

Über die Anfänge der Dimensionierungsrechnung im Maschinenbau

Jürgen Bätge

0. Einleitung

Der Maschinenbau der Gegenwart ist durch das Bestreben gekennzeichnet, die eingesetzten Konstruktionswerkstoffe optimal auszunutzen. Dabei sind zwei Tendenzen zu unterscheiden.

1. Durch den Einsatz verbesserter Berechnungsverfahren für die Dimensionierung der einzelnen Bauteile ist man bestrebt, das Masse-Leistungs-Verhältnis immer günstiger zu gestalten. Dabei kommt der Anwendung der Methode der Finiten Elemente eine besondere Bedeutung zu.
2. Untersuchungen zu Problemen der Zuverlässigkeit in Verbindung mit geeigneten Diagnoseverfahren münden ein in das Bestreben, die Betriebssicherheit und damit die Nutzungsdauer bereits bestehender Anlagen sowie der in der Entwicklung befindlichen, ständig zu erhöhen.

Diese Tendenzen sind das Ergebnis eines über einen längeren Zeitraum dauernden Entwicklungsprozesses. Er begann mit der industriellen Revolution in der 2. Hälfte des 18. Jahrhunderts. Obwohl die Maschine als Arbeitsmittel schon sehr lange bekannt war, beispielsweise sind Walzwerke als Maschinen schon seit Beginn des 16. Jahrhunderts in Gebrauch [1], wurde die Dimensionierung der einzelnen Bauteile lange Zeit nach rein empirischen Grundsätzen vorgenommen. Bewährte Konstruktionen übernahm man kritiklos, Veränderungen setzten sich nur zögernd durch.

1. Die Einführung der Dampfmaschine in die materielle Produktion

Mit der Einführung von Maschinen in die Textilindustrie Englands (1764 Spinnmaschine Jenny), begann in dem

entwickeltesten Land Europas die industrielle Revolution. Sie erreichte eine neue Etappe, als die von James Watt 1775 erbaute doppelwirkende Dampfmaschine als revolutionierendes Antriebsaggregat in die fabrikmäßige Produktion eingeführt wurde.

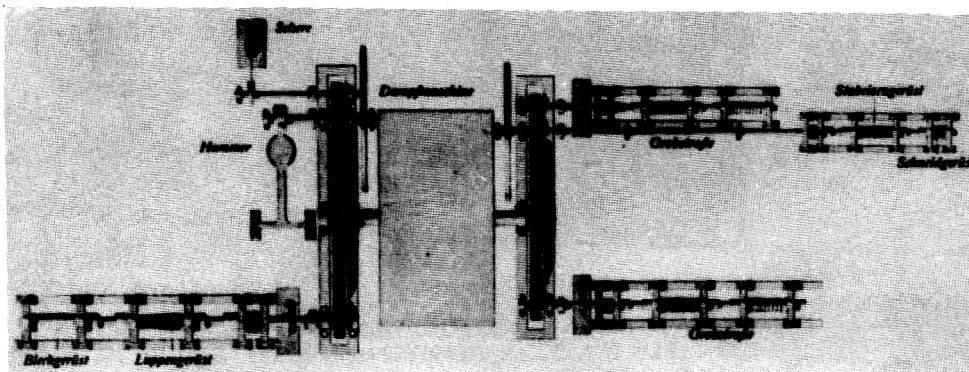
Die bis dahin eingesetzten Maschinen arbeiteten nach in der Praxis erprobten und bekannten Konstruktionsprinzipien, die nahezu ausschließlich empirisch gewonnen werden. Mit der Dampfmaschine war aber innerhalb eines sehr kurzen Zeitraumes eine Maschine entstanden, für die es keine Vorbilder gab. Man konnte kaum auf praktische Erfahrungen aufbauen; denn James Watt beschritt Neuland.

Inwieweit sich die Dampfmaschine als Antriebsaggregat durchsetzen konnte, hing davon ab, ob sie im Vergleich zu den zuverlässigen Wasserrädern auch hinreichend betriebssicher arbeitete. Infolge des hohen Preises und der mannigfachen mit ihrem Betrieb zusammenhängenden Probleme errichtete man für die gesamte Fabrikanlage anfänglich nur eine einzige Dampfmaschine. Über Transmissionen oder oft verwickelte Zahnradgetriebe wurden dann alle Arbeitsmaschinen angetrieben. Bild 1 zeigt ein englisches Puddeleisenwalzwerk zu Beginn des 19. Jahrhunderts. Die zentrale Stellung der Dampfmaschine kommt eindrucksvoll zum Ausdruck. Der Bruch auch nur eines Aggregates legte die ganze Produktion still. Infolge der zu geringen Leistung der Dampfmaschine konnte man ohnehin nicht gleichzeitig alle Walzgerüste betreiben.

2. Dimensionierungsrechnungen an Dampfmaschinen

Unter diesen Gesichtspunkten wird verständlich, daß James Watt der Dimensionierung der einzelnen Elemente der Dampfmaschine besondere Aufmerksamkeit geschenkt hat. Dabei ist zunächst die Frage zu klären, ob

Bild 1
Schema eines englischen Puddeleisenwalzwerkes, Beginn des 19. Jahrhunderts.
Quelle: Puppe, Stauber: Handbuch des Eisenhüttenwesens Bd. 1 Düsseldorf 1929



er auf bereits vorhandene Grundlagen aufbauen konnte. Die nachfolgende Übersicht beweist, daß grundlegende Arbeiten zur Festigkeitslehre bereits vorlagen.

1. G. Galilei (1564 bis 1642) legte bereits in dem 1638 erschienenen Werk „Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend“, die grundlegenden Gesetze der Biegung des geraden Stabes dar.
2. J. Bernoulli (1635 bis 1705) und Euler (1707 bis 1783) erweiterten die Erkenntnisse über die Biegung und leiteten die Gleichung der elastischen Linie ab.
3. Euler legte 1759 die nach ihm benannte Gleichung zur Berechnung von Stäben auf Knickung vor.
4. In Holland veröffentlichte 1727 van Muschenbrock Versuchsergebnisse über die Zug-, Druck- und Biegefestigkeit von Hölzern, führte Zugversuche an Metallen aus und bestätigte experimentell die Eulerschen Gleichungen zur Knickung.
5. Im Auftrage der französischen Regierung führte Buffon 1738 bis 1742 zahlreiche Biegefestigkeitsuntersuchungen an Hölzern durch. Er bestimmte auch die Durchbiegung vor dem Bruch.

Berücksichtigt man aber, daß diese Arbeiten zunächst nicht in englischer Sprache erschienen waren und James Watt als Autodidakt und Praktiker offensichtlich nicht über sehr umfangreiche Fremdsprachenkenntnisse verfügte, erscheint es unwahrscheinlich, daß er auf dieser Basis eine regelrechte Dimensionierungsrechnung für seine Maschinen durchführte. Allerdings waren ihm aus der Empirie heraus verschiedene Grundsätze bekannt, die er auch anwendete. In einem Brief an Boulton, dem Fabrikanten der Watt'schen Dampfmaschinen, wies er beispielsweise darauf hin, daß die Wechselbeanspruchung

des Balanciers einer doppelwirkenden Dampfmaschine im Gegensatz zur einfach wirkenden konstruktive Veränderungen erfordert, um die notwendige Festigkeit zu erreichen [2]. Der Einfluß der Beanspruchungsart auf die Festigkeit der einzelnen Maschinenelemente war ihm also bekannt.

Durch die Verlängerung seiner Patente hatte sich Watt gegenüber seinen Konkurrenten so durchgesetzt, daß er bis zum Jahre 1800 in England alleiniger Hersteller von Dampfmaschinen war. Insbesondere der Anspruch 4 seines Grundpatentes, mit dem er sich die Anwendung höherer Dampfdrücke hatte schützen lassen, verhinderte die Entwicklung kleinerer, für das Verkehrswesen geeigneter Dampfmaschinen. Watt selbst benutzte in seinen Maschinen nur einen Dampfdruck, der nur unwesentlich über den atmosphärischen Druck hinausging und deshalb große Kolbendurchmesser erforderte. [3].

Nach Ablauf der Ansprüche Watts setzte eine stürmische Entwicklung der Dampfmaschinen ein, die sich in der Verwendung von Hochdruckdampf, der Mehrfachexpansion und dem unmittelbaren Einsatz einer einfachen Schubkurbel zum Erzeugen der Rotationsbewegung äußerte.

Sehr bald war es notwendig geworden, allgemeine Beziehungen zur Dimensionierung der wichtigsten Bauteile der Dampfmaschinen zu entwickeln. Diese mußten aber einfach zu handhaben sein; denn die Erbauer der Dampfmaschinen waren Praktiker, die über keine akademische Bildung verfügten. Ingenieure im heutigen Sinne gab es zu diesem Zeitpunkt der industriellen Revolution noch nicht.

Im Jahre 1827 erschien von John Farey eine Zusammenstellung von „rules“, einfach formulierten Regeln für die

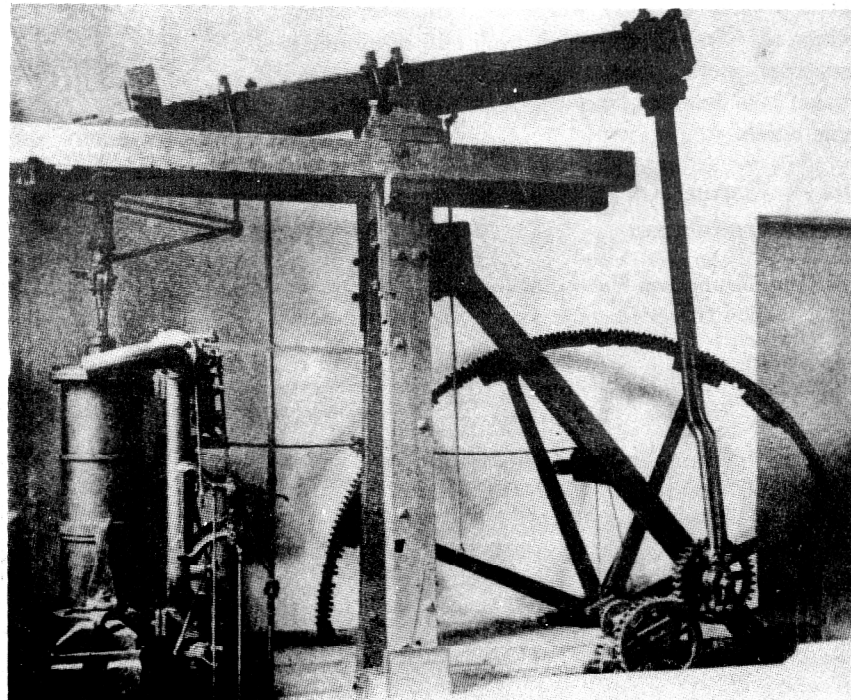


Bild 2
1788 in Soho von Watt erbaute stehende, doppelwirkende Dampfmaschine,
 $P = 11 \text{ kW}$, Zylinderdurchmesser 422 mm, Hub 1200 mm.
Quelle: C. Matschoß: Entwicklung der Dampfmaschine Bd. 1 Berlin 1908

Dimensionierung der wichtigsten Teile der Dampfmaschinen wie Balancier, Kolbenstange, Schubstange, Zapfen u. dgl. [4].

Als Beispiel sei die Dimensionierung eines hölzernen Balanciers einer stehenden Dampfmaschine, wie sie Bild 2 zeigt, angeführt.

Farey schlägt vor:

„Teile den Durchmesser des Zylinders in Zoll durch 1, 2, der Quotient ist dann die Höhe des Balkens, ferner sei die Breite 1/12 der Länge von Mitte zu Mitte“ [4].

Daraus ergibt sich

$$h = \frac{1}{1,2} d = 0,83 \cdot d$$

$$b = \frac{1}{12}$$

h = Höhe des Balanciers

b = Breite des Balanciers

d = Durchmesser des Kolbens bzw. Zylinders in Zoll

Vom Belastungsfall her liegt ein Träger auf zwei Stützen mit mittiger Belastung vor, dessen maximale Biegespannung nach

$$\sigma_b = \frac{M_{b \max}}{W} \quad (1)$$

$$\sigma_b = \frac{3 \cdot F_k \cdot l}{b \cdot h^2}$$

F_k = Kolbenkraft

l = Abstand der Zapfen

Kolbenstange – Pleul

zu ermitteln ist.

Die wirkende Kolbenkraft wird unter Vernachlässigung der Reibung von der Kolbenfläche und dem Dampfdruck p bestimmt.

$$F_k = \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} \cdot p \quad (2)$$

Da der Dampfdruck p nur wenig über dem atmosphärischen Druck lag, kann gesetzt werden:

$$p \approx 1 \cdot 10^{-1} \text{ MPa}$$

und die Kolbenkraft ist dem Quadrat des Kolbendurchmessers direkt proportional.

$$F_k \sim d^2$$

Da auch $b \sim 1$, entsprechend den Vorschlägen Fareys, wird

$$\sigma_{b \max} \sim \frac{d^2}{h^2} \quad (3)$$

Geht man weiter davon aus, daß für die maximal zulässige Biegespannung ein Erfahrungswert vorliegt, eventuell aus den Untersuchungen Buffons abgeleitet, so ergibt sich tatsächlich

$$h = C \cdot d \quad C = 0,83 \text{ entspr. Gl. (1)}$$

Daß diese einfache Beziehung tatsächlich unter Benutzung der Regeln der Festigkeitslehre entstanden ist, be-

weist eine Formulierung Fareys, wonach die ertragbare Beanspruchung eines durch Biegung belasteten Balkens proportional dem Quadrat der Höhe, der Breite und umgekehrt proportional der Länge ist. Eine Aussage, die aus Gleichung (1) abzuleiten ist.

3. „Rules“ als Anfänge einer allgemeinen Dimensionierungsrechnung

Die „rules“ wurden nicht nur im Dampfmaschinenbau verwendet, sondern sollten auch für andere Konstruktionen anwendbar sein, wie beispielsweise für die Auslegung von Zahnrädern. Die Grundsätze, aus denen die „rules“ abgeleitet wurden, waren nur wenigen bekannt. Der wissenschaftlich ausgebildete Ingenieur als Bindeglied zwischen der Theorie und der Praxis fehlte noch.

Für die Entwicklung der Theorie der Technischen Mechanik war die Gründung der Ecole Polytechnique 1794 in Paris von besonderer Bedeutung. Es war eine Institution entstanden, die den wissenschaftlichen Vorlauf für die Einführung der Methoden der Technischen Mechanik in die industrielle Produktion schaffen konnte. Die Weiterführung der Arbeiten von Euler (1707 bis 1783), d'Alembert (1717 bis 1783), Lagrange (1736 bis 1813) usw. war ein besonderes Anliegen dieser Einrichtung. Hier studierten und arbeiteten u. a. Navier (1785 bis 1836), der Begründer der wissenschaftlichen Elastizitätslehre und der Baumechanik sowie Clapeyron (1779 bis 1864), dem wir die Formulierung des „Drei-Momenten-Satzes“ und der Theorie der Formänderungsarbeit verdanken.

Die Firma Boulton u. Watt beschäftigte in späteren Jahren einen Mathematiker namens Southern, der die Berechnung der Abmessungen der einzelnen Elemente der Dampfmaschinen vornahm. Dies war aber ein Einzelfall; denn anstelle des „Berechnungsingenieurs“ war in den meisten Fällen die Empirie und das Probieren Grundlage der Dimensionierung. Der Praktiker hatte noch kein Vertrauen zu der auch zumeist für ihn unverständlichen Theorie. So sind die von Farey zusammengestellten „rules“ als der Anfang der wissenschaftlichen Dimensionierungsrechnung anzusehen. Hergeleitet aus der Anwendung der elementaren Festigkeitslehre auf Probleme des Maschinenbaues und einfach anzuwenden, sind sie ein Mittler zwischen der reinen Empirie und der exakten Wissenschaft. In Verbindung mit den Erfahrungen des Praktikers leisteten sie auf einer bestimmten Stufe des Maschinenbaues einen wesentlichen Beitrag für die Einführung der Technischen Mechanik. Natürlich hatten sie ihre Grenzen. Wenn auch die Wirkung der Massenkkräfte bei instationären Bewegungsabläufen schon bekannt und auch beschrieben wurde [4], konnten diese nur durch hohe Sicherheiten in den „rules“ berücksichtigt werden. Die Theorien von Lagrange und d'Alembert waren noch nicht so aufbereitet, daß der Maschinenbauer damit arbeiten konnte. Ebenso war es noch nicht möglich, Probleme der Dauerfestigkeit zu erfassen, wenn auch die Wirkungen der Wechselbiegung an Zapfen bekannt waren.

4. Zusammenfassung

Abgeleitet aus den Erfordernissen des Dampfmaschinenbaues, möglichst betriebssichere Energiequellen zu schaffen, wurden zu Beginn des 19. Jahrhunderts in England, dem in der industriellen Entwicklung am weitesten fortgeschrittenen Land, einfache Regeln („rules“) für die Dimensionierung von Maschinenteilen aufgestellt. Es läßt sich nachweisen, daß diese „rules“ unter Berücksichtigung von Grundsätzen der elementaren Festigkeitslehre entstanden sind. Obwohl die Theorie der Technischen Mechanik, insbesondere in Frankreich, sehr weit entwickelt war, konnte sie in die Praxis des Maschinenbaues noch keinen Eingang finden. Dies war erst in späteren Jahren der Fall, als der wissenschaftlich ausgebildete Ingenieur in der Praxis tätig geworden war. Der Einsatz der „rules“ ist aber als Beginn der modernen Dimensionierungsrechnung anzusehen. Wenn sie auch in vielen Fällen nur begrenzt anwendbar waren, so beendeten sie jedoch die Zeit der reinen Empirie und des Probierens bei der Konstruktion von Maschinen.

LITERATUR

- [1] Bätge, J.: Zur Entwicklung der Technik im Walzwerkwesen von den Anfängen bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts. Diss. B, TH Magdeburg 1981.
- [2] Meyer, E.: Zur Geschichte der Anwendungen der Festigkeitslehre im Maschinenbau: Hat Watt sich zur Bemessung seiner Maschinenteile der Festigkeitslehre bedient? Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie. Herausgegeben von C. Matschoos, Erster Band, Seite 108 – 117. Berlin, Verlag von Julius Springer 1909.
- [3] Roosen: Watt's Pioniertat und die weitere Entwicklung der Dampftechnik. In: 200 Jahre industrielle Revolution. Deutsches Museum, Abhandlungen und Berichte 37. Jg. 1969 H. 1. Verlag von R. Oldenbourg, München.
- [4] Farey, J.: A treatise an the steam engine, historical, practical and descriptive, London 1827.