

ÜBER DAS MESSEN VON KRÄFTEN UND SPANNUNGEN IN DER LANDTECHNIK

Von W. Kloth

Auf der Konstrukteurtagung wurden Kraft- bzw. Dehnungsmessungen mit verschiedenen Geräten von Dipl.-Ing. Thiel und Dr.-Ing. Haack praktisch vorgeführt. Dr.-Ing. Bergmann führte Spannungsmessungen mit Reisslackverfahren und Tensometern vor.

Es besteht wohl kaum noch ein Zweifel darüber, dass man eine Maschinenkonstruktion umso treffsicherer, insbesondere hinsichtlich Haltbarkeit und Werkstoffaufwand, bauen kann, je besser man über die Kräfte unterrichtet ist, die beim Betrieb einer Maschine auftreten und über die Spannungen, welche diese Kräfte in den Maschinenteilen hervorrufen. Wenn es früher üblich war und auch heute grösstenteils noch üblich ist, die Bemessung der Maschinenteile im wesentlichen nach allgemeinen Erfahrungen vorzunehmen und notfalls so lange zu verstärken, bis keine Brüche mehr auftreten, so besteht heute die Möglichkeit, die Konstruktionen in dieser Hinsicht von vornherein auf soliderer Grundlage aufzubauen. Sei es nun, dass aus der Fachliteratur Angaben über Kräfte entnommen werden können oder dass an der in Frage stehenden Maschine selbst entsprechende Messungen durchgeführt werden. Es bietet heute kaum technische Schwierigkeiten, an jeder Landmaschine während der Arbeit die Kräfte zu messen und in irgendeinem Maschinenteil die dadurch ausgelösten Spannungen zu bestimmen. Dies führt in weiten Kreisen zu dem Wunsch, die heutigen Messmöglichkeiten kennenzulernen und – falls die Voraussetzungen dafür gegeben sind – auch selbst einmal solche Untersuchungen durchzuführen. Diese Ausführungen sollen die Grundlagen der heutigen Verfahren vermitteln und daraus Gesichtspunkte für ihren Einsatz ableiten.

Messungen von Kräften

Vorweg sei darauf hingewiesen, dass man auch ohne alle Messgeräte schon wichtige Erkenntnisse sammeln kann durch eine sorgfältige Schadensstatistik und eine richtige Auswertung der Schäden. Die Richtung der Kräfte ist meistens ungefähr bekannt, sie lässt sich auch aus der Lage des Bruches oder der Verbiegungen ableiten. Die Grösse der Kräfte kann dann durch Nachrechnung aus Querschnitts- und Werkstoffdaten bestimmt werden. Es muss dabei beachtet werden, ob ein Gewalt- oder ein Dauerbruch vorliegt. Nur bei ersterem (also körnigem Bruch) oder bei Verbiegungen ist die Auswertung möglich. Wenn solche Daten über eine Reihe von Jahren hinweg ge-

sammelt werden, bilden sie ein wichtiges Material, das über den Einzelfall hinweg von Bedeutung für künftige Konstruktionsgrundlagen sein kann.

Dieses Verfahren lässt sich in vielen Fällen durch behelfsmässige Messungen ergänzen. Es wurden z.B. die Kräfte zum Auswerfen der Garben eines Bindemähers dadurch gemessen, dass an geeigneter Stelle eine Stahlkugel eingeschaltet wurde, welche sich in ein Stück weiches Eisen eindrückte. Aus der Grösse des Eindruckes konnte man auf die Höchstkraft schliessen.

Auch aus der Durchbiegung von Maschinenteilen, die mit der Messuhr zu messen ist, kann man, wenn sie langsam verläuft, auf die Kräfte schliessen. Man kann auch geeichte Federn in den Kraftfluss einschalten und aus dem Federweg die Kraft bestimmen. Auch kleine handelsübliche Zugkraftschreiber lassen sich dafür verwenden. Es wurden auch Drehkraftmesser gebaut, die die Durchbiegung von Indikatorfedern durch einen Lichtpunkt auf einen Filmstreifen aufzeichneten und gestatteten, den Kraftfluss in einem Bindemäher an fünf Stellen gleichzeitig zu messen [1].

Man kann auch leicht herzustellende hydraulische Messdosen in den Kraftfluss einschalten und die Kraft an einem Manometer ablesen oder durch einen Indikator aufschreiben lassen [2].

Die neuzeitlichen Verfahren zur Kraftmessung [3] gehen fast alle auf Dehnungsmessungen an den Maschinenteilen zurück. Man misst dabei ohne Veränderung des konstruktiven Aufbaues mit einem geeigneten Gerät bei dem praktischen Einsatz der Maschine die Dehnungen z.B. in einem Achsschenkel und stellt nachträglich durch Eichungen fest, welche Kräfte bestimmte Dehnungen hervorrufen. Eine Änderung der Maschine ist also durch den Einbau der Messgeräte nicht erforderlich. Bewährt haben sich für diesen Zweck die bekannten Ritz-Dehnungsschreiber der DVL, die die Dehnung auf einer Messstrecke von 200 mm durch einen Diamanten in natürlicher Grösse auf einen kleinen Glaszylinder aufschreiben. Die Aufschreibungen müssen nachträglich unter einem Mikroskop ausgewertet werden. Wenn auch die Geräte durch ihre Einfachheit bestechen, so haben sie doch den Nachteil, dass eine Messlänge von 200 mm in vielen Fällen entweder gar nicht verfügbar ist oder dass die Dehnung über die Messlänge so verschieden ist, dass nur mit Vorsicht Schlüsse daraus gezogen werden können.

Aus der letzteren Tatsache folgt ganz allgemein ein Streben nach Verkleinerung der Messlänge. Diese Bedingung erfüllen heute fast nur die elektrischen Dehnungsmesser. Man verwendet in der Hauptsache zwei Arten:

1. Widerstandsgeber (Dehnungsmesstreifen, strain-gages),
2. induktive Geber.

Bei den Widerstandsgebern (Dehnungsmesstreifen) handelt es sich um kleine Blättchen aus Papier oder Kunststoff von 2–3 cm² Grösse, in denen dünne Widerstandsdrähte eingebettet sind (Bild 1). Diese Blättchen werden, ähnlich einem Heftpflaster, auf die zu untersuchende Stelle des Maschinenteiles geklebt. Bei Beanspruchungen entstehen kleine Dehnungen in den Maschinenteilen und dementsprechend auch in den Widerstandsdrähten. Ihr elektrischer Widerstand und damit auch ein kleiner elektrischer Strom, der hindurchgeschickt wird, ändern sich proportional den Dehnungen. Dieser Strom wird verstärkt und umgewandelt, sodass er an einem geeigneten Messgerät abgelesen werden oder als Kurve aufgezeichnet werden kann [4].

Ein induktiver Dehnungsgeber besteht aus einer kleinen Spule von etwa 10 mm Länge, in der sich ein Eisenkern entsprechend der Dehnung des Maschinenteiles verschiebt (Bild 2). Dadurch ändert sich der induktive Widerstand der Spule und die Stärke eines hindurchgeschickten Wechselstromes. Diese kleinen Stromänderungen können wie oben angezeigt werden.

Ein anderes Verfahren beruht darauf, dass zwei kleine Kondensatorplatten ihren Abstand entsprechend den Dehnungen ändern und damit den kapazitiven Widerstand der Anordnung. Eine solche Einrichtung ist jedoch störanfälliger als die obige und wird daher weniger gebraucht.

Für Druckmessungen kann man auch Quarzkristalle verwenden, da auf ihnen elektrische Ladungen entstehen, die proportional dem Druck sind (Quarz-Indikator für schnell laufende Verbrennungsmotoren). Die elektrischen Ladungen werden verstärkt und gemessen. Eine Voraussetzung bei dem Verfahren, die nicht leicht zu erfüllen ist, ist eine sehr gute Isolation. Längere Zeit hindurch wirkende gleichbleibende Drücke können nicht gemessen werden, da die Ladungen leicht abfliessen und nur bei Änderung des Druckes neue Ladungen entstehen.

Druckmessungen sind auch nach dem Magnetostruktions-Verfahren möglich, wobei die Eigenschaft bestimmter Stähle ausgenutzt wird, ihre magnetische Permeabilität proportional dem Druck zu ändern. Damit ändert sich auch der induktive Widerstand einer darübergesteckten Spule. Das Verfahren kommt praktisch nur für grössere Drücke in Frage.

Wie erwähnt, kommen heute von den elektrischen Messverfahren nur die beiden erstgenannten in Frage, nämlich die Verwendung von Widerstandsgebern oder induktiven Gebern. Die Geber selbst sind sehr einfach; auch das Aufkleben bzw. Verlöten ist bei Be-

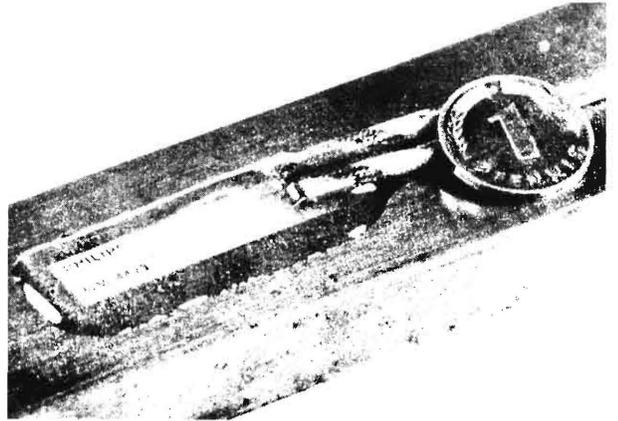


Bild 1. Dehnungsmesstreifen, aufgeklebt.

achtung gewisser Regeln nicht schwierig. Schwierigkeiten entstehen erst beim Weiter-, „verarbeiten“ der recht kleinen Mesströme. Schon die Erzeugung des Speisestromes bringt eine Komplikation, denn meist handelt es sich um einen Wechselstrom von etwa 5000 Hz, wozu meist ein Röhrengenerator benutzt wird. Dazu erfordert die Verstärkung der schwachen Mesströme Röhren, wie sie aus der Rundfunktechnik ja bekannt sind. Wenn die Messungen auf dem Acker durchgeführt werden sollen, wo kein Netz zur Verfügung steht, braucht man Akkus und Anodenbatterien bzw. Umformer. Für die elektrische Anordnung sind verschiedene Schaltungen im Gebrauch. Dabei ist auch wieder zu beachten, ob die meist schwankenden Messgrössen auch einmal eine Zeitlang gleich gross bleiben können, da nicht alle Anordnungen solche Betriebsverhältnisse wiedergeben [5].

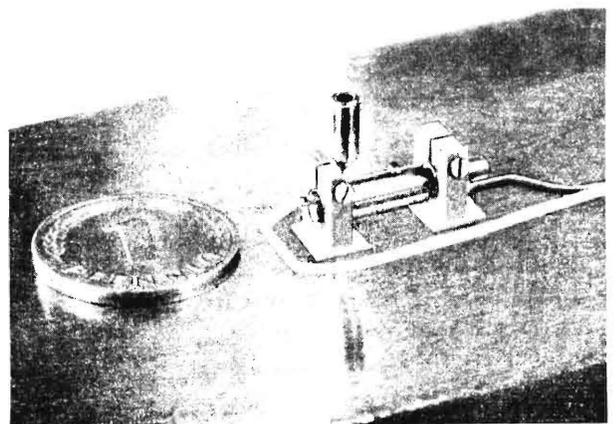


Bild 2. Induktiver Dehnungsgeber, aufgesetzt.

Man kann die „aufbereiteten“ Mesströme einem Zeigerinstrument zuführen oder, wie es meistens nötig ist, als Kurve aufschreiben lassen. Dies bringt aber wieder eine Komplikation, da das praktisch heute nur mit einem Schleifenzillographen, einem empfindlichen und teuren Gerät, möglich ist. In ihm bewirken die gleichgerichteten Mesströme den Ausschlag eines Galvanometers, das einen kleinen Spiegel trägt und durch einen feinen Lichtstrahl eine Kurve

auf einem lichtempfindlichen Papier schreiben lässt. Auch der Oszillograph braucht Netzanschluss bzw. Akkus zu seinem Betrieb. Er kann je nach der Zahl der Messschleifen drei oder auch mehr Vorgänge gleichzeitig aufschreiben. Die elektrische Apparatur wird zweckmässig in einem Messwagen untergebracht (Bild 3), der mit der zu untersuchenden Maschine bzw. den Gebern durch Kabel in Verbindung steht. Die Bedienung der Anlage erfordert ein erhebliches Mass von Sachkenntnis.

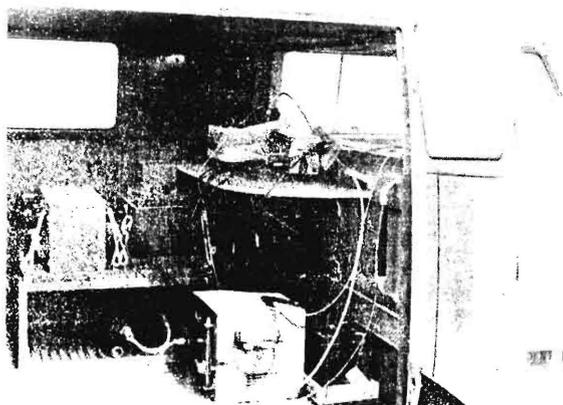


Bild 3. Blick in Messwagen mit eingebauter elektrischer Apparatur.

Ein besonderer Vorteil der elektrischen Verfahren liegt noch darin, dass man mehrere Grössen gleichzeitig messen kann, also z.B. die Spannungen an mehreren Stellen der Maschine. Man kann aber auch gleichzeitig verschiedene mechanische Grössen messen, z.B. Kräfte, Dehnungen, Beschleunigungen, Geschwindigkeiten, usw. Dadurch lassen sich Zusammenhänge zwischen diesen Grössen sehr gut aufklären.

Darstellung der Messergebnisse

Es ist ein besonderes Kennzeichen für die Messgrössen, mit denen es der Landtechniker zu tun hat, dass sie sehr stark schwanken. Aus diesem Grunde muss man auch statt der Zeigergeräte schreibende Geräte verwenden, wenn es sich nicht um ganz einfache orientierende Messungen handelt. Die Art der Auswertung der gewonnenen Diagramme muss sorgfältig überlegt werden. Für einfachere Ansprüche kann man mit Mittelwerten arbeiten oder mit besonders hohen Spitzenwerten, die man einzeln ausmisst. Für anspruchsvollere Untersuchungen muss man aus den Diagrammen Häufigkeitskurven ermitteln, wie es schon an anderen Stellen beschrieben ist [6]. Man kann daraus je nach der Lage des Falles die am häufigsten auftretenden Kräfte usw. bestimmen oder auch grösste Kräfte, die noch mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind. Diese Kräfte muss man dann etwa bei der Ermittlung von Spannungsfeldern an den einzelnen Maschinenteilen zugrundelegen.

Ermittlung von Spannungsfeldern

Mit den beschriebenen elektrischen Dehnungsmessern werden, wie erwähnt, zunächst Dehnungen bestimmt, aus denen sich nach dem Hooke'schen Gesetz Spannungen berechnen lassen. Dies ist aber mit Rücksicht auf den Aufwand nur an einzelnen Punkten einer Maschine möglich. In Wirklichkeit interessieren aber die Spannungen über die ganze Oberfläche eines Maschinenteiles hinweg, da sie von Punkt zu Punkt recht verschieden sind. Um etwa die Gestalt eines Bauteiles den Spannungen anzupassen, muss man das ganze Spannungsfeld in dem kritischen Gebiet kennen. Solche Untersuchungen lassen sich praktisch nur bei ruhender Belastung einzelner Maschinenteile in geschlossenen Räumen durchführen. Es ist wichtig, dass dies heute möglich ist, da eine Berechnung aufgrund der Gesetze der Festigkeitslehre schon bei einigermaßen verwickelten Bauteilen der Praxis versagt.

Ein wichtiges Hilfsmittel bei diesen Spannungsmessungen bilden die sogenannten Reisslacke. Das Maschinenteil wird sorgfältig gereinigt und blank gemacht, dann wird der Lack aufgebracht. Bei dem *Maybach'schen* Dehnungslinienverfahren besteht der Lack aus einer Mischung von 70 % Kollophonium und 30 % Dammar-Harz. Er wird in Stangen gegossen und warm mit der Lötlampe aufgetragen. Bei dem neueren amerikanischen *Stress-coat*-Verfahren wird der gelöste Lack kalt aufgespritzt.

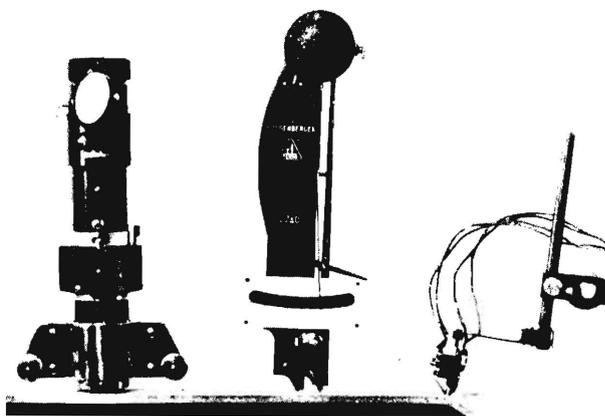


Bild 4. Statische Feindehnmessers,
(links) mit optischer Übersetzung,
(Mitte) mit mechanischer Übersetzung und
(rechts) mit elektrischer Übersetzung der Dehnung.

Wenn man die so vorbereiteten Maschinenteile mit der aus den Kraftmessungen ermittelten massgebenden Kraft statisch belastet, entstehen im Lack feine Risse senkrecht zur Richtung der grössten Dehnung [7]. Aus diesen Rissen kann man die Richtung der Spannungen ablesen, bei dem amerikanischen Verfahren aus den ersten auftretenden Rissen auch mit ausreichender Genauigkeit die Grösse der Spannung. Die Lacke sind temperatur- und feuchtigkeits-

empfindlich, und ihre Handhabung erfordert einige Übung.

Ausser der Richtung der Spannungen muss man in jedem Fall auch ihre Grösse kennen. Wenn man sie nicht aus den Lackrissen ermitteln kann oder will, muss man sie mit Feindehnungsmessern messen (Bild 4). Diese Geräte haben eine Messlänge von 10 mm oder weniger und werden senkrecht zu den Rissen angeklemt. Durch eine mechanische, optische und elektrische Übersetzung zeigen sie die kleinen Dehnungen der Messlänge mit einer Vergrösserung von 1000 oder mehr an.

Das besondere Interesse gilt den Stellen besonders hoher Spannungen, den Spannungsspitzen, die der Ausgangspunkt für Brüche sind. Bei entsprechender Erfahrung über die Zusammenhänge zwischen Spannung und Gestalt kann man angeben, wie die Gestalt des Bauteiles zu ändern ist, um die Spannungsspitzen abzubauen. Die Spannungsspitzen überragen die Spannungen in ihrer Umgebung oft um das 5–10fache. Sie sind für die Haltbarkeit des Maschinenteiles entscheidend, wenn sie auch nur an eng begrenzten Flächen auftreten. Sollte das Maschinenteil in der Praxis trotzdem halten, so wird der umgebende Werkstoff in diesem Falle nur bis zu $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{10}$ ausgenutzt, was eine erhebliche Verschwendung bedeutet.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass es heute technisch möglich ist, auch unter den schwierigen Betriebsverhältnissen der Landtechnik sowohl die Kräfte als auch die Spannungen in den Maschinenteilen zu ermitteln. Damit sind Möglichkeiten für wesentliche Einsparungen und Verbesserungen er-

öffnet. Wenn die einzusetzenden Verfahren z.T. verwickelt und teuer sind, sodass sie sich manche Firmen nicht selbst leisten können, so dürften entsprechend eingerichtete Institute gern bereit sein, hier zu helfen.

Schrifttum

- [1] *Stoppel, Th.*: Kräfte und Beanspruchungen in Bindemähern. RKTL-Schrift 88 (4. Konstrukteurheft) S. 19/29. Berlin 1938.
- [2] *Kühne, G. und A. König*: Forschungsarbeiten in der Bodenrinne. Halle 1932.
Getzlaff, G.: Messung der Kraftkomponenten an einem Pflugkörper. Grundlagen der Landtechn. Heft 1 (9. Konstrukteurheft) S. 16/17. Düsseldorf 1951.
- [3] *Erker, A. und O. Svenson*: Kraftmessungen bei wechselnder Beanspruchung. Arch.Techn.Messen (1951) V 131–1, T 25 / T 27.
Peppler, W.: Der Versuch als Grundlage beanspruchungsgerechter Konstruktion. Z.VDI 94 (1952) S. 873/78.
Schwaigerer, S.: Experimentelle Ermittlung der Spannungen in Bauteilen. Z.VDI 94 (1952) S. 1025/36.
- [4] *Fink, K.*: Grundlagen und Anwendungen des Dehnungsmesstreifens. Verlag Stahleisen, Düsseldorf 1952.
- [5] *Thiel, R.*: Zur Praxis der dynamischen Dehnungsmessung. Arch.Techn.Messen (ATM), 1953, J. 135 (erscheint demnächst).
- [6] *Kloth, W. und Th. Stoppel*: Kräfte, Beanspruchungen und Sicherheiten in den Landmaschinen. Z.VDI 80 (1936) S. 85/92.
- [7] *Bergmann, W.*: Fortschritte und Erfahrungen auf dem Gebiete der Dehnlinienverfahren. In: Experimentelle Spannungsanalyse. Vorträge auf der gleichbenannten Arbeitstagung am 7. und 8. Okt. 1952 in Düsseldorf (in Vorbereitung).
Bergmann, W.: Neue Erkenntnisse über beanspruchungsgerechte Gestaltung. In diesem Heft.

Institut für Landtechnische Grundlagenforschung
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig- Völkenrode

Anschrift des Verfassers: Prof. Dr.-Ing. W. Kloth, (20b) Braunschweig, Forschungsanstalt für Landwirtschaft