ...

### 2.2.3 Ansätze für Maßnahmen zur Beherrschung der Störeffekte

1. Klären der Einfluß nehmenden Parameter  
z.B. für die Heißwasserpumpe: *Freißgefahr in Spalten*: Spaltspiel, Spaltwerkstoffe, Oberflächenstruktur der Spalte
2. Festlegen störungsoptimierender Parameter  
z.B. für die Heißwasserpumpe: Martensitische Spaltwerkstoffe wegen Erosion, kleine Spaltspiele wegen Wirkungsgrad → hohe Freißgefahr, Abhilfe durch rillierte Spalte

## 3 Standardmethoden

### 3.1 Bewährte Methoden

Folgende bewährten Vorgehensweisen und Hilfsmittel werden oder können zur Störungsbeherrschung genutzt werden [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]:

Hilfsmittel	Erläuterung
"Konservative" Auslegung	Große Sicherheiten vorsehen
Fehlerbaumanalyse	Fehlerverhalten und Störgrößeneinfluß
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflußanalyse
Fehlerfortpflanzung	Wirkungen der Einzelfehler auf die Zielparameter quantitativ abschätzen und optimieren
Toleranzrechnung	Sonderfall der Fehlerfortpflanzung
"Fail save"-Strategien	Bei Versagen einer Komponente geht das System in einen ungefährlichen Zustand zurück
Redundante Konstruktionen	Erhöhte Systemzuverlässigkeit
Schwachstellenanalyse	Konzept oder Entwurf untersuchen und Verbesserungen finden
Beziehungssysteme	Parameterkopplung u. Zielkonflikte erkennen
Systematische Schadensanalyse	Aus Fehlern lernen
m.E. QFD	Insbesondere Parameterkopplung
Organisator. Überwachungsstrategien	Wiederholungsprüfungen
Automatische Überwachungsstrategien	Nichteinschalten oder Abschalten im Störfall
Klassische Qualitätsplanung	Prävention: „Mach's gleich richtig“
:	:

### 3.2 Betriebserfahrung

Trotz des Nutzens geeigneter Methoden bleibt für die Beherrschung von Störeffekten produkt-spezifisches Konstruktionswissen entscheidend wichtig. Im Wissen zur Beherrschung von Störeffekten liegt auch immenses Innovationspotential. Grenzen können damit neu gesteckt werden (z.B. Überschreiten der Schallmauer in Flugzeugen oder Strömungsmaschinen, Realisierung überkritisch laufender rotierender Maschinen).

## 4 Beispiele

Die folgende Beispiele sollen die Beherrschbarkeit von Störeffekten durch die in Kapitel 2 diskutierten Strategien veranschaulichen und können auch als Sammlung von Lösungsideen dienen. Diese Sammlung ist jedoch nur als beispielhafte Assoziationsliste und keinesfalls als „vollständiger“ Katalog zu verstehen.

### 4.1 Entkoppeln (Strategie „sperrn“)

Abkoppeln störender Nebenwirkungen vom übrigen System: z.B.:

- optoelektronische Koppler zum Vermeiden galvanischer Verbindungen
- Magnetkupplungen fluidischer Maschinen (ermöglicht Leckagefreiheit)
- Ausgleichkupplungen (z.B. gegen Fluchtungsfehler)
- Elastische Kupplungen (z.B. zum Abmildern von Drehstößen)
- Entkopplung der Kühlkreisläufe bei Kraftwerken (radioaktiver Kreislauf - Zwischenkreislauf – radioaktiv entkoppelter konventioneller Kreislauf)
- mechanische Entkopplung von Störkräften (elastisch oder kinematisch: Kompensatoren, "Turbinenpassungen")
- kinematische Entkopplung durch orthogonale Bewegungen z.B. von Riegelhaltekraft und Türöffnungskraft im Türschloß
- Rückwirkung verhindern durch Totlagen (z.B. Schließkraft in Spritzgußmaschinen)

### 4.2 Störungstolerante Lösungsprinzipie (Strategie „robust“)

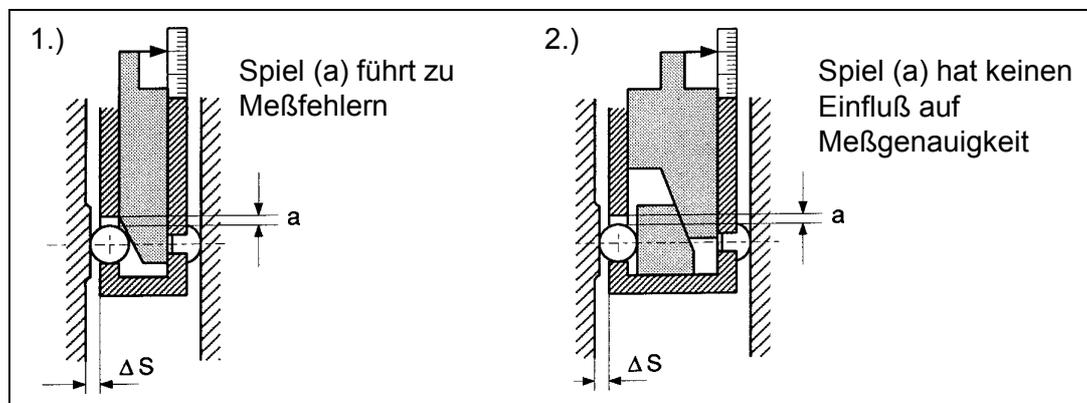


Bild 7. Meßeinrichtung

Anderes Beispiel: Abbe'sches Prinzip (statt Fehler 1.Ordnung → Fehler 2.Ordnung)

### 4.3 Qualitätsgesicherte Entwicklung und Präzisionsfertigung, z.B. optischer Instrumente oder Werkzeugmaschinen (Strategie „exakt“)

- Verwenden zeugnisgesicherter Werkstoffe für sicherheitsrelevante Bauteile
- Detaillierte Vorausberechnung und Erprobung der Funktion
- Definition enger Toleranzen und deren Überwachung und Auswahl (Nicht nur geometrische Toleranzen!)
- Hohe Oberflächengüten (geometrisch, mechanisch, korrosionschemisch)

#### 4.4 Abweichungen ausgleichen (Strategie „kompensieren“)

##### 4.4.1 Einstellen

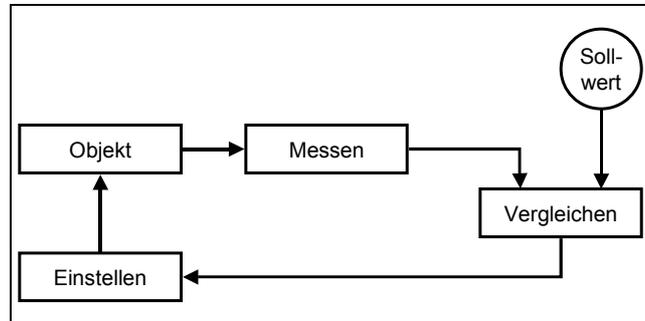


Bild 8. Anpassung erst im Funktionsfall

##### 4.4.2 Justieren

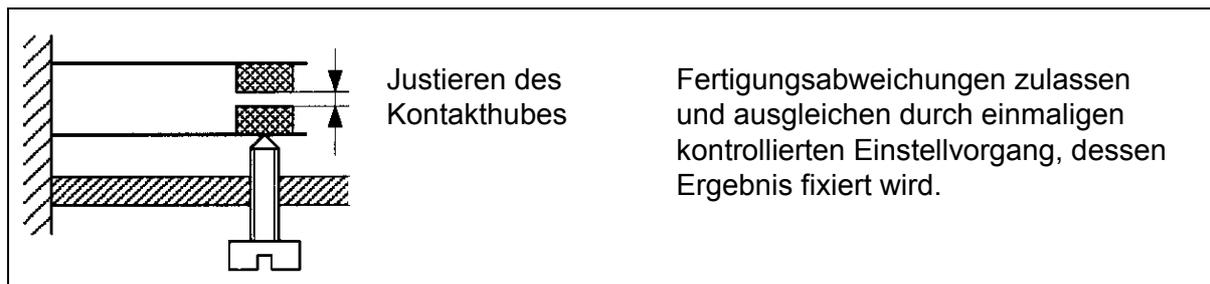


Bild 9. Ausgleichen durch einmaliges Einstellen

##### 4.4.3 Paaren

passende Funktionspartner auswählen, z.B.:

- Bauteile von Rennmotoren
- „Halbtoleranzmaschinen“

##### 4.4.4 Auswuchten

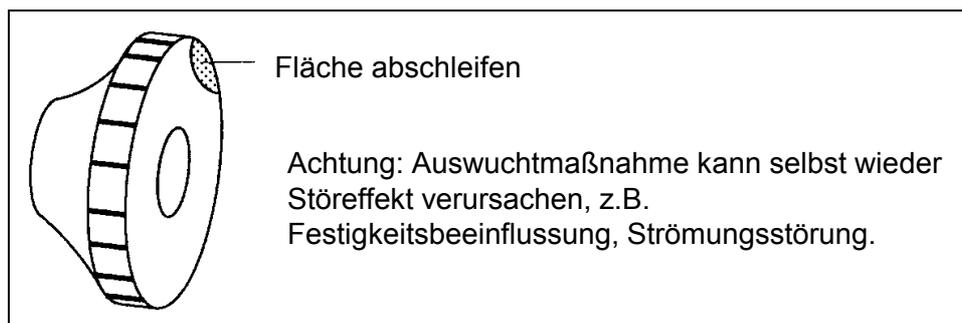


Bild 10. Auswuchten nicht durch Bohren, sondern durch Schleifen

#### 4.4.5 Anpassen

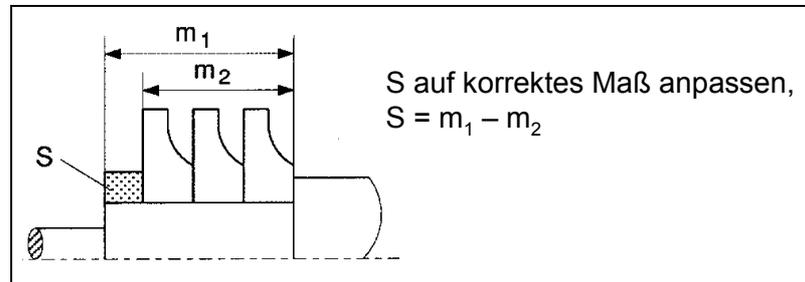


Bild 11. Ablängen (oder geeignete Unterlegscheiben)

Anderes Beispiel: Kopfrücknahme bei Hochleistungszahnrädern

## 5 Zusammenfassung

Ein oft in seiner Relevanz unterschätzter Aspekt von Konstruktionsprozessen ist die frühzeitige Berücksichtigung von Störeffekten. In diesem Beitrag wird eine Systematik für die konstruktive Beherrschung von Störeffekten aufgezeigt. Ein theoretischer und ein erfahrungsbaubarer Ansatz werden durch anschauliche Beispiele erläutert.

## 6 Literatur

- [1] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre. 4. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1997
- [2] Franke, H.-J.; Pfeifer, T.: Qualitätsinformationssysteme - Aufbau und Einsatz im betrieblichen Umfeld. München: Hanser, 1998
- [3] Richtlinie VDI 2247 (Entwurf): Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung. VDI-Gesellschaft Entwicklung - Konstruktion - Vertrieb (EKV), 1994
- [4] Franke, H.-J.: Konstruktionslehre I. Umdruck zur Vorlesung. TU Braunschweig, 2000
- [5] Franke, H.-J.: Konstruktionsmethodik und Konstruktionspraxis - eine kritische Betrachtung. International Conference on Engineering Design. Hamburg, 1985
- [6] Franke, H.-J.; Germer, C.; Haupt, U.: Funktionsorientierte Toleranzsynthese allgemein betrachtet. ZWF 95 Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 5/2000
- [7] Böwer, G.: Untersuchung der konzeptionellen Erweiterungsmöglichkeiten von CAD-Systemen am Beispiel der rechnergestützten Bemaßungsanalyse und Toleranzberechnung. Diss. TU Braunschweig, 1993
- [8] Rodenacker, W.G.: Methodisches Konstruieren. 4. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1991

Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Franke,  
 Dipl.-Ing. Norman L. Firchau;

Institut für Konstruktionslehre, Maschinen- und Feinwerkelemente  
 der Technischen Universität Braunschweig

Tel: 0531 / 391 - 3343

Fax: 0531 / 391 - 4572

Internet: [normanf@ikmfbs.ing.tu-bs.de](mailto:normanf@ikmfbs.ing.tu-bs.de)  
[www.ikmfbs.ing.tu-bs.de](http://www.ikmfbs.ing.tu-bs.de)