

Möglichkeiten der Aufstellung von Belastungsannahmen zur Festigkeitsberechnung an mobilen Landmaschinen

Dipl.-Ing. A. Lorenz, KDT/Dipl.-Ing. B. Kritzner, VEB Kombinat Fortschritt Landmaschinen Neustadt in Sachsen

1. Einleitung

Für den Festigkeitsnachweis an Landmaschinen ist die Kenntnis der auftretenden Belastungen eine wesentliche Voraussetzung. Das betrifft sowohl den rechnerischen Haltbarkeitsnachweis im Entwicklungsstadium als auch die Nachrechnung bei Schadensfällen oder bei technologisch bedingten Änderungen.

Obwohl zu dieser Thematik ein allgemeines Interesse besteht, findet man in der Literatur kaum Veröffentlichungen. Die Ursache liegt in der Kompliziertheit der Vorgänge.

Unter Lastannahmen wird im folgenden die Gesamtheit der Lastfälle verstanden, die der Bemessung eines Erzeugnisses zugrunde gelegt werden. Dabei ist ein Lastfall ein aus der Betriebsbelastung herausgegriffener und idealisierter, charakteristischer Belastungszustand, der für die Bemessung maßgebend sein kann.

Bei der Dimensionierung der Fahrgestelle mobiler Landmaschinen sollte zweckmäßig von den Belastungen ausgegangen werden, die von außen über die Räder bzw. Aufsattelpunkte auf die Maschine einwirken.

Bei der Durchführung von Festigkeitsberechnungen an Landmaschinen ist immer wieder feststellbar, daß gerade den Belastungsannahmen eine grundlegende Bedeutung zukommt. Fehler von 10% bei den Belastungsannahmen verursachen in den auf Ermüdungsfestigkeit ausgelegten Bauteilen eine Verminderung bzw. Erhöhung der Lebensdauer um den Faktor 1,5! Damit soll belegt werden, daß die Erhöhung der Genauigkeit der Lastannahmen eine vordringliche Aufgabe ist.

2. Möglichkeiten zur Aufstellung von Lastannahmen für die Berechnung der Fahrgestelle mobiler Landmaschinen

Die Aufstellung von Lastannahmen zur Berechnung der Fahrgestelle mobiler Landmaschinen ist kompliziert, weil die einwirkenden Belastungen aufgrund der Vielfalt der Einsatzverhältnisse sehr unterschiedlich sein können. Zum Nachweis der Serienreife von neuen Landmaschinen werden daher immer wieder umfangreiche Messungen der einwirkenden Belastungen durchgeführt, um mit statistischer Auswertung der Meßaufzeichnungen sowie durch verschiedene Sonderversuche die wesentlichen Unterlagen zu erarbeiten, die für die Dimensionierung benötigt werden. Die Messungen gestatten die Formulierung der genauesten Lastannahmen, haben jedoch neben oft erheblichen Kosten den Nachteil, daß für ihre Durchführung schon ein Prinzipmuster mit möglichst genau den gleichen Parametern vorliegen muß, wie die später zu bauende Maschine aufweisen wird. Unter diesen Umständen kommt der ersten Dimensionierung einer Maschine besonders große Bedeutung zu.

Bei dieser ersten Dimensionierung müssen die Belastungen auf theoretischem Weg erstellt werden. Hierzu sind große Erfahrungen erforderlich, weil verallgemeinerungsfähige Lösungen bisher noch nicht bekannt geworden sind. Eine weitere Tatsache ist, daß mit den gemessenen

Höchstlasten rechnerisch dimensionierte Tragwerke zu schwer werden. Offensichtlich ist die Ursache für diesen Sachverhalt darin zu suchen, daß die gemessenen Höchstlasten praktisch nie gleichzeitig auftreten (Korrelationsanalyse) und daß die üblichen Festigkeitswerte den Einfluß der meist sehr hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten nicht berücksichtigen. Deshalb werden die gemessenen einwirkenden Höchstlasten auf der Grundlage des vorhandenen Erfahrungsrücklaufs des jeweiligen Bearbeiters für Neuentwicklungen abgemindert. Um einem größeren Kreis von Ingenieuren die vorhandenen Erfahrungen darzulegen und damit Hinweise für das Herangehen zu geben, werden im folgenden die in den vergangenen Jahren entwickelten Verfahren vorgestellt. Herausgebildet haben sich vier verschiedene Vorgehensweisen, die sich gegenseitig ergänzen können:

- Sammlung von Meßwerten und Ausarbeitung eines Anwendungsalgorithmus
- Verallgemeinerung gemessener Belastungsgrößen im Hinblick auf die Verwendung in statischen Berechnungen
- analytische Untersuchung von Sonderlastfällen
- Anwendung dynamischer Modelle.

Die in den Lastannahmen enthaltenen Kraftkomponenten an den Rädern sind nach einem x, y, z-Koordinatensystem orientiert. Die Lage des Koordinatensystems relativ zur Maschine ist im Bild 1 zu erkennen.

3. Wiederverwendung von Meßwerten

3.1. Aufgabenstellung

Die Erfahrungen eines Berechnungsingenieurs bestehen im wesentlichen darin, daß er detaillierte Kenntnisse darüber hat, welche Kräfte bzw. Momente an verschiedenen Maschinen bei unterschiedlichsten Belastungsverhältnissen aufgetreten sind und welche Schäden bei den auf Grundlage der Messungen konstruierten Maschinen später festgestellt wurden. Diese Erfahrungen wachsen mit der Anzahl der entwickelten Maschinen und mit der Genauigkeit, mit der diese Untersuchungen vorgenommen worden sind. Hieraus leitete sich die Aufgabe ab, möglichst genaue verallgemeinerungsfähige Belastungen (z. B. Rad- und Aufsattelkräfte) und die für die Berechnung verwendeten Lastannahmen in kurzer übersichtlicher Form zusammenzustellen und damit für die Dimensionierung neu zu konstruierender Maschinen günstige Voraussetzungen zu schaffen.

Eine derartige Meßwertersammlung läßt sich jedoch erst dann weitgehend anwenden, wenn neben den Meßwerten auch die wesentlichen Einflußparameter der Maschinen enthalten sind. Nur damit können Änderungen dieser wichtigen Parameter bei der Anwendung für andere Maschinen quantitativ berücksichtigt werden, und die Ableitung von Lastannahmen erreicht eine neue Qualität.

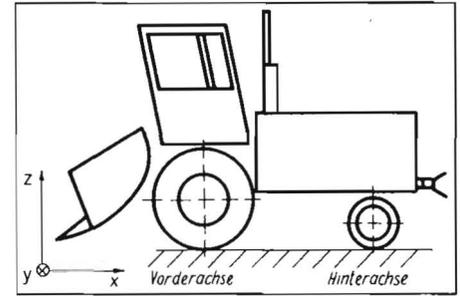


Bild 1. x, y, z-Koordinatensystem in Zuordnung zur Landmaschine

Alle erforderlichen Angaben werden in einem Katalog [1] erweiterungsfähig gespeichert.¹⁾

3.2. Meßwertkatalog

Das Wesen der Gestaltung von Formblättern des Katalogs besteht darin, alle Angaben, die bei der Ableitung von Lastfällen bedeutungsvoll sind, zu erfassen. Für jede Maschine erfolgt eine Unterteilung in fünf Übersichtsblätter:

Blatt 1

Kurzbeschreibung der Landmaschine
Diese enthält neben der Beschreibung des prinzipiellen Aufbaus Aussagen über statische Lagerung, Funktion, Lebensdauer, Geschwindigkeit und Zugmittel, Rüstzustände, Meßbedingungen und Auswahl der formulierten Lastfälle.*

Blatt 2

Skizze und Parameter
Dieses Blatt bringt einen optischen Eindruck (Seitenansicht, Draufsicht mit Länge, Breite, Radstand, Spur) sowie kennzeichnende Angaben, wie statische Radlasten (bzw. Aufsattelasten), Schwerpunktkoordinaten, Massenträgheitsmomente, Hauptträgheitsachsen, Bereifung, Luftdruck.

Blatt 3

Meßwerte
Registriert werden verallgemeinerungsfähige gemessene Belastungen, wie Radkräfte, Aufsattelkräfte und am Dreipunktanbau wirkende Kräfte, für die einzelnen Rüstzustände und Belastungsbedingungen. Dabei werden die höchsten einwirkenden Belastungen den Belastungen gegenübergestellt, die unter Annahme einer Normalverteilung mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,99995% auftreten. Zum Vergleich werden dazu die maximal gemessenen Belastungen bei definierten Lastfällen (z. B. Bordsteinkantenüberfahrten, Grabenüberfahrten) ebenfalls notiert.

Blatt 4

Aussagen zu Korrelationen
Korrelationsuntersuchungen bilden einen

1) Interessenten, die den Katalog nachnutzen wollen, wenden sich an: Kombinat Fortschritt Landmaschinen, VEB Ingenieurbetrieb für Landmaschinentechnik, Leipzig, Abteilung Betriebsfestigkeit, 7031 Leipzig, Schönauer Straße 113.

Schwerpunkt für die Zusammenstellung von Lastfällen. Dabei können Korrelationen sowohl bezüglich des gleichzeitigen Auftretens von Radkraftkomponenten an hochbelasteten Rädern als auch bezüglich der Vertikalbelastungen an allen Aufstandspunkten bzw. bezüglich des Auftretens von Kraftkomponenten an Arbeitswerkzeugen dargestellt werden.

Blatt 5
Lastfälle

Tabellarisch werden alle wesentlichen Lastfälle für die statische Berechnung zusammengefaßt. Die Sicherheit der Konstruktion war für diese Lastfälle nachgewiesen.

Der Katalog enthält z. Z. die Daten von 13 Maschinen und wird ständig erweitert. Neben der Anwendung zur Ableitung von Lastannahmen wird er gleichzeitig als Grundlage zur Systematisierung von Lastannahmen (vgl. Abschn. 4) herangezogen.

3.3. Ableitung von Lastannahmen mit Hilfe des Meßwertkatalogs

Die Ableitung von Lastannahmen ist auf der Grundlage des Meßwertkatalogs sehr leicht möglich, wenn die neue zu dimensionierende Maschine Parameter aufweist, die für eine oder mehrere Maschinen im Katalog weitgehend zutreffen. Hierbei ergeben sich die neuen Lastannahmen nach folgenden Arbeitsgängen:

- Suche nach den höchsten ermittelten Kräften unter vergleichbaren Belastungsbedingungen
- Bildung von Stoßfaktoren $S_{i\lambda}$ ($\lambda = x, y, z$), indem die gefundenen Kräfte durch die entsprechenden statischen Vertikalkräfte (z. B. für ein Rad die statische Radlast) dividiert werden:

$$S_{ix} = \frac{F_{ix \max}}{F_{iz}}; S_{iy} = \frac{F_{iy \max}}{F_{iz}}; S_{iz} = \frac{F_{iz \max}}{F_{iz}}$$

(als „Stoßfaktor“ wird damit die Zahl bezeichnet, mit der die statische Radkraft multipliziert werden muß, um die höchsten repräsentativen einwirkenden Kräfte bzw. Kraftkomponenten zu erhalten)

- Ermittlung der neuen Maximalkräfte durch Multiplikation der errechneten Stoßfaktoren mit den neuen statischen Radlasten
- Berücksichtigung der Korrelationsuntersuchungen von vergleichbaren Maschinen bei der Zusammenstellung der einwirkenden Kräfte, wobei das Ziel besteht, daß das wahrscheinliche gleichzeitige Zusammenwirken der Kräfte berücksichtigt wird; diese Korrelationsuntersuchungen gestatten die Minderung einzelner Kräfte auf der Grundlage zeitgleicher Auswertungen von Meßwertaufzeichnungen
- kritischer Vergleich der ermittelten Lastannahmen mit denen im Katalog.

Die Ableitung von Lastannahmen für völlig neuartige Maschinen ist aufwendiger. Zur Veranschaulichung der Zusammenhänge ist klarzustellen, daß sich die Stoßfaktoren für eine neu zu dimensionierende Maschine $S_{i \text{ neu}}$ wie folgt zusammensetzen:

$$S_{i \text{ neu}} = S_{i \text{ bek}} + \Delta S_{i \text{ Eins}} + \Delta S_{i \text{ MP}}$$

- $S_{i \text{ bek}}$ Stoßfaktoren, die an einer ähnlichen Maschine gleichen Grundtyps (selbstfahrend oder aufgesattelt) ermittelt wurden
- $\Delta S_{i \text{ Eins}}$ Änderung der Stoßfaktoren durch den qualitativen Vergleich der Einsatzbedingungen
- $\Delta S_{i \text{ MP}}$ Korrektur aus dem qualitativen

(mitunter auch quantitativen) Vergleich der Maschinenparameter.

Die Korrekturgröße für die Einsatzparameter $\Delta S_{i \text{ Eins}}$ berücksichtigt den Einfluß der Arbeitsbedingungen, der Lebensdauer, der Fahrgeschwindigkeit und eventuell zu erwartender Havariebedingungen.

Durch die Korrekturgröße der Maschinenparameter $\Delta S_{i \text{ MP}}$ wird den veränderten Federhärten, Dämpfungsbeiwerten und Reifendurchmessern sowie anderen Massen, Massenträgheitsmomenten, Radständen und Schwerpunktklagen Rechnung getragen. Die quantitative Ermittlung von $\Delta S_{i \text{ MP}}$ läßt sich auf der Basis dynamischer Modelle vornehmen.

Allgemein ist festzustellen, daß die Größen $\Delta S_{i \text{ Eins}}$ und $\Delta S_{i \text{ MP}}$ nicht in jedem Fall explizit ermittelt werden müssen, sondern auch auf der Grundlage von Erfahrungswerten geschätzt werden können. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß die Korrekturgrößen nicht für alle Radkraftkomponenten gleich sind, sondern vor allem bei verschiedenen Reifendurchmessern sehr von der Koordinatenrichtung abhängen.

Mit den neuen Stoßfaktoren werden entsprechend dem 3. und 5. Arbeitsgang die Maximalkräfte berechnet und nach Berücksichtigung der Korrelationen die Lastannahmen formuliert.

Eine ausführliche Darstellung dieser Wege ist in [2] enthalten.

4. Systematisierung von Lastannahmen

Die Systematisierung der Belastungsannahmen geht von der Tatsache aus, daß die Vielzahl bisher durchgeführter Messungen und Festigkeitsberechnungen ein solides Fundament für eine Verallgemeinerung ist. Deshalb wurde in [3] der Versuch unternommen, zunächst für die selbstfahrenden Landmaschinen Mähdröschler, Feldhäcksler und Schwadmäher eine Systematik der Lastannahmen zu schaffen, die einfach in ihrer Handhabung ist. Damit kann sie auch für Konstrukteure, die nur wenig Erfahrungen auf dem Gebiet der Lastannahmen haben, ein Arbeitsmittel werden. Auf der Grundlage der Systematik kann zusätzlich zum statischen Spannungsnachweis der Ermüdungsfestigkeitsnachweis als Betriebsfestigkeitsnachweis geführt werden. Die in [3] angegebenen Werte sollen eine sichere Dimensionierung garantieren, ohne eine wesentliche Überdimensionierung zu verursachen.

Der Vorteil der Methode besteht darin, daß das Erstellen der Belastungsannahmen immer nach den gleichen Gesichtspunkten erfolgen kann, unabhängig von subjektiven Einflüssen. Die mit diesen Belastungsannahmen dimensionierten Fahrgestelle können im Einsatz dahingehend beobachtet werden, ob die Dimensionierung gut war oder nicht. Eventuell erforderliche Korrekturen des Verfahrens sind auf dieser Grundlage möglich. Zum Vergleich können auch jederzeit Messungen und Radkraft-Berechnungen herangezogen werden.

Die Systematik geht davon aus, daß die drei Selbstfahrer Mähdröschler, Feldhäcksler und Schwadmäher prinzipiell gleich sind:

- Jede Maschine hat zwei ungefederte Achsen. Die Federung wird im wesentlichen durch die Bereifung realisiert.
- Ruhe-Radlast (vertikale Radlast im Stillstand der Maschine auf ebenem Untergrund) und Reifengröße sind einander annähernd proportional zugeordnet.
- Jede Achse hat zwei Räder, deren Reifenluftdruck zwischen 0,25 und 0,4 MPa schwanken kann.

— Die Maschine stützt sich statisch bestimmt auf der Fahrbahn ab. Dies wird durch Pendelachsen oder gleichwertige Drehgelenke verwirklicht. Die Maschinenbreite ist 2,5 bis 3 m.

— Wesentliches Regelorgan der Maschine ist der Fahrer (vgl. [4]).

— Alle Maschinen fahren auf den gleichen Fahrbahnen (Straßen, Feldwege, Feld).

— Die maximale Fahrgeschwindigkeit ist nicht größer als 30 km/h.

— Die Arbeitsgeschwindigkeit der selbstfahrenden Landmaschinen liegt im Feldeinsatz zwischen 6 km/h und 12 km/h.

— Anhängerkupplungen dienen vornehmlich zum Anhängen eines Schneidwerkzeugs. Seltener zum Anhängen anderer Geräte.

Aus Messungen konnten folgende wesentliche Grundsätze für die Aufstellung von Lastannahmen abgeleitet werden:

- Die Fahrstoßbelastung an einem Rad ist um so geringer, je höher seine Ruhe-Radlast ist.
- Tritt bei zweiachsigen Fahrzeugen an einer Achse eine extrem hohe Belastung auf, dann ist stets die andere Achse nicht besonders hoch beansprucht.
- Die Bauteile in der Mitte zwischen den Achsen werden am höchsten beansprucht, wenn ein symmetrischer Zentralstoß in vertikaler Richtung am Fahrzeug wirkt.
- Bauteile in der Nähe einer Achse erfahren dann extreme Belastung, wenn die Räder dieser Achse eine hohe Fahrstoßbelastung erleiden.
- An Pendelachsen ist das Moment um das Pendelgelenk infolge aller Radkräfte an der Achse nahezu ausgeglichen.
- Extreme Lastfälle sind durch gleichzeitig große Radkräfte in x- und z-Richtung (Fahrt- und Vertikalrichtung) oder durch gleichzeitig große Radkräfte in y- und z-Richtung (Seiten- und Vertikalrichtung) gekennzeichnet.
- Radlagerungen sind am höchsten beansprucht, wenn x-, y- und z-Kräfte gleichsinnig belastet auf das Einspannmoment wirken.

Aus den bisher durchgeführten Messungen an unterschiedlichen Landmaschinen konnte weiterhin abgeleitet werden, daß die verschiedenen Fahrbahnen in vier Gruppen eingeteilt werden können:

- Fahrbahngruppe I: Pflasterstraße, Feldwege (normal, schlecht, sehr schlecht)
- Fahrbahngruppe II: Vorgewende
- Fahrbahngruppe III: Asphalt-, Betonfahrbahn
- Fahrbahngruppe IV: Feldeinsatz im Bestand.

Innerhalb jeder Fahrbahngruppe ist eine einheitliche Fahrstoßbelastung zu verzeichnen. Die höchste Stoßbelastung hat die Gruppe I aufzuweisen, die niedrigste die Gruppe IV. Die auf diesen Fahrbahnen entstehenden Beanspruchungen sind die Grundlage für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis (Betriebsfestigkeitsnachweis).

Innerhalb der Lebensdauer wirken auf die Maschine noch Sonderbeanspruchungen ein. Dazu gehören Einzelhindernisüberfahrten (z. B. Bordsteine, extreme Schlaglöcher), Grabendurchfahrten, extreme Feldauffahrten, Spurrillen-Querüberfahrten u. a. Derartige Betriebszustände treten sehr selten auf und betreffen auch nur einen geringen Teil der eingesetzten Maschinen. Dafür sind Lastannahmen zu formulieren, die als Grundlage des statischen Spannungsnachweises (Nachweis

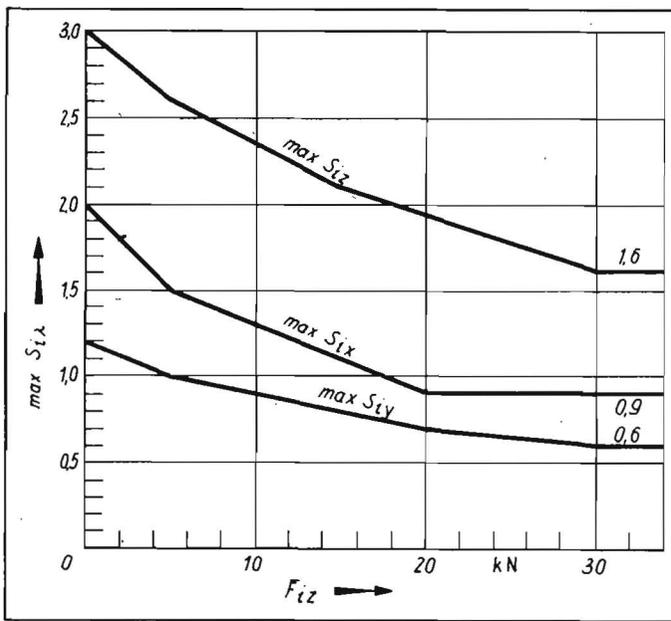


Bild 2. Extremer Stoßfaktor $\max S_{ik}$ ($\lambda = x, y, z$) in Abhängigkeit von der Ruhe-Radlast \bar{F}_{iz}

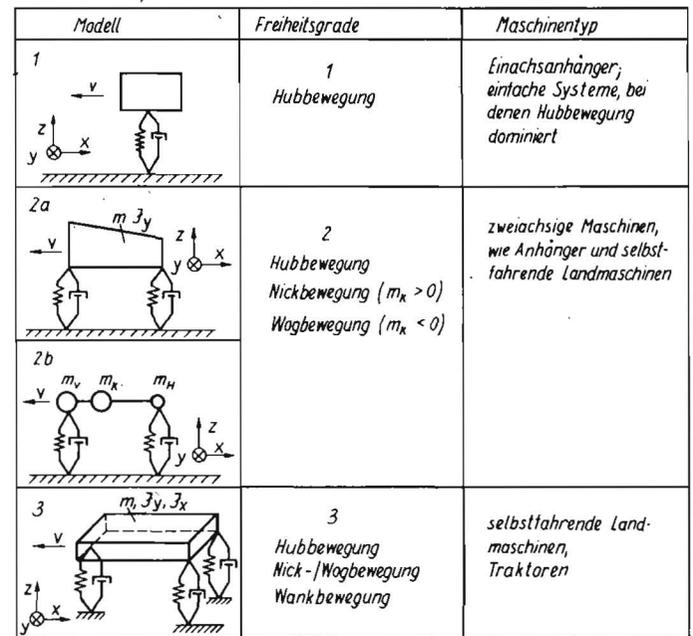
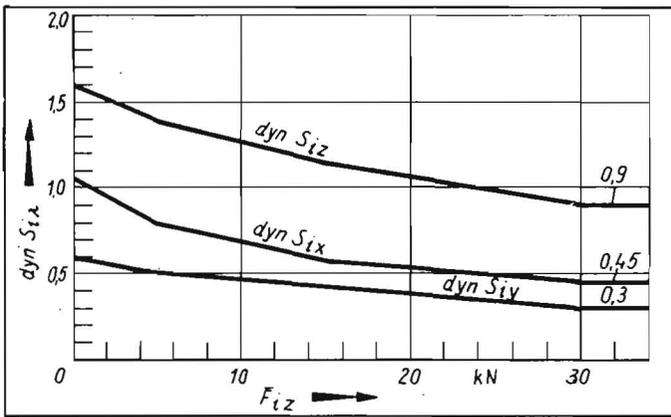


Bild 4. Häufig benutzte dynamische Modelle für Landmaschinen, die nur durch die Reifen gegenüber dem Boden abgedefert sind

Tafel 1. Belastungsfall Nr.2 für die Durchführung des statischen Spannungsnachweises

Lastfall Nr.	Achse Nr.	Rad Nr.	S_{ix}	S_{iy}	S_{iz}
2	1	1	0,3 $\max S_{ix}$	$\pm 0,75 \max S_{iy}$	$\max S_{iz}$
		2	0,3 $\max S_{ix}$	$\pm 0,5 \max S_{iy}$	0,75 $\max S_{iz}$
	2	1	0	$\pm 0,3 \max S_{iy}$	-0,25 $\max S_{iz}$
		2	0	$\pm 0,3 \max S_{iy}$	-0,25 $\max S_{iz}$

Bild 3. Häufig auftretender Stoßfaktor $\text{dyn } S_{ik}$ ($\lambda = x, y, z$) in Abhängigkeit von der Ruhe-Radlast \bar{F}_{iz}

der Sicherheit gegen unzulässige plastische Deformation) dienen.

Ausgangspunkt für die Aufstellung von Lastannahmen selbstfahrender Landmaschinen sind deren Ruhe-Radlasten. Wird ein Lastfall formuliert, dann gehören dazu für alle vier Räder je drei Kräfte, die gleichzeitig an der Maschine wirkend angenommen werden. Jedes Rad erhält Kräfte in x -, y - und z -Richtung zugewiesen. Die endgültigen Kräfte für einen bestimmten Lastfall und ein bestimmtes Rad i werden nach den Gleichungen (1) bis (3) berechnet:

$$F_{ix} = S_{ix} \bar{F}_{iz} \quad (1)$$

$$F_{iy} = S_{iy} \bar{F}_{iz} \quad (2)$$

$$F_{iz} = \bar{F}_{iz} + S_{iz} \bar{F}_{iz}; \quad (3)$$

\bar{F}_{iz} Ruhe-Radlast des Rades i

in vertikaler Richtung

S_{ik} Stoßfaktor ($\lambda = x, y, z$).

Das Produkt aus Stoßfaktor und Ruhe-Radlast ergibt den dynamischen Anteil der Radkraft, der durch die Fahrt über Fahrbahnebenheiten verursacht wird. In vertikaler Richtung schwankt der dynamische Wert näherungsweise um die Ruhe-Radlast.

Entsprechend den beiden Festigkeitsnachweisen werden Stoßfaktoren für den statischen Spannungsnachweis ($\max S_{ik}$) und Stoßfaktoren für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis

($\text{dyn } S_{ik}$) unterschieden. Alle Stoßfaktoren sind in ihrer Größe von der Ruhe-Radlast des jeweils betrachteten Rades abhängig und unterschiedlich in Richtung x, y, z . Die Stoßfaktoren $\text{dyn } S_{ik}$ sind gegenüber den Stoßfaktoren $\max S_{ik}$ wesentlich gemindert.

In den Bildern 2 und 3 sind die Stoßfaktoren in Abhängigkeit von der Ruhe-Radlast dargestellt. Aus diesen Stoßfaktoren können die extremen Kraftkomponenten in allen Richtungen am Rad berechnet werden. Daraus werden die Lastfälle für die Maschine aufgebaut. Sie berücksichtigen die Tatsache, daß nicht zur gleichen Zeit alle ungünstigen Radkräfte zusammen auftreten, sondern daß extrem hohe Belastung in einer Richtung mit abgeminderter Belastung in den anderen Richtungen verknüpft ist.

Die einzelnen Lastfälle sind entsprechend Tafel 1 allgemein formuliert worden, wo als Beispiel der Lastfall Nr.2 herausgegriffen wurde. In [3] sind ausführlichere Angaben enthalten.

Jede Achse, gleich ob Vorder- oder Hinterachse, kann Achse Nr.1 oder 2 sein. Gesonderte Regelungen gelten jedoch für die Räder von Pendelachsen.

Anhand der vorliegenden Bilder und Tafeln kann man für jede selbstfahrende Landmaschine in einem bestimmten Ausrüstungszustand verschiedene Lastfälle zusammenstellen. Voraussetzung ist lediglich die Kenntnis der Ruhe-Radlasten.

5. Analytische Untersuchung von Sonderlastfällen

Im Abschn.4 wurden diejenigen Einsatzfälle behandelt, die sich mit Hilfe von Stoßfaktoren beschreiben lassen. Diese Fälle betreffen die fahrende Maschine. In diesem Abschnitt sollen nun solche Einsatzbedingungen behandelt werden, die sich als quasistatische Bewegungsvorgänge einstufen lassen. Das sind solche Betriebszustände, wo eine Angabe von Stoßfaktoren nicht sinnvoll ist, weil die Geometrie der Radanordnung und die Reifenabmessungen von wesentlicher Bedeutung für die Größe der auftretenden Kräfte sind. Die Kräfte an den Rädern und Zugösen ergeben sich nicht aus den dynamischen Wirkungen der Fahrbahnebenheiten, sondern können nach statischen Gesichtspunkten berechnet werden.

Quasistatische Bewegungsvorgänge sind Vorgänge, die aus dem Stand heraus mit niedriger Geschwindigkeit erfolgen, oder Vorgänge in einer mehrere Sekunden lang stabilen Bewegungsphase (z. B. konstante Bremsverzögerung) oder Bewegungsvorgänge mit nahezu konstanter Reibung zwischen Rad und Fahrbahn.

In diesem Zusammenhang sind folgende Einsatzfälle bekannt geworden:

- Lenkbremsung einer selbstfahrenden Landmaschine auf festem Spurrillenweg
- Bergen eines versackten Fahrzeugs auf Ackerboden

- Kurvenfahrt eines Anhängers mit Tandemachse auf rauher, fester Fahrbahn
- Gefahrenbremsung in Geradeausfahrt
- Zurückstoßen eines Aufsattelgeräts in extremer seitlicher Stellung zum Zugfahrzeug
- Vollbremsung eines Anhängers mit einseitig wirkender Auflaufbremse.

Aus der Aufstellung ist ersichtlich, daß diese Einsatzfälle nur für spezielle Maschinentypen zutreffend sind. Sie werden im statischen Spannungsnachweis verarbeitet.

Innerhalb dieses Artikels ist nicht beabsichtigt, die theoretischen Untersuchungen ausführlich darzustellen. Deshalb sei für die ersten drei Einsatzfälle auf [5] verwiesen.

6. Anwendung dynamischer Modelle

Die folgenden Ausführungen sollen nur die wesentlichen Grundlagen der Anwendung dynamischer Modelle zur Ableitung von Lastannahmen erläutern. Dabei wird bewußt auf eine Darstellung aller Einzelheiten verzichtet, weil es für den Bearbeiter vorrangig wichtig ist, den Gang der Berechnung zu erkennen. Bei Anwendung dieser Berechnungsmethode wird sich der Bearbeiter im Verlauf der Anwendung i. allg. ohnehin bei Spezialisten konsultieren bzw. entsprechende Literatur ([6] bis [11]) studieren.

Beim derzeitigen Stand der maschinellen Rechentechnik gewinnt diese analytische Methode der Ermittlung der einwirkenden Belastungen praktische Bedeutung. Es ist jedoch zweckmäßig, die z. T. sehr komplizierten dynamischen Systeme von Landmaschinen durch stark reduzierte, mathematisch wesentlich leichter zu berechnende Minimalmodelle zu ersetzen. Als Minimalmodelle werden im folgenden Modelle bezeichnet, die mit der geringsten Anzahl von Freiheitsgraden eine zutreffende Aussage über das dynamische Verhalten der Systeme in einem abgesteckten Geltungsbereich ermöglichen.

Die dynamischen Modelle setzen sich aus drei Arten von Elementen (Federn, Dämpfer und starre Massen) zusammen. An Landmaschinen sind die Reifen i. allg. die hauptsächlich federnden und dämpfenden Elemente, während der Aufbau in erster Näherung als starre Masse betrachtet wird. Eine feine Detaillierung ist ohne weiteres möglich, jedoch in bezug auf den Wert der Aussage nicht in jedem Fall sinnvoll. Im Landmaschinenbau werden dynamische Modelle vorwiegend benutzt zur

- Ermittlung der einwirkenden Belastungen
- Berechnung der Auswirkungen von Parameteränderungen
- Optimierung der Parameter zur Verringerung der einwirkenden Kräfte.

Der Aufwand für die Berechnung der einwirkenden Belastungen ist vor allem dann gering, wenn nur die größten der einwirkenden Kräfte (das sind i. allg. die Vertikalkräfte) mit den Modellen berechnet werden.

Die wesentlichen Schwingbewegungen einer Landmaschine sind die Hubschwingung (Translationsbewegung in z-Richtung), die Nickschwingung (Drehbewegung um die y-Achse) sowie die Wankschwingung (Drehbewegung um die x-Achse).

Das Modell 1 im Bild 4 läßt sich als einfachstes

dynamisches Modell nur für einen sehr eingeschränkten Anwendungsbereich benutzen. Es wird neben der Berechnung von Einachsanhängern hauptsächlich für qualitative Untersuchungen bei Parameteränderungen angewendet, kann auch umgekehrt zur Bestimmung von Parametern benutzt werden. Für zweiachsige Maschinen, bei denen Hub- und Nickschwingungen auftreten und das Antriebssystem nicht berücksichtigt werden muß, wird in vielen Fällen ein Minimalmodell entsprechend dem Modell 2 im Bild 4 benutzt. Das Verhalten dieses Modells läßt sich für einen speziellen Fall auch durch zwei einzelne Modelle 1 beschreiben. Beide Typen gestatten nur Aussagen für Radkräfte von Maschinen, bei denen die Wankbewegung nicht betrachtet wird. Daher ist eine Erweiterung der bisher ebenen Modelle zur Berücksichtigung der Wankbewegung unerläßlich. Zur richtigen Berechnung der beim räumlichen Modell (vgl. Modell 3 im Bild 4) auftretenden Kräfte sind neben den Federwirkungen in Fahrtrichtung auch die Federwirkungen in Seitenrichtung zu berücksichtigen (vgl. hierzu auch [2]). Dadurch erhalten die Modelle sehr schnell wesentlich mehr Elemente.

Bei der Ermittlung der auf das Modell wirkenden durch die Fahrbahnebenenheiten hervorgerufenen Erregung wird durch den Radcharakter der Reifen eine Glättung hervorgerufen, die unbedingt zu berücksichtigen ist. Die Dimensionierung einer Maschine kann auf der Basis der berechneten Kräfte erfolgen, die bei der Überfahrt von Hindernissen auftreten, die zum praktischen Haltbarkeitsnachweis benutzt werden (Prüfbahnen).

Ausgehend davon, daß von der Maschine die wesentlichen konstruktiven Daten vorliegen, ist zur Ableitung von Lastannahmen folgender Algorithmus bei Verwendung der deterministischen Methode anzuwenden:

1. Festlegen, welche Belastungskomponenten berechnet werden sollen
2. Aufstellung eines möglichst einfachen dynamischen Modells
3. Überprüfen, ob sich durch geeignete Annahmen die mathematische Berechnung wesentlich vereinfachen läßt, ohne die Qualität der Ergebnisse schwerwiegend zu verschlechtern
4. Ermittlung der erforderlichen Maschinenparameter
5. Ermittlung der einwirkenden Erregerfunktion
6. Formulierung der Anfangs- und Nebenbedingungen (z. B. Abspringen des Rades von der Fahrbahn) sowie der beschreibenden Differentialgleichungen
7. Berechnung des Differentialgleichungssystems
8. Auswertung der errechneten Belastungsverläufe und Festlegung der zu erwartenden Höchstbelastungen
9. Bildung von Lastfällen unter Berücksichtigung der im Meßwertkatalog [7] enthaltenen Korrelationen
10. Tabellarische Zusammenstellung der ermittelten Lastfälle.

Die Genauigkeit, mit der sich die einwirkenden Kräfte berechnen lassen, ist abhängig von der Genauigkeit der Eingangsdaten, wie konstruk-

tive Parameter, Reifenkennwerte usw., sowie vom Geltungsbereich der Modelle, von der Rechengenauigkeit und von der Auswahl der zu untersuchenden Fälle.

7. Zusammenfassung

Im Beitrag wurden vier Vorgehensweisen zur Aufstellung von Lastannahmen für mobile Landmaschinen vorgestellt. Diese Methoden konkurrieren miteinander und bewirken durch ihre gleichzeitige Anwendung eine bedeutende Erhöhung der Sicherheit und Genauigkeit in der Vorhersage der einwirkenden Kräfte.

Durch die Synthese von Theorie und Praxis wurde auf diesem schwierigen Gebiet eine neue Qualität erreicht. Alle Untersuchungen wurden so aufgebaut, daß die Ergebnisse für eine große Anzahl von Maschinen angewendet werden können.

Literatur

- [1] Lorenz, A.: Katalog gemessener Belastungen an mobilen Landmaschinen. Institut für Landmaschinentechnik, Leipzig, Forschungsbericht 1979.
- [2] Lorenz, A.: Lastannahmen für die Erstdimensionierung von mobilen Landmaschinen. Wissenschaftlich-technische Ausarbeitung des ILT Leipzig, Nr. 7, 1982.
- [3] Kritzner, B.: Systematisierung der Belastungsannahmen für die Fahrgestelle selbstfahrender Landmaschinen im Hinblick auf den analytischen Festigkeitsnachweis. 5. Kolloquium „Zuverlässigkeit und ökonomischer Materialeinsatz bei Landmaschinen“, Vortragsammlung. Institut für Landmaschinentechnik Leipzig, 1979.
- [4] Puls, E.: Der Einfluß des Fahrers auf die Belastung von Traktorenbauteilen unter besonderer Berücksichtigung der Höchstbelastung. TU Dresden, Dissertation 1976.
- [5] Kritzner, B.: Sonderlastfälle für die Dimensionierung der Fahrgestelle mobiler Landmaschinen, auf theoretischem Wege gewonnen. 6. Kolloquium „Zuverlässigkeit und...“, Vortragsammlung. Institut für Landmaschinentechnik Leipzig, 1981.
- [6] Smith, R.E.: Computer use in the design of agricultural vehicles. Vortrag zur American Society of agricultural engineers, 44th Pacific coast region annual meeting 6. April 1966. FMC Corporation, San Jose, California, USA.
- [7] Hlawitschka, E.: Beitrag zur Berechnung und Messung vertikaler und horizontaler Radkräfte an Traktoren beim Überrollen von Einzelhindernissen. Universität Rostock, Dissertation 1969.
- [8] Schilling, E.: Experimentelle und schwingungstheoretische Ermittlung von Kräften an selbstfahrenden Mähdrehschern zur Verbesserung ihres Entwurfes und ihrer Konstruktion. Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 14, Nr. 13.
- [9] Souček, Z.: Modellierung der Fahrt der selbstfahrenden landwirtschaftlichen Maschinen. 2. Kolloquium „Zuverlässigkeit und...“, ILT Leipzig, 1973.
- [10] Müller, H.: Beitrag zur rechnerischen Ermittlung von Belastungen in Tragwerken landwirtschaftlicher Fahrzeuge beim Überqueren großer Fahrbahnebenenheiten. TU Dresden, Dissertation 1977.
- [11] Lorenz, A.: Die Anwendung dynamischer Modelle zur Erarbeitung von Lastannahmen für Landmaschinen. Institut für Landmaschinentechnik Leipzig, Forschungsbericht 1978 (unveröffentlicht).

A 3374