

## Festigkeitsberechnungen im Landmaschinenbau und deren Grenzen

Der folgende Aufsatz ist ein Auszug aus dem Referat, das Dr.-Ing. GERHARD WELSCHHOF, International Harvester Company, auf der Tagung „Erprobungsmethoden für Landmaschinen“ der VDI-Fachgruppe Landtechnik in Heidelberg am 22. Oktober 1963 gehalten hat.

### Aufgabe der Festigkeitsberechnung

Die Festigkeitsberechnung hat die Aufgabe, bei der richtigen Bemessung der Bauteile mitzuhelfen, damit erstens die Funktion der Maschinen während der vorgesehenen Lebensdauer nicht durch mangelnde Festigkeit der Teile beeinträchtigt wird, zweitens der bauliche Aufwand das wirtschaftliche Maß nicht überschreitet und drittens die Entwicklungszeit möglichst kurz ist.

Die Berechnung kann und muß schon beginnen, wenn der Entwurf für eine Maschine ausgearbeitet wird. Je intensiver im ersten Konstruktionsstadium die entstehenden Entwürfe festigkeitsmäßig untersucht werden, um so wirkungsvoller ist die dafür aufgewendete Mühe. Lange Zeit vor der Fertigstellung der Versuchsteile, lange bevor im Labor oder Feld eine Erprobung möglich ist, kann die Berechnung der Bauteilfestigkeiten für die Konstruktion eine wichtige Hilfe sein.

In Bild 1 wird der Ablauf der Entwicklung in Abhängigkeit von der Zeit vereinfacht dargestellt. Es ist der Wert des Produktes aufgezeichnet, der von einem Wert null bei der Erteilung des Konstruktionsauftrages bis zu einem Größtwert in möglichst kurzer Zeit ansteigen soll. Eine kurze Entwicklungszeit ist wichtig, weil auf diese Weise Kosten eingespart und der größte Nutzen aus der Idee gewonnen werden kann. In diesen Entwicklungsablauf der Maschine muß die Festigkeitsberechnung eingeordnet werden. Besonders im ersten Stadium der Entwicklung können Festigkeitsberechnungen diese vorantreiben und so den Wertzuwachs beschleunigen. Während der ganzen Phase der Neuentwicklung wird die Festigkeitsberechnung wiederholt angewendet. Durch Abschätzung der Einflüsse der Produktionstoleranzen auf die Festigkeit der Teile können die bei der Produktionsaufnahme zu erwartenden Wertminderungen klein gehalten werden. Auch bei der Weiterentwicklung der Maschinen müssen immer wieder Festigkeitsberechnungen helfen, den Wert der Produkte zu steigern.

Der Versuch hat das Ziel, Fehler und Mängel an Maschinen und deren Bauteilen zu entdecken. Seine Aufgabe ist es, Erfahrungen vorwegzunehmen, die später hundert- und tausendfach von den Benutzern unserer Produkte, den Landwirten, gemacht werden. Die Festigkeitsberechnung kann nichts anderes tun, als in möglichst geordneter Weise diese vorliegenden Erfahrungen aus dem Felde in Regeln zu fassen. Berechnungen ohne vorhandene Erfahrungen, seien es eigene oder die aus der Literatur, sind ohne Wert.

Eine Übersicht über die Verbindungen der Berechnungen mit allen Stellen der Entwicklung zeigt Bild 2. Der Konstruktionsauftrag soll zu einem nützlichen Produkt führen. Dabei werden die Stationen Entwurf, Detailkonstruktion, Fertigung der Proto-

typen, Banteilversuch und Feldversuch durchlaufen. Bewußt wurde die Berechnung nicht als eine dieser Stationen eingezeichnet, sondern vom Anfang bis zum Ende der Entwicklung muß sie die Konstruktion begleiten. Jede dieser Stationen wird Unterlagen für die Belastungen zur Spannungsermittlung und die Berechnung der Festigkeit der Teile liefern. Die Erfahrungen aller sollen gesammelt und von der Berechnung ausgewertet werden.

### Durchführung der Festigkeitsberechnung

Zur Durchführung der Festigkeitsberechnung muß vor allem die Konstruktionsaufgabe gut und klar bestimmt werden. Während bei dem Entwurf von Landmaschinen meist ziemlich genaue Vorstellungen über die geforderten Funktionen vorhanden sind, ist die Aufgabenstellung für die notwendigen Festigkeiten und Lebensdauern oft sehr wenig präzisiert.

Es bedarf vorweg der Entscheidung: Welches Konstruktionsziel wird verfolgt? Welche Einsatzart muß die Maschine aushalten? Bei jeder Art der Festigkeitsberechnung von Landmaschinen ist die Festsetzung der Lastannahmen für die Bauteile besonders schwierig. Man kann von wirklichen Belastungen, aber auch von Nennbelastungen ausgehen.

### Die Lastannahmen

Für die meisten Landmaschinenteile sind die wirklichen Belastungen heute noch nicht bekannt. Die Einflüsse der verschiedenen Fahrbahnen und der Werkzeuge auf die dynamischen Belastungen unserer Maschinen wurden bis heute nur teilweise gemessen. Es bedarf noch vieler Versuche, um für alle Maschinenarten und Maschinenverwendungen die wirklichen Belastungen zu bestimmen. Einzelmessungen können selten eine Berechnungsgrundlage sein, benötigt werden gemessene Belastungskollektive, die für die ganze Betriebszeit der Maschine gültig sind. Will man zum Beispiel für ein Schleppergetriebe wirkliche, absolute Lebensdauerwerte für die Wälzlager ausrechnen, gelingt das heute nicht, da wir noch zu wenig über die wirklichen Belastungen wissen.

In der Regel gehen wir bei Festigkeitsberechnungen von Nennbelastungen aus. Für ein bestimmtes Schleppergetriebe sei bekannt, daß dessen Haltbarkeit an der Grenze des Zulässigen liegt. Dieses Getriebe wird für die Beanspruchung des Dauerbetriebes durchgerechnet. Eine bestimmte Leistung des Motors, bedingt durch Drehzahl und Drehmoment, ein normales Gewicht und ein aus der Erfahrung möglicher Kraftschlußbeiwert werden angenommen. Mit diesen „Nennbelastungen“ erhält man als Ergebnis Sicherheitsfaktoren und Lebensdauerzahlen, die abhängen von dem Verhältnis wirklicher Belastungen zu angenommener Nennlast. Sind die Nennlasten relativ klein angesetzt, so werden die ermittelten Sicherheitszahlen groß sein. Die auf diese Weise ermittelten Sicherheitswerte und Lebensdauerzahlen hängen auch von Rechenverfahren und den zulässigen Festigkeitswerten der Bauteile ab.

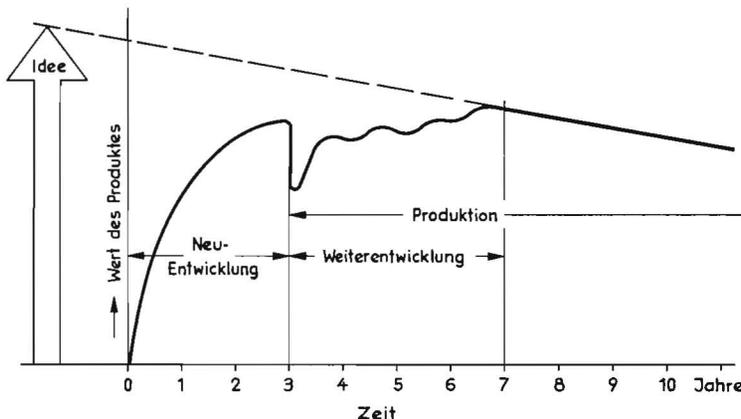


Bild 1: Wertänderung eines Produktes während der Entwicklungszeit

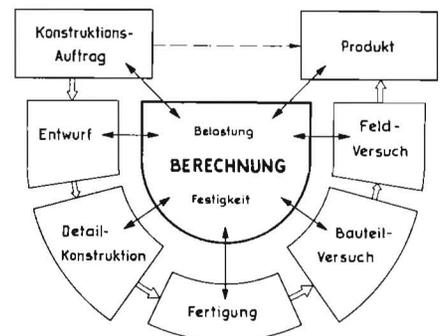


Bild 2: Eingliederung der Berechnung in die Entwicklung

Lassen sich die zulässigen Festigkeitswerte für bestimmte Bauteile recht genau bestimmen, so ist die wirkliche Belastung proportional dem Produkt aus Sicherheitsfaktor und Nennlast.

Daraus folgt, daß eine Festigkeitsberechnung immer dann von Nennlasten ausgehen kann, wenn die zulässigen Festigkeitswerte mit einer großen Genauigkeit ermittelt wurden und für ein ähnliches Bauteil die Einsatzgrenzen aus der Praxis bekannt sind.

An dieser Stelle muß vielleicht besonders erwähnt werden, daß Rechnen mit Nennlasten ein Notbehelf ist. Verfeinern wir die Bestimmungsmethoden der Nennlasten, so können wir Schritt für Schritt diese den wirklichen Belastungen angleichen, je mehr wir über die Bauteile durch Messungen erfahren.

Eine wichtige Aufgabe gibt es hier, die unsere landtechnischen Institute lösen könnten: Es sollten in allgemeiner Form verschiedene vollständige schematische Darstellungen mit den dazugehörigen Kennwerten für die Belastungen von Landmaschinen erarbeitet werden. Diese Darstellungen sollten so angelegt sein, daß durch den Gebrauch in der Praxis das zuerst stark vereinfachte Schema mit Erfahrungswerten gefüllt werden kann.

Aber auch rechnerisch können wir bei den Lastermittlungen weiterkommen. Beim Vergleich verschiedener Konstruktionen genügen dabei oft schon einfache Verfahren. Es soll beispielsweise ein Fahrzeug, das nur durch seine Gummireifen abgedefert wird, durch eine Konstruktionsänderung leichter werden. Dann ändert sich das Verhältnis von Reifenfederkonstante und Gewicht und damit auch der Stoßfaktor bei Fahrt auf ebener Straße und auch beim Auftreffen auf Hindernisse, wie zum Beispiel Grenzsteine. Das Fahrzeugrad wird durch ein einfaches System Feder/Masse ersetzt, das senkrecht oder waagrecht ausschlägt.

In Bild 3 wurden Stoßfaktoren bei senkrechten Stößen in Abhängigkeit von der bezogenen Federkonstanten — das ist das Verhältnis von der Federzahl zu dem statischen Gewicht — dargestellt. Wird der Reifenschwerpunkt beim Stoß um die Höhe  $a$  angehoben, die kleiner als die statische Einsenkung ist, wird die untere Formel benutzt, die mit  $n = 2$  die größten Stoßfaktoren liefert. Springt die gefederte Masse vom Boden ab, gilt die obere Gleichung. Diese Bestimmung der Stoßfaktoren kann nur eine Näherung sein; doch zeigt sich eine erstaunliche Übereinstimmung mit praktischen Messungen. Dabei wurden für die Bewegung des Radmittelpunktes Werte von  $a = 1,5$  bis  $2,5$  cm häufig gemessen. Da bei Ackerschleppern die bezogenen Federkonstanten im Bereich von  $0,3$  bis  $0,5$  1/cm liegen, müssen die Stoßfaktoren Werte zwischen  $1,5$  und  $2,5$  annehmen. Für einen beladenen Ackerswagen sind bei bezogenen Federkonstanten von  $0,2$  bis  $0,4$  1/cm kleinere Stoßfaktoren zu erwarten als bei einem leeren Wagen, wo bezogenen Federzahlen von  $0,8$  bis  $1,2$  1/cm Stoßfaktoren von  $2$  bis  $3$  zuzuordnen sind.

Bild 4 gibt in ähnlicher Weise den Zusammenhang zwischen bezogener Federkonstante  $C/G$ , Fahrgeschwindigkeit  $V$  oder Reifeneindrückung  $a$  und Stoßfaktor  $n$  für eine waagerechte Bewegung an. Stößt das Vorderrad eines Ackerschleppers gegen ein großes Hindernis mit einer Fahrgeschwindigkeit  $V$  von etwa  $3$  km/h, ist  $C/G = 1/7$  1/cm und  $a = 7$  cm, wird der Stoßfaktor ungefähr  $n = 1$  sein; das heißt, die Vorderachse muß eine Stoßkraft erleiden, die gleich dem Gewicht des Schleppers ist.

#### Vorhandene Spannungen

Sind die Belastungen für unsere Bauteile als wirkliche Belastungen oder Nennlasten bekannt, müssen mit diesen die vorhandenen Spannungen oder Verformungen bestimmt werden. Für die meisten Maschinenelemente sind entsprechende Berechnungsverfahren aus Handbüchern zu entnehmen.

Die Hauptschwierigkeit ist nun, die gestellte Aufgabe so zu vereinfachen, daß eine Berechnung ohne großen Aufwand schnell mit den bekannten Lösungsmethoden möglich ist.

Häufig kommt man besonders dann zu einem erfolgreichen Ansatz, wenn das Problem durch zwei verschiedene Vereinfachungen eingekreist wird. Das einfache Beispiel einer Bolzenberechnung mag das erläutern: Für eine bestimmte Konstruktion waren Bolzenbrüche im Feldbetrieb aufgetreten. Eine Festigkeitsberechnung sollte die Bolzenverbindung nachprüfen und entsprechende Verbesserungsvorschläge bringen. Die belastenden Kräfte eines Hydraulikzylinders waren aus Feldmessungen bekannt.

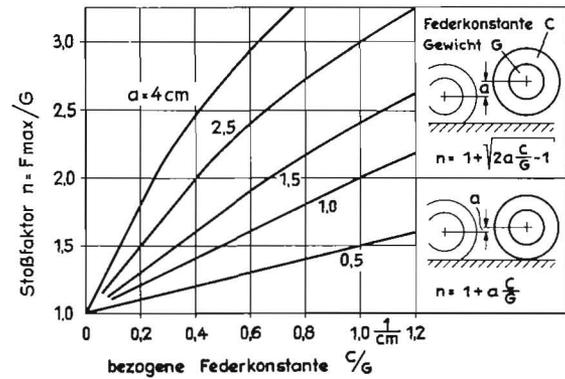


Bild 3: Errechnete Stoßfaktoren  $n$  bei vertikalen Fahrzeugstößen in Abhängigkeit von der bezogenen Federkonstante  $C/G$   
 $C$  = Federkonstante, zum Beispiel des Reifens;  $G$  = auf die Feder wirkendes Gewicht;  $a$  = vertikaler Schwerpunktsweg;  $F_{max}$  = größte Stoßkraft

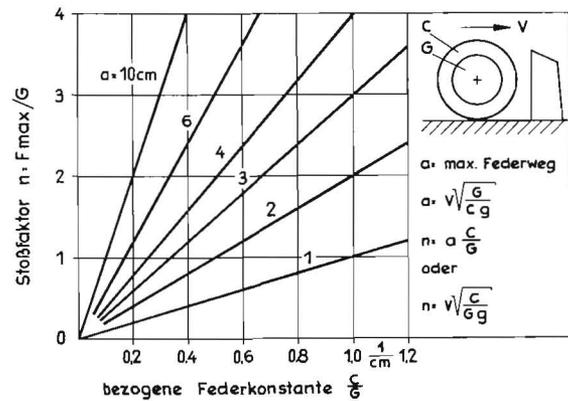


Bild 4: Errechnete Stoßfaktoren beim horizontalen Fahrzeugstoß in Abhängigkeit von der bezogenen Federkonstante  $C/G$   
 Bezeichnungen wie Bild 3;  $V$  = horizontale Auftreffgeschwindigkeit

Aus Bild 5 ist die Konstruktion ersichtlich. Es liegt nahe, bei so kräftigen, breiten Auflagen mit der Vereinfachung eines beidseitig eingespannten Trägers zu rechnen (Vereinfachung A). Eine erste Rechnung zeigt, daß bei dieser Belastungsart der Bolzen nicht in der Mitte brechen durfte. Ein Gang in die Werkstatt und die Besichtigung des ganzen Maschinenteiles zeigte, daß die Lager in relativ dünne Wände eingeschweißt wurden. Das führt zur Vereinfachung B: Träger auf zwei Stützen, mit den Drehpunkten in den Wandmitten.

Die wirklich auftretenden Biegemomente liegen in dem durch beide Belastungsfälle eingegrenzten Bereich. Eine gute Abschätzung der auftretenden Spannungen war möglich, die daraufhin geänderte Bolzenverbindung hält.

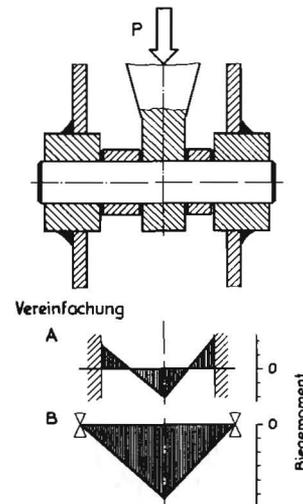


Bild 5: Lastannahmen zur Berechnung einer Bolzenverbindung  
 A = Träger zweiseitig eingespannt; B = Träger frei aufliegend

Das war ein recht einfaches Beispiel. Aber die nützliche Anwendung der Festigkeitsberechnung im Landmaschinenbau hängt zum wesentlichen Teil davon ab, daß man mit einer gewissenhaften Einfühlung in die scheinbaren Kleinigkeiten der Konstruktion eine wirkliche Hilfe geben kann.

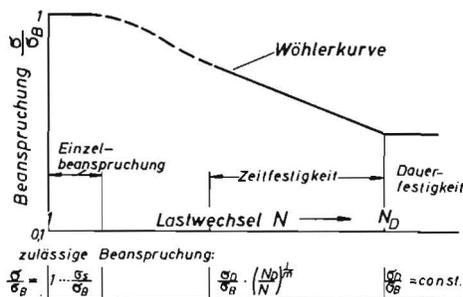
### Berechnung der Festigkeit

Schon bei der Besprechung der meist schwierigen Lastannahmen wurde darauf hingewiesen, daß die Berechnung der Festigkeit besonders wichtig sei. Es sollen hier einige von den vielen Fragen erörtert werden, die bei der Ermittlung der Festigkeit unserer Maschinenteile bedeutend sind.

Drei Arten von Beanspruchungen kennen wir: Einzelbeanspruchungen, bei denen es zur Verformung oder Bruch der Teile kommt; sehr häufige Beanspruchungen, die Werkstückfestigkeit ist unabhängig von der Lastwechselzahl, das Teil ist dauerfest; dazwischen gibt es einen Übergangsbereich, in dem die Werkstückfestigkeit von der Lastwechselzahl abhängt. Das ist der Bereich der Zeitfestigkeit. Für alle drei Bereiche gibt die WÖHLER-Kurve den Zusammenhang zwischen Bauteilfestigkeit und Lastwechselzahl an.

Erheblich vereinfacht zeigt Bild 6 im oberen Teil der Darstellung diesen Zusammenhang in der Form der bekannten WÖHLER-Kurve. Darunter wurden einige Formeln aufgeschrieben, mit denen die für die verschiedenen Lastwechselbereiche vorhandenen Festigkeitswerte angenähert ermittelt werden können. Bei Durchsicht der im unteren Teil des Bildes aufgezeichneten Kennwerte, die man zur Auswertung der Formeln benötigt, wird offenbar, daß wir recht wenig wissen, um eine Vorausbestimmung der Festigkeiten unserer Bauteile zu ermöglichen. Das Verhältnis von zulässiger Dauerfestigkeit und Bruchfestigkeit des Maschinenteiles unterliegt vielen Einflüssen (A). Für eine ganze Reihe von einfachen Belastungsfällen sind entsprechende Zahlenwerte für diesen Ausdruck aus der Literatur bekannt.

Vielen Einflüssen ist der Übergangsbereich von der Zeitfestigkeit zur Dauerfestigkeit unterworfen. Vergleicht man vorhandene Versuchsergebnisse verschiedener Stähle mit einem Standardmaterial von der Bruchfestigkeit  $\sigma_{B0}$  und der den Beginn der Dauerfestigkeit anzeigenden Lastwechselzahl  $N_{D0}$ , ergibt sich die bei (B) aufgeschriebene Näherungsformel mit dem Exponenten  $P = 0$  bis 2. Bei Pittingbildung an Zahnrädern und anderen Problemen der Flächenpressung ist der Wert für  $P = 2$  meist recht zutreffend. Das bedeutet, daß eine Verbesserung des Materials eine erhebliche Verlängerung der Lebensdauer zur Folge haben muß. Damit Ver-



A:  $\frac{\sigma_D}{\sigma_B} = f$  (Werkstoffart, Form, Größe, Oberfläche)  
GG, Stahl - Biegung: Bestwerte = 0,4...0,55

B:  $\frac{N_D}{N_{D0}} = \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{B0}}\right)^p$  Stahl - Biegung  $p = 0 \dots 2$   
 $N_{D0} \approx 2 \cdot 10^6$   
- Flächenpressung  $p = 2$   
 $N_{D0} \approx 2 \cdot 10^6$

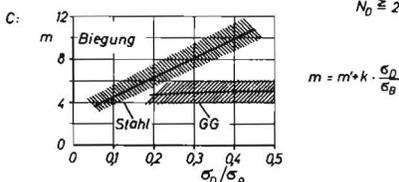
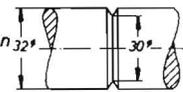


Bild 6: Zulässige Beanspruchungen bei verschiedenen Belastungsarten  $N_D, N_{D0}$  = Lastwechselzahlen zur Abgrenzung des Dauerfestigkeitsbereiches;  $\sigma =$  vorhandene Festigkeit;  $\sigma_B, \sigma_{B0}$  = Bruchfestigkeit;  $\sigma_D$  = Streckgrenze;  $m, m'$  = reziprokwert der Steigung der Wöhlerkurve in logarithmischer Darstellung,  $k$  = Erfahrungswert

### Aufgabe: Biegewechselfestigkeit

bei  $N = 100000$  Lastwechseln



Werkstoff: C 45,  $\sigma_B = 70 \text{ kg/mm}^2$

I.  $N \approx N_D = 2 \cdot 10^6$

II.  $N = 100000$

$m = m' + k \frac{\sigma_{bw}}{\sigma_B} = 4 + 18 \cdot 0,25 = 8,5$

$\frac{\sigma_{bw}}{\sigma_B} = \text{const.} = 0,25$

$\frac{\sigma_{bw}}{\sigma_B} = \frac{\sigma_{bw}}{\sigma_B} \left(\frac{N_D}{N}\right)^{1/m} = 0,25 \cdot 1,45$

$\sigma_{bw} = 17,5 \text{ kg/mm}^2$

$\sigma_{bw}' = 25 \text{ kg/mm}^2$

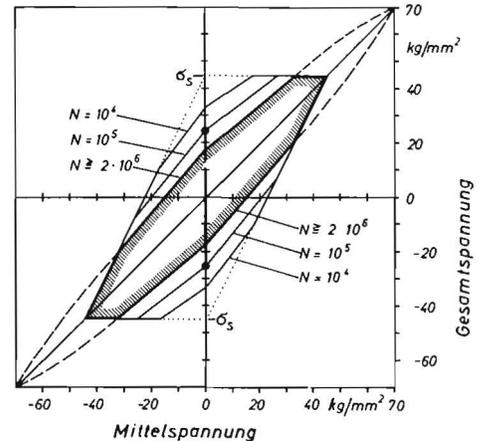


Bild 7: Berechnung und Entwurf eines allgemeinen Festigkeitsschaubildes für eine gekerbte Welle

Bezeichnungen wie in Bild 6;  $\sigma_{bw}$  = Biegewechselfestigkeit

gleichsrechnungen oder Abschätzungen für Rechnungen im zeitfesten Bereich der Bauteile möglich sind, müssen auch Angaben über die Steigung der WÖHLER-Kurve oder deren Reziprokwert  $m$  gemacht werden. Bei (C) wurden für Stahl und Grauguß einige Werte für  $m$  in Abhängigkeit vom Verhältnis der Dauerfestigkeit  $\sigma_D$  zur Bruchfestigkeit  $\sigma_B$  für den Fall der Biegung aufgezeichnet. Der gegen Kerbungen relativ unempfindliche Grauguß hat Steigungswerte von  $1/m = 1/6$  bis  $1/4$ . Der Werkstoff Stahl weist bei stark gekerbten Bauteilen mit zunehmender Lastwechselzahl einen schnellen Abfall der Dauerfestigkeit auf. Bei wenig oder ungebogenen Bauteilen verringert sich die Dauerfestigkeit weniger. Während im ersten Falle die Steigungen der WÖHLER-Kurven im Zeitfestigkeitsbereich  $1/m = 1/5$  bis  $1/3$  betragen, sind es im zweiten  $1/m = 1/12$  bis  $1/10$ . Temperguß und Gußstahl sind zwischen den beiden in Bild 6 eingezeichneten Kurven einzuordnen.

Für den Bereich der Dauerfestigkeit ist es üblich, sogenannte Dauerfestigkeitsschaubilder zu zeichnen. Diese Diagramme geben bekanntlich den Bereich der Festigkeiten der Bauteile für verschieden zusammengesetzte Wechsel- und Vorspannungen an. Diese Darstellungsweise kann man auch für den Bereich der Zeitfestigkeit erweitern (Bild 7). Für eine durch eine Spitzkerbe geschwächte Welle soll deren Festigkeit für 100 000 Lastwechsel bestimmt und auch das entsprechende Festigkeitsschaubild gezeichnet werden.

Zuerst wurde die Festigkeit der Welle für den Dauerfestigkeitsbereich mit  $17,5 \text{ kg/mm}^2$  ermittelt (I) und das übliche Dauerfestigkeitsschaubild gezeichnet. Mit den in Bild 6 gegebenen Regeln findet man durch eine Abschätzung für  $10^5$  Lastwechsel eine zulässige Beanspruchung von  $25 \text{ kg/mm}^2$  (II). Entsprechend werden die Festigkeiten für andere Lastwechselzahlen ermittelt und in das allgemeine Festigkeitsschaubild des Bildes 7 eingetragen.

Im Landmaschinen- und Schlepperbau ist der Grauguß ein sehr wichtiger Werkstoff. Die Festigkeiten von Graugußteilen sind besonders schwierig zu bestimmen, da die entsprechenden Werkstoffwerte nicht in der gleichen Weise bekannt sind wie bei Stahl. Deshalb sind hier alle Berechnungen in besonderem Maße auf Versuchsergebnisse angewiesen. Dabei ergeben sich viele Schwierigkeiten bei der Beurteilung der vom Versuch bestimmten Meßergebnisse. Im Feld oder Labor werden bei Belastungsversuchen diese als Dehnungen gemessen und mit Hilfe des Elastizitätsmoduls in Spannungen umgerechnet. Der Elastizitätsmodul

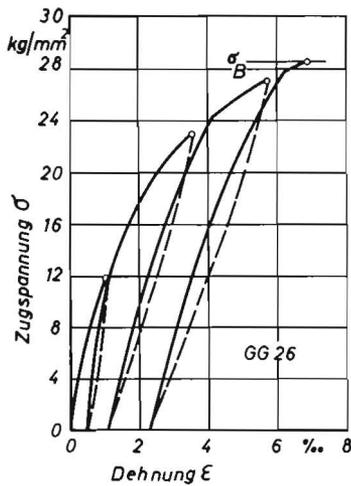


Bild 8: Spannungs-(Dehnungs)-Kurven für Grauguß

schwankt aber in weiten Grenzen und ändert sich mit der Belastung (Bilder 8, 9 und 10).

Die Abhängigkeit der Dehnung, der elastischen und bleibenden, von der Höhe und Art der Beanspruchung zeigt Bild 8. Wird die Beanspruchung zügig bis 12 kg/mm<sup>2</sup> gesteigert und dann auf null verringert, bleibt eine Dehnung von 0,5‰ zurück. Steigert man in einem neuen Versuch die Belastung, nimmt die Dehnung gemäß der stark ausgezogenen Linie zu, auch die bleibenden Dehnungen werden relativ größer, die Krümmung der Kurve wird immer stärker. Der in den Rechnungen verwendete Elastizitätsmodul ändert sich also mit der Höhe der aufgebrachtten Belastung. Bild 9 zeigt diese Abhängigkeiten für verschiedene Graugußsorten. Bei einer Beanspruchung von 0–6 kg/mm<sup>2</sup> wird bei GG 26 ein Elastizitätsmodul von etwa 12,5 kg/mm<sup>2</sup> zutreffen, bei einer doppelt so hohen Beanspruchung aber nur ein Wert von etwa 11 kg/mm<sup>2</sup> richtig sein. Bei Grauguß der Qualität GG 18 ist der entsprechende Wert für den Elastizitätsmodul nur noch 8 kg/mm<sup>2</sup>.

Bei den natürlichen Schwankungen der Gußqualität sind darum Versuchsergebnisse nur dann rechnerisch auszuwerten, wenn möglichst oft der Elastizitätsmodul der Bauteile mitgemessen wird.

Zum Vergleich mit den bekannten Dauerfestigkeitsschaubildern von Stahl (siehe auch Bild 7) zeigt Bild 10 die entsprechende Darstellung für einen Grauguß der Qualität GG 20. Das rechte Diagramm gibt das vollständige Dauerfestigkeitsschaubild mit dem auffallend großen Druckbereich wieder. Für den Landmaschinenbau ist die linke Darstellung mit dem herausgezeichneten Zugbereich besonders wichtig. Während bei Stahl die Begrenzungslinien nach außen gewölbt sind, zeigen die sich bei Grauguß schnell zusammenziehenden Begrenzungslinien an, wie gering bei höheren Vorbelastungen die zulässigen Spannungsamplituden sind.

#### Grenzen der Festigkeitsberechnungen

Leider gibt es meist sehr große Unterschiede zwischen den im Laborversuch bestimmten Festigkeiten von Maschinenteilen der Prototypen und der Serien-Teile. Bei der Benützung der Versuchswerte in einer Berechnung ist das zu bedenken. Berechnungen für zeitfeste Bauteile sind deshalb so schwierig, da alle Bauteile eine gewisse Streuung ihrer Festigkeit besitzen und eine noch größere Streuung der Lebensdauer damit verbunden ist. Die WÖHLERKurve ist also eigentlich nie als einfacher Kurvenzug darzustellen — sondern richtiger als Band mit einer manchmal sehr großen Breite.

Von der Festigkeitsberechnung können weder Frühausfälle, Zufallausfälle, noch Abnutzungsausfälle irgendwie bearbeitet werden. Nur Aussagen über die Gestaltfestigkeit sind möglich und der davon abhängigen Lebensdauer.

Daraus ergibt sich eine wichtige Folgerung, wenn Versuchsergebnisse in einer Berechnung weiter verarbeitet werden müssen: Ergebnisse aus Einzelversuchen an zeitfesten Bauteilen lassen sich rechnerisch nur schwer auswerten.

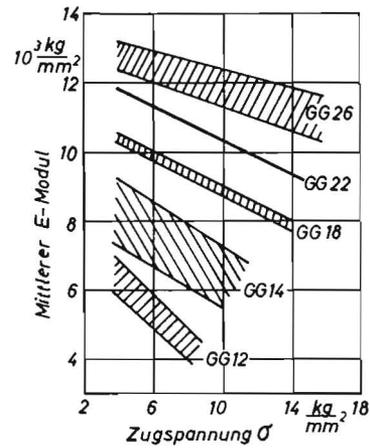


Bild 9: Der mittlere Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Größe der Zugspannung bei verschiedenen Graugußarten  
Nach MAILÄNDER und JUNGBLUTH in [1]

Im Bauteilversuch stehen oft nur wenige Teile und eine begrenzte Zeit für einen Vergleichsversuch zur Verfügung. Alle Teile werden dann meist mit einer gleich hohen Belastung im zeitfesten Bereich geprüft. Der Festigkeitsberechnung wird dennoch aufgetragen, diese Versuchsergebnisse auf den dauerhaftesten Lastbereich umzurechnen. Auf diese sehr schwierigen und für die Praxis wichtigen Zusammenhänge kann hier nicht näher eingegangen werden.

#### Definition von Sicherheitsfaktoren

Mit Hilfe der Lastannahmen wurden die vorhandenen Beanspruchungen ermittelt und aufgrund der Werkstoffeigenschaften, Form und Größe der Teile und Beanspruchung die maximal zulässigen Spannungen festgestellt.

Aber diese Arbeit ist umsonst, wenn die Rechenergebnisse nicht gedeutet werden. Ohne zahlreiche Nebenerklärungen und Einschränkungen wird die Beantwortung der Fragen verlangt: Bricht das Teil oder nicht? Wie lange kann es die wirkenden Belastungen aushalten? Je weiter die Arbeitsteilung die Aufgabengebiete der Konstrukteure, Versuchsingenieure und Berechner voneinander trennt, um so notwendiger ist eine klare und schnell verständliche Darstellung der Ergebnisse der Festigkeitsberechnungen. Das erfolgt oft am besten durch Kennwerte. Ein Beispiel dazu: Eine gute ausgewogene Konstruktion hat ein bestimmtes Verhältnis von kennzeichnender Festigkeit und entsprechender vorhandener Beanspruchung. Dieser Kennwert wird meist Sicherheitsfaktor genannt. Fast alle Festigkeitsberechnungen benutzen diese Verhältniszahl und doch ist deren Anwendung nicht immer einfach. Es gibt eine große Zahl von Fragen: Was heißt Sicherheit? Wogegen ist die Konstruktion sicher? Gegen Drehzahlerhöhung, gegen nachlassende Vorspannungen von Federn? Ist es eine Sicherheit gegen Dauerbruch, gegen Gewaltbruch? Können bleibende Verformungen auftreten? Besteht Sicherheit gegen unkontrollierbare Wärmespannungen oder Gußeigenspannungen? Wie groß muß der Sicherheitsfaktor sein?

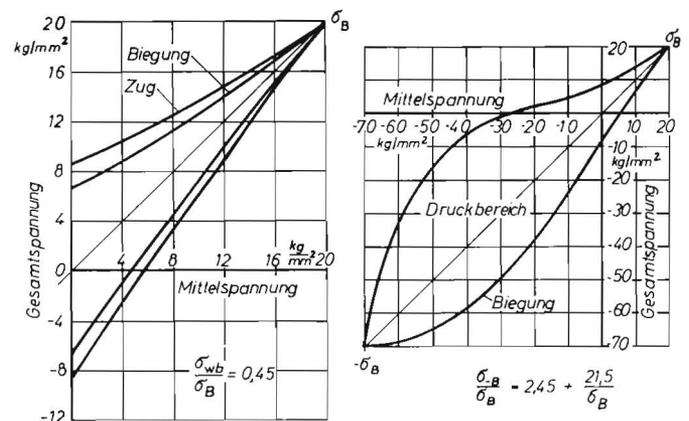
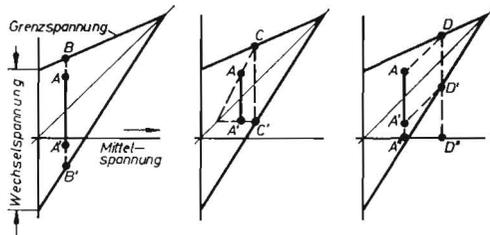


Bild 10: Dauerfestigkeitsschaubild aus Grauguß  
Zug- und Druckbruchfestigkeit  $\sigma_B = 20$  bzw.  $-\sigma_B = 70$  kg/mm<sup>2</sup>



VORSPANNUNG	konstant	konstant	veränderlich
WECHSELSPANNUNG	konstant	veränderlich	konstant
SICHERHEITSAKTOR	$S_D = \frac{BB'}{AA'}$	$S_D = \frac{CC'}{AA'}$	$S_D = \frac{DD'}{AA'}$

Bild 11: Definition von Sicherheitsfaktoren

Aus den vielen Fragen folgt eine wichtige Regel: Für jeden Sicherheitsfaktor muß seine Berechnungsweise angegeben werden. Nur auf gleiche Weise ermittelte Sicherheitsfaktoren sind vergleichbar. Ein Sicherheitsfaktor gegen Gewaltbruch ist der Quotient aus einer Bruchfestigkeit und der vorhandenen Spannung. Einen ganz anderen Wert liefert der Sicherheitsfaktor gegen Dauerbruch, das Verhältnis von Dauerfestigkeit und vorhandener Beanspruchung.

Aus der großen Zahl von Bestimmungsmöglichkeiten sollen einige Sicherheitsfaktoren besprochen werden. In Bild 11 werden drei vereinfachte Dauerfestigkeitsbilder dargestellt, wie sie etwa für Grauguß gültig sind. Unter diesen Dauerfestigkeitsschaubildern wurde vermerkt, wie sich die Belastungen bei verschiedenen Betriebsweisen ändern könnten und wie die Sicherheitsfaktoren zu definieren sind.

Die linke Darstellung in Bild 11 ist besonders anwendbar auf den Fall, wo die auf das Bauteil wirkenden Vor- und Wechsellastspannungen sich bei normaler Betriebsweise nicht ändern, aber eine Sicherheit gegen außerordentliche Einflüsse verlangt wird. Bei einer mit wechselnden Drehzahlen betriebenen Maschine ändern sich die Massenkräfte ständig und damit auch die Wechsellastspannungen. Das mittlere Bild gibt eine Vorschrift zur Bestimmung eines Sicherheitsfaktors, der zum Beispiel die Empfindlichkeit einer Pleuelstange gegen Überdrehzahlen anzeigt. Oft sind die Betriebsbeanspruchungen als Wechsellastspannungen recht genau bekannt, aber die vorhandene Vorspannung ungewiß. Überall, wo in solchen Fällen mit Gußeigenbeanspruchungen oder der Änderung von Schrauben-Vorspannkräften gerechnet werden muß, gibt die rechte Darstellung in Bild 11 eine Anweisung zur Berechnung eines Sicherheitsfaktors.

Größe	Bezeichnung	Ermittelt aus
<b>Alte Konstruktion 1</b>		
1	erste Ribstelle 	Erfahrung
2	zul. Nennspannung, Dauerfestigkeitsdiagramm Kerbfaktor	$\sigma_{zul1}$ Versuch Zeichnung, Literatur Rechnung
3	größte zul. Belastung max. Zünddrucke, Drehzahlen max. Zünd- und Massenkräfte	$P_1, n_1$ Feld, Versuch $P_1, P_{m1}$ Rechnung
4	vorhand. Nennspannung, Sicherheitsfaktor	$\sigma_{v1}$ Rechnung $s_1 = \frac{\sigma_{zul1}}{\sigma_{v1}}$ Dauerfestigkeitsdiagramm
<b>Neue Konstruktion 2</b>		
5	Kerbfaktor zul. Nennspannung, Dauerfestigkeitsdiagramm	$\alpha_{b2} \cdot f \left( \frac{R \cdot W \cdot B}{\sigma \cdot \sigma \cdot \sigma} \right)_2$ Zeichnung, Literatur Berechnung $\sigma_{zul2} = \sigma_{zul1} \cdot \frac{\alpha_{b1}}{\alpha_{b2}}$ Rechnung
6	größte Belastungen max. Zünddrucke, Drehzahlen max. Zünd-, Massenkräfte	$P_2, n_2$ Erfahrung, Entwurf $P_2, P_{m2}$ Rechnung
7	vorhand. Nennspannung, Sicherheitsfaktor	$\sigma_{v2}$ Rechnung $s_2 = \frac{\sigma_{zul2}}{\sigma_{v2}}$ Dauerfestigkeitsdiagramm

Bild 12: Festigkeitsberechnung einer Kurbelwelle

Wie groß sollen die Sicherheitsfaktoren sein? Da Sicherheitsfaktoren Erfahrungswerte sind, können keine allgemeingültigen Richtwerte angegeben werden. Meist werden Sicherheitsfaktoren von 1,3 bis 2,0 notwendig sein.

### Die praktische Anwendung

Zum Schluß soll an einem Beispiel gezeigt werden, wie etwa bei einer Festigkeitsberechnung vorgegangen werden kann. Wenn auch das Beispiel stark vereinfacht wurde, so kann es doch zeigen, in welcher Weise die Erfahrungen mit vorhandenen Konstruktionen ausgenutzt werden können.

Es sei die Aufgabe gegeben, die Belastungsgrenzen eines Kurbeltriebes zu ermitteln. Das kann ein Kurbeltrieb für eine Stroh- oder Wasserpumpe oder einen Dieselmotor sein. In jedem Fall werden Pleuel und Kurbelwelle durch Massenkräfte und Arbeitsdrücke beansprucht. Mit der Nachrechnung der Kurbelwellenkonstruktion soll begonnen werden.

In Bild 12 wird in sieben Abschnitten der Berechnungsgang dargestellt. Wie in jedem Fall muß auch hier die Berechnung mit der Auswertung der Erfahrungen beginnen, um die Möglichkeit zu schaffen, von einer altbewährten und in ihren Anwendungsgrenzen bekannten Konstruktion (Index 1 in Bild 12) auf eine nur zeichnerisch dargestellte Neukonstruktion (Index 2) zu extrapolieren.

Aus der Erfahrung sei die Stelle mit der höchsten Beanspruchung bekannt, der eigene Versuch lieferte das Dauerfestigkeitsdiagramm für die zulässigen Nennspannungen, in der alle Erfahrungen über die Herstellungsweise der bewährten Kurbelwellen eingeschlossen sind. Zur späteren Verwendung wird mit Hilfe der Zeichnung und vorhandener Erfahrungen aus der Literatur [3] der Kerbfaktor  $\alpha_{b1}$  für diese Kurbelwelle ausgerechnet. Durch Befragung des Kundendienstes und des eigenen Versuches können die maximal zulässigen Drehzahlen und Zünddrücke festgestellt werden. Damit gelingt die Berechnung der Kräfte und der vorhandenen Nennspannungen. Der Sicherheitsfaktor  $S_1$  für die vorhandene Konstruktion wird nach den in Bild 11 gegebenen Regeln bestimmt. In diesen Sicherheitsfaktor werden nun alle Erfahrungen aus dem Versuch, der Produktion, der Betriebsweise und alle Eigenarten der Berechnung zusammengefaßt. Nachdem in vier Schritten die wichtigsten Daten für die vorhandene Konstruktion ermittelt wurden, wird die Festigkeitsberechnung für die neukonstruierte Kurbelwelle möglich.

Zuerst wird der Kerbfaktor  $\alpha_{b2}$  nach der Zeichnung bestimmt, dann die zulässige Biegewechselfestigkeit für die neue Welle errechnet. Die einander entsprechenden Festigkeitswerte für die bewährte Kurbelwelle werden mit dem Verhältnis der Kerbfaktoren beider Wellen multipliziert. Das ist in dieser einfachen Weise möglich, wenn Herstellungsweise und Härteverfahren für beide Kurbelwellen ähnlich sein sollen. Mit den durch das Konstruktionsziel festgelegten Angaben über Mindestdrehzahlen und

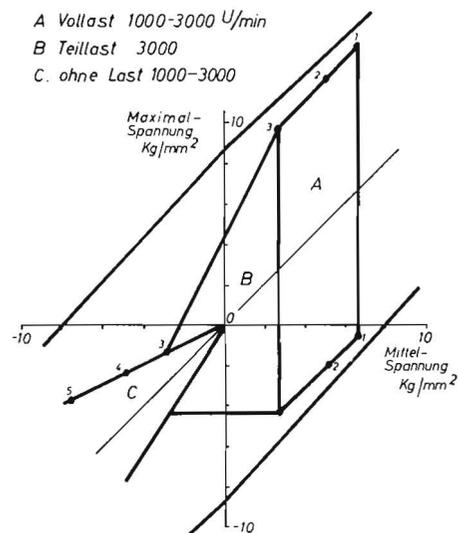


Bild 13: Ausschnitt aus dem Dauerfestigkeitsschaubild einer Kurbelwelle  
Siehe auch [2]

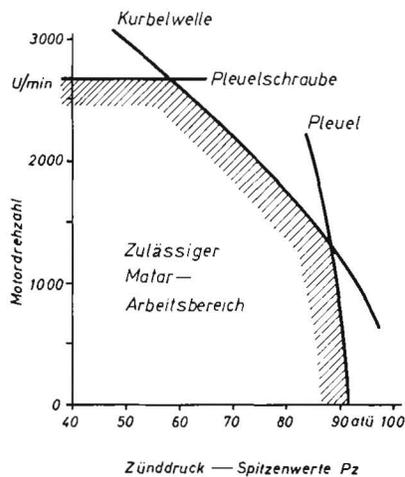


Bild 14: Zulässige Belastung eines Kurbeltriebs

erwünschte Zünddrücke lassen sich für die neue Kurbelwelle die vorhandenen Nennspannungen errechnen und zur besseren Übersicht zeichnerisch darstellen (Bild 13). Leicht läßt sich aus diesem Bild erkennen, wo die vorhandenen Beanspruchungen bei verschiedenen Betriebsweisen A, B, und C nahe an die Linien der zulässigen Beanspruchungen herankommen. In unserem Beispiel ist die rechts in Bild 13 eingezeichnete Spannungsamplitude 1—1 am gefährlichsten; damit wird die bekannte Erfahrung bestätigt, daß Kurbelwellenbrüche bei Dieselmotoren bei geringen Drehzahlen und hohen Zünddrücken zu erwarten sind.

Wird nun der gleiche Motor für viele verschiedene Anwendungsarten gebaut, lassen sich die zulässigen Betriebsbereiche für die Kurbelwelle nicht übersichtlich in der in Bild 13 aufgezeichneten Weise darstellen. Um auch eine schnelle Auskunft bei neuen Anwendungsweisen zu geben, wurde Bild 14 errechnet und gezeichnet. Statt von Zünddrücken und Drehzahlen auszugehen, kann man auch den durch Erfahrung nach Bild 12 ermittelten Sicherheitsfaktor  $S$  für die neue Konstruktion vorschreiben und damit die zulässigen Zünddrücke  $P_{Z\text{zul}}$  und Drehzahlen  $n_{\text{zul}}$  ausrechnen: Faßt man das Dauerfestigkeitsschaubild in Gleichungen, ergibt sich folgende vereinfachte Beziehung

$$P_{Z\text{zul}} = \frac{C_1 \sigma_{bn} - C_2 n_{\text{zul}}^2}{S - C_3} \quad (1)$$

mit der Biegewechselfestigkeit  $\sigma_{bn}$  und den für die neue Kurbelwelle errechneten Konstanten  $C_1$ ,  $C_2$  und  $C_3$ . Die gleiche Berechnungsweise kann in ähnlicher Form auch auf Pleuel und Pleuelschraube und andere Teile des Kurbeltriebes angewendet werden.

Das Bild 14 zeigt anschaulich, daß bei Zünddrücken bis 60 atü die Motordrehzahl durch Kurbelwelle und Pleuelschraube begrenzt wird. Ist bei diesen Zünddrücken die Motordrehzahl im Schlepper etwa 1800 U/min, könnte die gleiche Maschine im Mährescher ohne Schaden für die Kurbelwelle mit 2400 U/min laufen. Wird dieser Motor aufgeladen und damit hohe Zünddrücke haben, muß die Kurbelwelle und auch das Pleuel verstärkt werden.

Das letzte Beispiel kann nun noch rechnerisch erheblich verfeinert werden. Aber die Berechnung wird nur in demselben Maße an Treffsicherheit gewinnen, wie die Erfahrungen über die wirkenden Kräfte und die bei allen Beanspruchungsweisen vorhandenen Festigkeiten zunehmen. Wenn auch unsere Festigkeitsberechnungen im Landmaschinenbau heute manchmal nur grobe Annäherungen sind, können wir mit diesen so billigen Hilfsmitteln viele Fehler unserer Konstruktion schon aussieben, wenn die Maschine noch im Entwurf ist oder deren Teile gerade gezeichnet werden.

### Zusammenfassung

Nach einer kurzen Besprechung der Aufgaben der Festigkeitsberechnung im Werdegang der Konstruktion werden vor allem Einzelfragen der praktischen Durchführung diskutiert.

Die Wahl der richtigen Lastannahmen wird als erste sehr schwierige Frage behandelt. Hieran schließen sich Ausführungen über die Ermittlung der Festigkeit der einzelnen Bauteile. Da in der Praxis Festigkeitsberechnungen oft nur Abschätzungen sein kön-

nen, ist die Deutung und Darstellung der Berechnungsergebnisse besonders wichtig.

Abschließend wird auf die Schwierigkeit, errechnete Ergebnisse in eine für die Konstruktion oder den Versuch brauchbare Aussage zu übersetzen, eingegangen. Ein vereinfachtes kurzes Beispiel soll zeigen, wie die Festigkeitsberechnungen auch im Landmaschinenbau nützlich angewendet werden können.

### Schrifttum

- [1] PIWOWARSKY, E.: Hoehwertiges Gußeisen (Grauguß). Berlin/Göttingen/Heidelberg 1961
- [2] HOLLIDAY, F. R.: Use of Allowable Stress Diagrams for Designing Automotive Parts. SAE-Paper 572 E, National Farm — Construction and Industrial Machinery Meeting, Milwaukee 1962
- [3] STAHL, G.: Über die Spannungen in einteiligen und gebauten Kurbelwellen. Dissertation, TH Braunschweig 1957

### Résumé

Gerhard Welschof: "Stability Computations in Agricultural Machinery Construction and Their Limits."

After discussing briefly the tasks of stability computations above all individual questions regarding the practical execution are dealt with.

The correct choice of the loads acting on the individual parts is the first problem. Then comments on the determination of the stability of the individual structural parts are made. Since in practice stability computations are often only assessments, the interpretation and representation of the results of computation are especially important.

In conclusion the question is discussed in how far the results obtained are of informative value to the construction or the experiment. A simplified, brief example shows how stability computations can be used to good advantage also in agricultural machinery construction.

Gerhard Welschof: Les calculs de résistance dans la construction de machines agricoles et leurs limites.

Après avoir mentionné brièvement les objectifs du calcul de résistance au cours de l'étude de machines agricoles, l'auteur traite en particulier des questions de détail de la réalisation pratique.

Le premier problème très difficile qu'il évoque, est le choix de charges convenables. Il s'occupe ensuite de la détermination de la résistance des différentes pièces de construction. Etant donné que les calculs de résistance ne peuvent être pour la pratique que des approximations, l'interprétation et la reproduction des résultats de calculs sont particulièrement difficiles.

Enfin, l'auteur souligne les difficultés de traduire les résultats de calcul en une forme utilisable lors de l'étude et de l'essai. Un exemple simplifié doit montrer comment on peut appliquer utilement les calculs de résistance à la construction de machines agricoles.

Gerhard Welschof: «Cálculos de resistencia en la construcción de máquinas agrícolas y sus límites.»

Después de breves consideraciones en cuanto a la finalidad del cálculo de resistencia en la construcción, se trata de cuestiones de detalle prácticas.

En primer lugar se habla de la carga supuesta acertada como problema de difícilísima solución, siguiendo entonces consideraciones sobre la averiguación de la resistencia de los diferentes elementos. Como en la práctica los cálculos no pasan de ser suposiciones, con mucha frecuencia, la presentación y la interpretación de los resultados tiene una importancia primordial.

A continuación se trata de la dificultad de trasladar los resultados obtenidos en valores útiles para la construcción o para el ensayo. Con un ejemplo simplificado se trata de explicar la manera de aplicar los cálculos de resistencia también a la construcción de máquinas agrícolas.

### DIN-Normblatt-Verzeichnis 1964

Herausgegeben vom Deutschen Normenausschuß (DNA). Berlin 15 und Köln: Beuth-Vertrieb GmbH. 1964. DIN A 5. 544 S. Brosch. 13,— DM. (Abgeschlossen März 1964).

Normblatt-Verzeichnis 1964 mit den Nummern, Titeln und Ausgabedaten der zur Zeit gültigen 11600 deutschen Normen und Norm-Entwürfen.