

NOTWENDIGKEIT DER MODELLBILDUNG UND SIMULATION BEI DER DIMENSIONIERUNG MECHANISCHER KONSTRUKTIONEN

Der Artikel stellt das Problem der Dimensionierungsverfahren in der Maschinenbau vor, das sich auf die Bestimmung der Beanspruchungen und der Merkmalen von Konstruktionen, auf die Bestimmung der - für die Dimensionierung gegen Ermüdung unbedingt notwendigen - Belastungsamplituden erstreckt. Der Aufsatz beleuchtet die Tatsache, dass man ohne dynamischen Untersuchungen (Simulation) sogar bei den genauesten Modellen unbrauchbare Konstruktionen entwerfen kann, was sich nur beim Probelauf der aufgebauten, funktionierenden Anlage herausstellt.

1. EINFÜHRUNG

Bei der Dimensionierung der Maschinenkonstruktionen, bzw. -elementen ist die wichtigste Anforderung, dass das gegebene Einzelteil eine bestimmte Zeit lang ohne Ausfall funktionieren soll.

Die Konstruktion ist betriebssicher, wenn der Sicherheitsfaktor folgende Bedingung erfüllt:

$$n = \frac{H_{(t)}}{T_{(t)}} \geq 1 \quad (1)$$

wohei:

$H_{(t)}$ Belastungsgrenze

$T_{(t)}$ Belastung

Das Problem besteht darin, dass im allgemeinen die Belastungsgrenze, die Belastung und dadurch der Sicherheitsfaktor eine Funktion der Zeit ist.

Die oben angegebene Bedingung kann bei zeitlich konstanten Belastungen mit grösster Sicherheit erfüllt werden.

2. DIMENSIONIERUNG BEI ZEITLICH KONSTANTER BELASTUNG

Die Tragfähigkeit der statisch belasteten Konstruktionen ist die Deformationsgrenze, die in Form von Spannung angegeben wird:

$$n = \frac{H_n}{T_n} = \frac{\delta R_{eff}}{\alpha \sigma_{ideals}} \quad (2)$$

wobei

δ : Fließgrenze-Verhältnis

α : Formfaktor

σ_{ideals} : die entstehende Spannung im Umfang ohne Einkerbung

Diesen Zusammenhang kann man gut gebrauchen - also die Belastung kann als statisch angenommen werden - bis zur 10^4 Belastungszyklen. In diesem Fall kann die Belastung mit großer Genauigkeit bestimmt werden, die Werte des experimentell bestimmten Formfaktors sind in Nomogramms angegeben. Das Konstruktionsmerkmal ist eine Funktion zum Teil des Materialmerkmals, zum Teil des Fließgrenze-Verhältnisses, das bei bekanntem Formfaktor bestimmbar ist.

Bei komplexer Belastung ist die Kenntnis des mehrachsigen Spannungszustands zur direkten Dimensionierung nicht geeignet. Es muß deshalb ein einachsiger Spannungszustand /äquivalente Spannung/ bestimmt werden, der in seiner Wirkung der tatsächlich auftretenden Spannung entspricht (Theorie von Mohr, H.M.H.). In diesem Fall sollen das Fließgrenze-Verhältnis und der Formfaktor entsprechend der komplexen Belastung bestimmt werden.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß die Genauigkeit der Dimensionierung statisch belasteter Konstruktionen durch die in der Werkstoffkunde definierte Materialeigenschaften und durch die Genauigkeit der aus der Mechanik bekannten Spannungsgleichungen bestimmt wird.

3. ZU KLÄRENDE FRAGEN BEI ZEITLICH KONSTANTEN BELASTUNGEN

Die Mehrheit der Konstruktionen ist einer zeitlich sich verändernden Belastung ausgesetzt. Das erste Problem besteht in der Klärung der Frage, was die zeitliche

Veränderung der Belastungen verursacht, und in welchem Maße. Am häufigsten treten folgende Situationen auf:

- instabile Drehmomentversorgung bzw. -bedarf /Betriebeigenschaft des Antriebs- und der angetriebenen Maschine/
- dynamische Eigenschaften der Elementen der Antriebskette
- Art des technologischen Prozesses
- häufiger Anlauf, ... usw.

Die aufgezählten Ursachen treten in federgelagerten, schwingungsfähigen Systemen als anregende Wirkungen auf. Voraussetzung der Genauigkeit der Dimensionierung ist, daß die

zeitlich verändernde Belastung mit der nötigen Genauigkeit bekannt ist.

Methoden für die Bestimmung der Belastung:

- mit Messung: die genaueste Methode, nur im Besitz von Meßgeräten und Meßmethoden durchführbar, nur an fertigen Objekten anwendbar, für eine Vorkonstruktion ist also ungeeignet
- mit Schätzung: mit Verwendung der Erfahrungen von anderer, funktionierender Maschinen ähnlicher Parameter
- ausgehend aus dem statischen Betriebsfall /aus der Nennleistung/ ein Modell mit zeitlich verändernden Belastung aufzubauen
- mit Berechnung: die Belastungen werden mit Hilfe dynamischer Modellen bestimmt, wobei die äußeren Belastungen und sonstigen Parameter die Eingangsdaten sind. Diese Berechnungen sind so zeitaufwendig und kompliziert, daß nur in Form von Rechnerprogrammen anwendbar sind.

Heute beinhalten viele Konstruktionssysteme ein dynamisches Modellierungsprogramm, das für den Anwender ein "schwarzer Kasten" ist. In einem nachfolgenden Aufsatz werde ich ein selbstentwickeltes Simulationsprogramm und seine Anwendung vorstellen, das auf bekannte mechanischen Modelle basiert.

4. PROBLEMEN DER AUF ERMÜDUNG BASIERENDE DIMENSIONIERUNG

Zur Vordimensionierung können aus den im obigen Gliederungspunkt erwähnten Methoden nur die letzten zwei verwendet werden, aber wenn kein rechnergestütztes Konstruktionssystem zur Verfügung steht, bleibt nur die dritte Methode. Im weiteren zeige ich auf die Grenzen der Anwendung dieser Methode.. Die tatsächliche Sicherheit eines Konstrutionelementes kann mit der gut

bekanntem Zusammenhang bestimmt werden:

$$n_{(t)} = \frac{H_{(t)}}{T_{(t)}} \quad (3)$$

Zum Aufbau des Belastungsmodells müssen neben der Nennbelastung auch der Betriebsfaktor k_0 und Anlauffaktor k_1 bekannt sein. Die Werte dieser Faktoren hängen von der Antriebs- und Abtriebsmaschine ab, es wird also der durch die Antriebskette realisierte technologische Prozeß mitberücksichtigt. Ihre Werte wurden durch Messungen an unterschiedlichen Maschinengruppen bestimmt dann in technische Leitprinzipien übersetzt. Aus dem so aufgebautem Modell können die Belastungsamplitude und die Anlauf-Überbelastung anhand der Abb. 1, abgelesen werden.

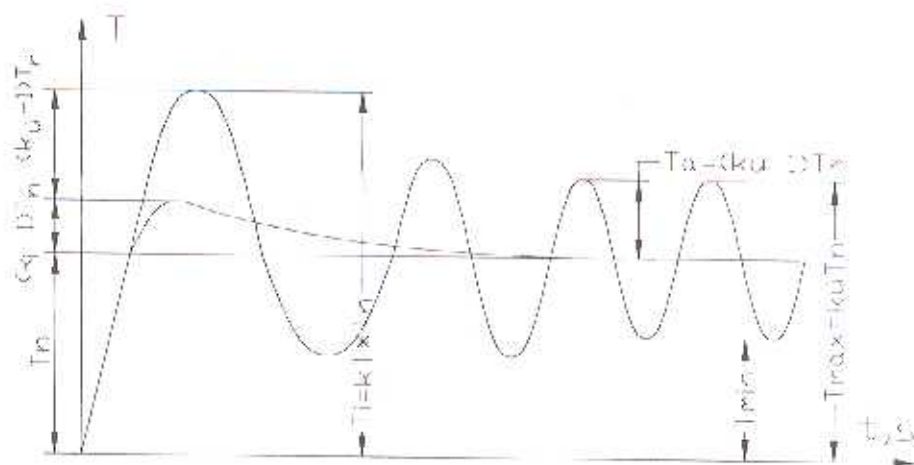


Abbildung 1.

$$T_a = (k_a - 1)T_n \quad (4)$$

$$T_u = k_u T_n \quad (5)$$

wobei:

k_1 Überbelastungsfaktor

$$k_1 = k_1, k_2 \quad (6)$$

Im stationären Betriebszustand die zeitlich verändernde Belastung:

$$T(t) = T_0 + T_a \sin \omega t \quad (7)$$

wobei: ω : Kreisfrequenz der anregenden Wirkungen

Wenn die Belastungen bekannt sind, können die Belastungskurven gezeichnet und die in den einzelnen Querschnitten auftretenden Mittelwert- und Amplituden-Spannung σ_m és σ_a berechnet werden.

Wenn die Belastungszyklen-Anzahl /Lebensdauer/ des zu dimensionierenden Einzelteils

- $N = 10^4 - 10^7$ ist nach Plan, mit gegebenen Überlebenswahrscheinlichkeit, dann kann zum vorgegebenen Lebensdauer der dazugehörige Ermüdungs-Grenzspannung nach der Wöhler-Kurve bestimmt werden. z.B. Auswahl von Wälzlager und Dimensionierung einiger Flugzeug-Einzelteile
- $N > 10^7$ ist, dann muß man gegen Ermüdung dimensionieren. Dazu wird der Wert der Ermüdungs-Grenzspannung R_{D_N} benötigt, was man am häufigsten mit Hilfe des Smith-Diagramms bestimmen kann.

Der Sicherheitsfaktor gegen Ermüdung

$$n_f = \frac{k_1 k_2}{\beta} R_{D_N} \frac{1}{\sigma_u} \quad (8)$$

wobei:

β : Rillenfaktor

k_1 : Oberflächenqualität-Faktor

k_2 : Dimensionsfaktor

Das für bestimmte Materialien experimentell bestimmte Smith-Diagramm ist unmittelbar nur für Probekörper gültig, deshalb werden geometrische Form der Einzelteile und die Art der Beanspruchung durch die Wahl des Rillenfaktors β , die Maße und Oberflächenqualität der Einzelteile durch die Wahl des Dimensionsfaktors k_2 und des Oberflächenqualitätsfaktors k_1 berücksichtigt. Diese Faktoren-Werte wurden experimentell bestimmt, und durch ihre Anwendung bekommt man ein Sicherheitsdiagramm mit ermäßigter Fläche, das

für die Gestaltung des gegebenen Einzelteils charakteristisch ist. Bei der Bestimmung des Sicherheitsfaktors wirkt eine Unsicherheit, die dadurch verursacht wird, daß der zeitliche Verlauf der Belastung nicht bekannt ist. Der Wert des Sicherheitsfaktors gibt geometrisch an, auf welchem Weg der - dem aktuellen Spannungszustand entsprechende - Punkt P aus dem Sicherheitsgebiet an die Grenzlinie kommen wird. Zwar in einem allgemeinen Fall keine der Modellen bezogen auf die Amplitudenspannung ($\sigma_a = \text{konst.}$), auf die Mittelwertspannung ($\sigma_m = \text{konst.}$), und auf deren Quotient $\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \text{konst.} \right)$ sich restlos erfüllt, die Annäherung $\frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \text{konst.}$ kann mit dem kleinsten Fehler verwendet werden /Abb. 2/.

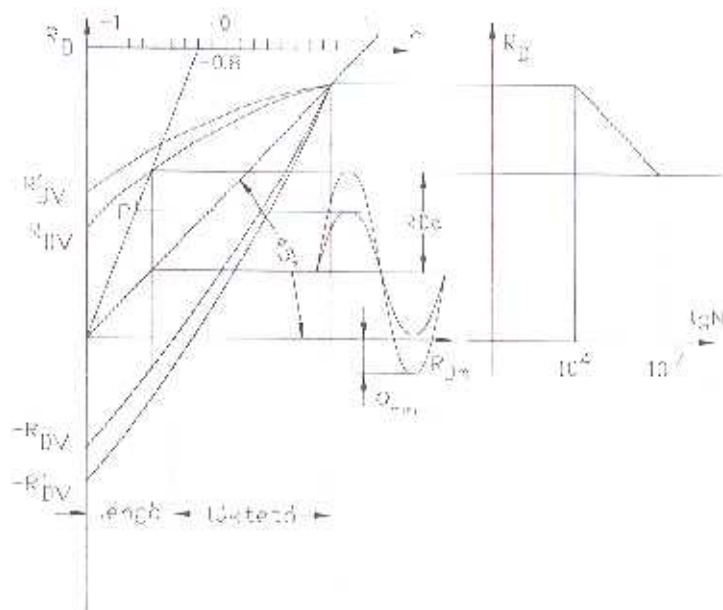


Abbildung 2.

Im Falle einer zeitlich verändernden, komplexen Belastung können die - auf den einachsigen Spannungszustand ausgearbeiteten - Smith-Diagramme mit guter Annäherung verwendet werden, wenn man die reduzierte Mittelwert- und Amplituden-Spannungen und die Rillennfaktoren bestimmt.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Beim Vorkonstruieren ist sogar das genaueste Belastungsmodell und die sorgfältigste Berechnung nur für ein "sich statisch verhaltendes" Konstruktionselement gültig.

Als allgemein bekannt, jedes Gefüge /sogar der menschliche Körper/ besitzt eine Selbstschwingungszahl. Diese Selbstschwingungszahlen können in einfachen Fällen sehr einfach berechnet, gemessen werden; ein gutes Beispiel dafür ist eine mit Konsolen eingespannte Flachfeder.

Beim Belastungsmodell gilt der Zusammenhang $T_{01} = T_n + T_s \sin \omega t$. Hier ist ω die Kreisfrequenz der Belastung /deren Wert im Falle einer mit Elektromotor angetriebenen Antriebskette bekannt ist/; aber ω , als anregende Frequenz, ist in vielen Fällen stochastisch. Ein gutes Beispiel dafür ist die Frequenz der Windstöße gegen Brückenkonstruktionen. Im Falle, wenn die Selbstkreisfrequenz des Gerüsts α , und die Kreisfrequenz der Anregung ω gleich sind oder ungefähr gleich, kann Resonanz auftreten. In diesem Fall wird, wie bei jedem federigen Element, Energie im Element gespeichert, angehäuft. Wenn genügend Zeit zur Verfügung steht, dann wird es mit immer größer werdender Amplitude schwingen, schwanken solange, bis im kritischen Querschnitt der Bruch eintritt. Natürlich gibt es solche Anlagen, zB. Vibratoren, Schwingungsgeräte, bei denen die anregende Frequenz an die Selbstfrequenz des Gerätes abgestimmt wird, aber ansonsten im allgemeinen Fall soll die Resonanz vermieden werden.

Die Resonanz kann also nur dann vermieden werden, wenn man die anregende und die Selbstfrequenz weit voneinander weg einstellt. Da die anregenden Frequenzen i.a. gegeben sind, die Lösung ist gewöhnlich die Verstellung der Selbstfrequenzen. Die Selbstfrequenz der Konstruktionen, Antriebsketten hängt von vielen Parametern ab und kann mit einem komplizierten Berechnungsverfahren bestimmt werden. Wenn die Selbstfrequenz beim Vorkonstruieren nicht bekannt ist, kann die Resonanz nicht ausgeschlossen werden, und die Belastungen können deshalb mit 100 % Sicherheit nicht modelliert werden.

6. VORSCHLAG FÜR DIE LÖSUNG

Die in der Konstruktionspraxis verwendeten Vor-Dimensionierungs- und Kontroll-Verfahren können die Probleme der Resonanz nicht behandeln. Die einzige Möglichkeit bietet die dynamische Modellierung der Konstruktionen, mit deren Hilfe die Selbstfrequenz des Systems bestimmbar ist, und sogar die

Belastungen können aus dem Verhältnis der Anreger- und Selbstfrequenzen bestimmt werden.

In meinem nächsten Aufsatz werde ich die Schritte und Probleme der dynamischen Modellbildung darstellen, mit Angabe ziemlich vieler möglichen Forschungsrichtungen.

7. LITERATUR

- [1] MAKHOULT M., Acéltengelyek méretezése, KGMTI, Budapest, 1961.
- [2] PONOMARJOV SZ.D. Szilárdsági számítások a gépészetben 3., Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1964.
- [3] TOTH L. J., Tengelyek, YMMF, Debrecen, 1994.

DINAMIKAI MODELLALKOTÁS ÉS SZIMULÁCIÓ SZÜKSÉGESSÉGE A SZERKEZETEK MÉRETEZÉSÉNÉL

A cikk egy előadássorozat első részeként bemutatja a méretezési eljárások problémáját a gépészetben, mely kiterjed a terhelések és a szerkezetjellemzők meghatározására, a kifáradás ellen történő méretezéshez elengedhetetlenül szükséges terhelési amplitúdók meghatározására. A dolgozat rávilágít arra, hogy dinamikai vizsgálatok (szimuláció) nélkül még a legpontosabb modellek esetén is használhatatlan szerkezetet tervezhetünk, ami csak a megépített működő berendezés próbatüzében derül ki.

A cikksorozat további részei bemutatják a dinamikai modelleket, majd az azokon alapuló szimulációs programot, végezetül egy konkrét példán keresztül egy szimulációs vizsgálat menetét, eredményét.