

DAUERHALTBARKEIT STARRER SPEICHENRÄDER

Von H. Müller

Der erste Bericht über die Speichenraduntersuchungen [1] behandelt statische Dehnungsmessungen an Rädern und die Ermittlung von Fahrbahnunebenheiten in ihrer Auswirkung auf verschiedene Radabmessungen. In Fortsetzung dieser Untersuchungen wurden die dynamischen Beanspruchungen von Rädern an fahrenden Geräten gemessen, die die Grundlage für die Versuchsbedingungen der weiteren statischen Dehnungsmessungen und der dynamischen auf dem Dauerprüfstand bildeten. Die Ergebnisse der Dauerprüfung selbst sind anhand einiger bezeichnender Beispiele erläutert.

A. Dehnungsmessungen am rollenden Rade

Um einen Überblick zu erhalten, wie hoch die Beanspruchungen der Räder im praktischen Betrieb liegen, wurden dynamische Dehnungsmessungen mit Dehnungsmessstreifen am Rad eines fahrenden Gerätes durchgeführt.

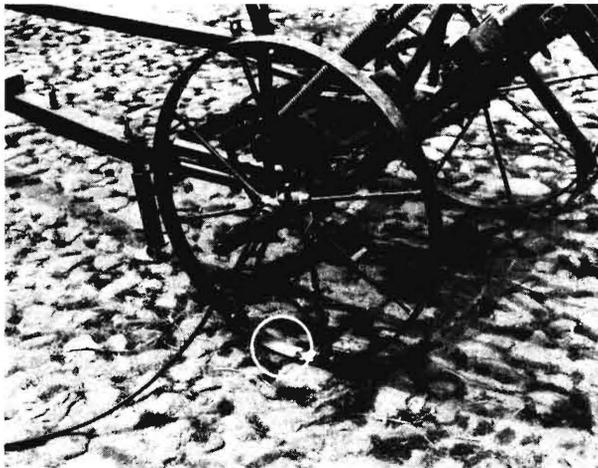


Bild 1. Versuchsanordnung für die Beanspruchungsmessungen im Radkranz beim Fahren.

Im Kreise ist der aufgeklebte Dehnungsmessstreifen zu sehen. Das elektrische Kabel führt zur Messbrücke und dem Oszillographen.

Es stand dazu ein Vielfachgerät zur Verfügung, das normalerweise mit Holzspeichenrädern ausgerüstet ist. Die Holzräder wurden gegen Eisenspeichenräder ausgetauscht. Diese hatten einen Durchmesser von 800 mm, besaßen einen Flacheisenkranz von 50×8 mm und 8 gekröpfte Rundeisenspeichen von 13 mm Durchmesser.

Der Dehnungsmessstreifen wurde für die Versuche an der Innenseite des Radkranzes genau zwischen zwei Speichen angebracht, Bild 1. Nach der Durchführung mehrerer Versuche erhob sich die Frage, ob die dynamischen Beanspruchungen an zwei verschiedenen

Radteilen, also z.B. am Radkranz und an einer Speiche, in demselben Verhältnis zueinander standen wie die statischen Beanspruchungen an den gleichen Messtellen. Da dies durch entsprechende Versuche bestätigt wurde, konnte man sich bei den weiteren Versuchen auf dynamische Messungen an der einen Radmesstelle genau zwischen zwei Speichen beschränken. Die auftretenden dynamischen Beanspruchungen an anderen Radteilen waren dann rechnerisch über die am gesamten Rade durchgeführten statischen Dehnungsmessungen einfach zu ermitteln.

1. Messeinrichtung

Dynamische Beanspruchungsmessungen lassen sich mit mechanischen oder elektrischen Dehnungsmessern durchführen, wobei die elektrischen den besonderen Vorteil haben, klein zu sein und kleine Massen und Messlängen zu besitzen.



Bild 2. Dehnungsmessstreifen nach Philips.
(Röntgenaufnahme: natürliche Grösse.) 120Ω , Messfläche $12 \times 2,5$ mm.

In Bild 2 ist das Prinzip eines Dehnungsmessstreifens dargestellt. Er besteht aus einem 0,02 mm starken Draht aus Konstantan, Manganin oder Chrom-Nickel, der entsprechend der Abbildung gelegt und in eine besondere Papier- oder Kunstharzmasse eingebettet ist. Klebt man diesen Dehnungsmessstreifen auf ein Maschinenteil, dessen Dehnungen gemessen werden sollen, so wird der dünne Messstreifen und mit ihm der eingebettete Draht in dem gleichen Masse wie die Randzone des Bauteiles gedehnt oder gestaucht. Der Draht verändert hierbei seinen Querschnitt und seine Länge, wodurch sein elektrischer Widerstand ebenfalls geändert wird. Diese Widerstandsänderung ist entsprechend der vom Herstellerwerk angegebenen Eichung ein unmittelbares Mass für die Längenänderung des Dehnungsmessstreifens und wird über eine Messbrücke von einem Schleifenoszillographen aufgezeichnet.

Vor Beginn der dynamischen Dehnungsmessungen wurde der Messstreifen auf Dehnung geeicht. Das Rad wurde auf dem statischen Prüfstand belastet, wobei die auftretenden Dehnungen über den Messstreifen von einem Oszillographen aufgezeichnet und gleichzeitig an einem statischen Feindehnungsmesser, der unmittelbar neben dem Dehnungsmessstreifen ange-

bracht war, abgelesen wurden. Auf diese Weise war eine Beziehung zwischen der Amplitudenhöhe, der Oszillographenaufschreibung und den Skalenteilen des statischen Feindehnungsmessers hergestellt. Es ergab sich dabei eine lineare Abhängigkeit der beiden Messgrößen. Die statische Eichung wurde zu Beginn und am Ende der Versuche durchgeführt.

2. Auswertung der Oszillogramme

In Bild 3 ist ein Teil eines Diagrammes dargestellt, das bei einer Fahrt des Vielfachgerätes über Kopfsteinpflaster aufgenommen wurde. Die Fahrgeschwindigkeit betrug dabei 1,25 m/s. Der Messstreifen war nach Bild 1 am Radkranz angebracht. Bei der Auswertung wurden die Beanspruchungsspitzen a den Diagrammen entnommen.

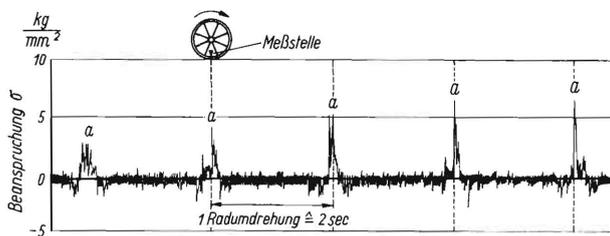


Bild 3. Oszillogramm von den Beanspruchungen des Radkranzes bei Fahrt des Vielfachgerätes über Kopfsteinpflaster (Messstelle siehe Bild 1).

Fahrgeschwindigkeit $v = 1,25$ m/s.

Für die Auswertung der Oszillogramme wurde die elektrische Messeinrichtung statisch geeicht. Die Eichkurve verlief über den verwendeten Messbereich vollkommen linear.

Die gesamte Messgenauigkeit der dynamischen Dehnungsmessung ergab sich vor allem aus der Ungenauigkeit dieser Eichkurve und der Ungenauigkeit der Oszillogramm-Ablesung. In die Genauigkeit der Eichkurve ging die Messunsicherheit des statischen Feindehnungsmessers von 0,3% und dessen Ablesungenauigkeit von 2% ein. Die Ablesungenauigkeit der Oszillogramme betrug etwa 1,5%.

Die Empfindlichkeitsabnahme der elektrischen Messeinrichtung (Änderung der Eichkurven-Steigung), die wahrscheinlich durch Feuchtigkeitseinfluss am Dehnungsmessstreifen bedingt war und während der Messzeit von 14 Tagen etwa 2,5% betrug, ging in die Auswertung kaum ein, weil die Eichkurve mehrmals aufgenommen und für die Auswertung jeweils die letzte verwendet wurde. Ein Temperatureinfluss auf die Genauigkeit war nicht vorhanden, da der Dehnungsmessstreifen temperaturkompensiert war und eine einzige Messung immer nur wenige Sekunden dauerte. Eine Nullpunktverschiebung hatte die elektrische Messeinrichtung nicht.

Innerhalb der aufgetretenen Messfrequenzen war die dynamische Messeinrichtung nicht frequenzab-

hängig. Also galt die statische Eichkurve auch exakt für die Auswertung der dynamischen Vorgänge.

Aus allen diesen Betrachtungen ergab sich für die durchschnittlichen Messamplituden eine maximale Messunsicherheit von etwa 4% dieser Amplituden.

3. Dehnungsmessungen beim Überrollen von Einzelhindernissen

In dem Bericht über „Beanspruchung und Konstruktion von Speichenrädern“ [1] wurde eine Formel entwickelt, die es ermöglicht, unter gewissen Annahmen die Stosskräfte zu ermitteln, die auf ein gegebenes Rad einwirken, wenn es mit einer bestimmten Geschwindigkeit über ein starres Hindernis von gegebener Höhe fährt. Durch Versuche auf einer ebenen Fahrbahn mit einem Einzelhindernis sollte festgestellt werden, in welcher Beziehung die nach der Formel errechneten Stosskräfte zu den ihnen proportionalen, am fahrenden Gerät gemessenen Beanspruchungen stehen.

Die Versuche wurden auf glatter Zementfahrbahn durchgeführt. Das benutzte Vielfachgerät wurde mit einem Drahtseil gezogen, das über ein Getriebe von einem Elektromotor auf eine Trommel aufgewickelt wurde. Die Anlaufstrecke bis zum Auftreffen des Rades auf das Hindernis war so gross bemessen, dass das Gerät vor dem Auftreffen bereits eine gleichförmige Fahrgeschwindigkeit angenommen hatte. Das Rad stand zu Beginn der Fahrt so, dass die Hinderniskante später genau unter der Mitte des Dehnungsmessstreifens auf den Radkranz auftraf. Der Dehnungsmessstreifen war durch ein langes Kabel, das sich während der Fahrt des Gerätes verdrehen konnte, mit den Messgeräten verbunden. Die Versuche wurden mit 7 verschiedenen hohen Hindernissen von 3 bis 30 mm Höhe durchgeführt. Jeder Versuch wurde dreimal wiederholt und der arithmetische Mittelwert als Messergebnis gewertet. Versuchsreihen wurden mit Fahrgeschwindigkeiten von 1,0 m/s, 1,25 m/s und 1,5 m/s gefahren. Die Radbelastung wurde bei diesen Versuchen nicht variiert.

In Bild 4 sind die Messergebnisse und die nach der Formel errechneten Werte dargestellt. Als Abszisse ist die Hindernishöhe h und als Ordinate die Beanspruchung aufgetragen. Bei den Messwerten ist zu beachten, dass sich ihre Grösse aus der Beanspruchung durch die normale statische Radbelastung und die durch das Hindernis hervorgerufene Stosskraft zusammensetzt. Die nach der Formel errechneten Werte stellen aber nur die Beanspruchung durch die reine Stosskraft P dar, sodass zu ihnen die Beanspruchung durch die statische Radbelastung hinzugezählt werden musste.

Ein Vergleich der Stossanteile der errechneten und gemessenen Werte lässt erkennen, dass die gemessenen Werte bei dem benutzten Vielfachgerät rd.

35 % der errechneten Werte betragen. Dieser Prozentsatz hängt von der Elastizität des Gerätes ab und kann dementsprechend bei anderen Geräten auch grösser oder kleiner als 35 % sein. Kennt man ihn, so lässt sich näherungsweise die an diesem Gerät beim Fahren auftretende Stosskraft nach folgender Formel ausdrücken:

$$P = P_{stat} + 0,35 \frac{v}{r} \cdot \sqrt{\frac{P_{stat}}{g} \cdot c \cdot h (2r - h)}.$$

Unter der Annahme, dass andere Versuchsgeräte grössenordnungsmässig ein ähnliches Ergebnis liefern werden, wurde diese Formel als Grundlage für die Belastung bei den folgenden Dehnungsmessungen verwendet.

Betrachtet man die aus Messwerten ermittelten Kurven, so ist festzustellen, dass die Beanspruchungen etwa parabolisch mit der Hindernishöhe zunehmen, wie auch aus der Formel hervorgeht.

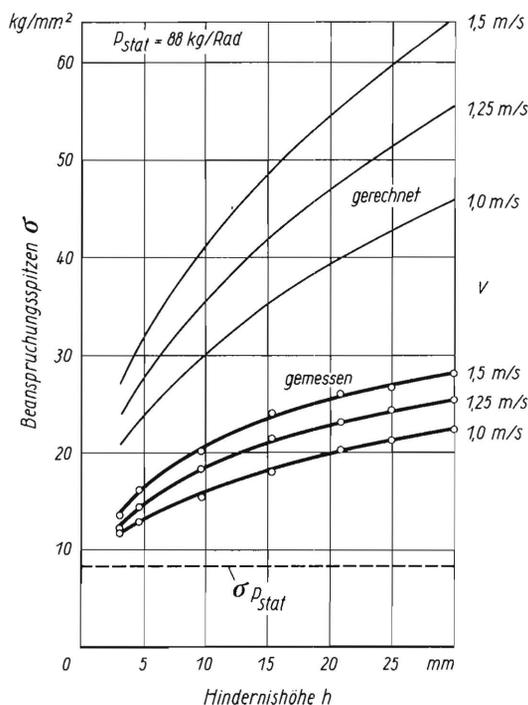


Bild 4. Beanspruchungen des Radkranzes bei Fahrt des Vielfachgerätes über Einzelhindernisse.

Gemessen: mit Dehnungsmesstreifen.

Gerechnet: $P = \frac{v}{r} \cdot \sqrt{\frac{P_{stat}}{g} \cdot c \cdot h (2r - h)}$ [1, S. 69]

Durch Eichungen wurde festgestellt, dass einer Stosskraft $P = 13,5 \text{ kg}$ eine Spannung $\sigma = 1 \text{ kg/mm}^2$ entspricht.

- v Fahrgeschwindigkeit
- r Radhalbmesser
- P_{stat} Radlast
- $c = \frac{P}{f}$ Federkennzahl des Rades
- h Hindernishöhe

In einem gesonderten Versuch wurden die Beanspruchungen an je einer ausgewählten Messtelle des Radkranzes und an einer Speiche statisch gemessen.

Die Beanspruchungen dieses Rades betragen bei sämtlichen Belastungen an der Speiche 45 % der Beanspruchungen am Radkranz. Ob dieses Verhältnis der Beanspruchungen zueinander auch bei dynamischen Beanspruchungen erhalten bleibt, sollte der folgende Versuch zeigen. Ein Dehnungsmesstreifen war hierbei genau an der Messtelle der Speiche angebracht, an der vorher die statische Messung stattfand. Mit diesem Dehnungsmesstreifen wurden sodann die gleichen Versuchsreihen mit Einzelhindernissen und wechselnden Fahrgeschwindigkeiten bei konstanter Radbelastung durchgeführt. Es konnte eine gute Übereinstimmung des Verhältnisses der dynamischen Beanspruchungen an zwei verschiedenen Radteilen mit dem Verhältnis der statischen Beanspruchungen festgestellt werden.

4. Dehnungsmessungen beim Fahren über Kopfsteinpflaster

Die Versuche wurden auf einer älteren, mittelmässig erhaltenen Kopfsteinpflasterstrecke (vergl. auch Bild 1) durchgeführt. Die Dehnungsmessungen erfolgten an dem gleichen Rade und Gerät wie bei den Versuchen mit Einzelhindernissen. Sämtliche Versuchsreihen wurden mit konstanter Radbelastung durchgeführt, während die Fahrgeschwindigkeiten wechselten.

Die Registriergeräte standen wiederum ortsfest. Die Verbindung zu dem Dehnungsmesstreifen, der am Radkranz angebracht war, wurde durch ein langes Gummikabel hergestellt. Es war somit möglich, jeweils Messtrecken von etwa 50 m ununterbrochen zu durchfahren. Da die Messungen dazu dienen sollten, Häufigkeitsverteilungen der Beanspruchungsspitzen zu ermitteln, wurde mit jeder Fahrgeschwindigkeit eine Strecke von mindestens 800 m zurückgelegt, wobei man über 300 Messwerte erzielte und eine ganz gute Ausgeglichenheit der Häufigkeitsverteilungen erreichte.

Das Vielfachgerät wurde von einem Schlepper gezogen. Die Fahrgeschwindigkeit konnte durch den Handgashebel konstant gehalten werden. Vor Beginn einer Versuchsreihe wurde die Fahrzeit auf einer abgesteckten Fahrstrecke gestoppt und so lange berichtigt, bis die gewünschte Fahrgeschwindigkeit erreicht war. Die Geschwindigkeiten von 1,0, 1,25, 1,5 und 1,75 m/s liessen sich mit maximal 2 % Abweichung erreichen. 0,75 m/s waren leider nicht genau erreichbar, sodass diese Versuchsreihe mit 0,71 m/s gefahren werden musste. Bei den Versuchen fuhr das Gerät tunlichst nicht in der gleichen Spur, sondern jeweils etwas seitlich versetzt.

In Bild 5 sind die Häufigkeitsverteilungen für sämtliche 5 Fahrgeschwindigkeiten dargestellt. Als Abszisse sind die in Klassen zusammengefassten Beanspruchungsspitzen aufgetragen und als Ordinate ihre Anzahl auf 800 m Fahrstrecke. Man erkennt aus

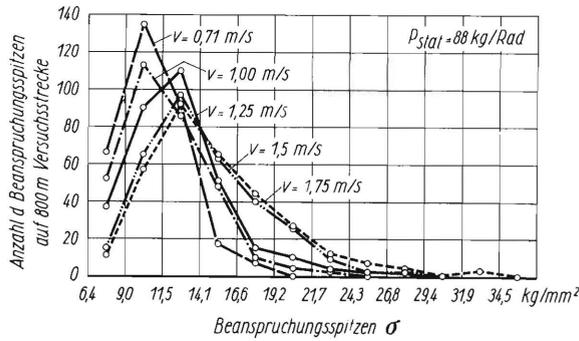


Bild 5. Beanspruchungen des Radkranzes bei Fahrt des Vielfachgerätes über Kopfsteinpflaster.

diesen Häufigkeitsverteilungen einmal die Zunahme der Beanspruchungen mit wachsender Fahrgeschwindigkeit und zum anderen ihre Grenzwerte. Am häufigsten sind Beanspruchungen im Gebiet von etwa 9 bis 14 kg/mm², höhere Beanspruchungen werden dann sehr schnell seltener. Die Anzahl der Messpunkte jeder Versuchsreihe ist gleich gross. Daraus folgt zwangsläufig, dass die Anzahl niedriger Beanspruchungen bei einer hohen Fahrgeschwindigkeit kleiner sein muss als bei einer kleineren Fahrgeschwindigkeit, weil bei einer hohen Fahrgeschwindigkeit entsprechend mehr grosse Beanspruchungen auftreten. Man kann diese Erscheinung durch Vergleich zweier beliebiger Häufigkeitsverteilungen jedesmal feststellen.

5. Folgerungen für die statischen Dehnungsmessungen.

Die früher durchgeführten statischen Dehnungsmessungen an Speichenrädern dienten hauptsächlich dazu, die Beanspruchungsverteilung in einigen Rädern zu erkennen und dadurch später eine Beschränkung der Messstellenanzahl zu erreichen, indem nur noch an den stark beanspruchten Radteilen Messungen durchgeführt werden sollten. Bei diesen Dehnungsmessungen war daher eine genaue Lastannahme nicht unbedingt nötig.

Nachdem durch die Beanspruchungsmessungen am fahrenden Rade Klarheit über die Grösse der auftretenden Kräfte erlangt war, können an sämtlichen anderen untersuchten Rädern (es standen insgesamt 19 Räder verschiedener Konstruktion zur Verfügung) die Beanspruchungen bei den Kräften ermittelt werden, die sich an ihnen einstellen würden, wenn eine bestimmte Fahrgeschwindigkeit und Hindernishöhe vorgegeben wird. Die Radialkräfte werden auf diese Weise bei allen Rädern unter der Annahme errechnet, dass die Fahrgeschwindigkeit 1,25 m/s = 4,5 km/h und die Höhe des starren Hindernisses 20 mm betrage. Es wird eine Höhe von 20 mm auf Grund der früher aufgestellten Häufigkeitsverteilungen gewählt, da diese Höhe etwa die obere Grenze der vorkommenden wirksamen Unebenheiten auf Kopf-

steinpflaster darstellt. Über die Ergebnisse wird nach Abschluss der Untersuchungen noch berichtet.

An den Rädern wurden neben den statischen Dehnungsmessungen bei Radialkräften auch solche bei Axialkräften durchgeführt. Verschiedene Überlegungen führten dazu, die Grösse der Axialkraft, die an einem Radkranz angreifen soll, gleich der normalen, statischen, senkrecht wirkenden Radbelastung anzusetzen.

B. Dauerfestigkeitsprüfung

Als Abschluss der Untersuchungen wurden die Speichenräder einer Dauerprüfung unterzogen. Die Beanspruchungsmessungen an einem fahrenden Gerät hatten Aufschluss über die Grösse der Beanspruchungen sowohl auf Kopfsteinpflaster als auch bei verschiedenen hohen Hindernissen gegeben. Die Räder konnten somit während der Dauerversuche weitgehend den gleichen Beanspruchungen, wie sie im normalen Fahrbetrieb auftreten, ausgesetzt werden. Diese gewünschte Angleichung setzte mehrere Versuche dynamischer Beanspruchungsmessungen am Dauerprüfstand voraus. Es musste darüber hinaus eine Annahme über die Laufstrecke, die Laufbahn und die Laufgeschwindigkeit getroffen werden. Angenommen wurden folgende Betriebsverhältnisse: Das Rad rolle im praktischen Betrieb je Einsatztag 250 m auf Kopfsteinpflaster und sei jährlich 20 Tage im Einsatz. Die Haltbarkeit solle mindestens 20 Jahre betragen. Mit diesen Annahmen beträgt die Laufstrecke $250 \cdot 20 \cdot 20 = 100\,000$ m auf Kopfsteinpflaster. Als Fahrgeschwindigkeit wurden $1,25 \text{ m/s} \approx 4,5 \text{ km/h}$ festgelegt.

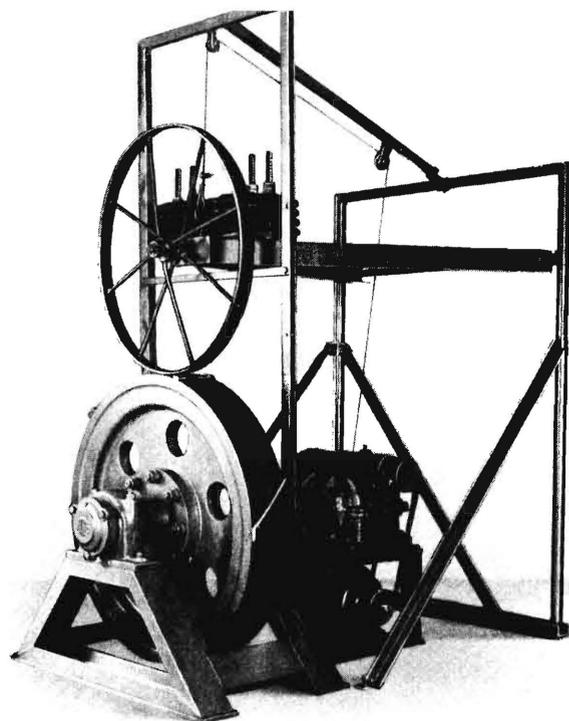


Bild 6. Dauerfestigkeits-Prüfstand für Räder.

1. Beschreibung des Dauerprüfstandes

Der Prüfstand für dynamische Radbeanspruchungen ist in Bild 6 dargestellt. Er wurde auf einem Betonklotz errichtet, um die Erschütterung des Gebäudes während des Betriebes möglichst klein zu halten. Bei den ersten Versuchen stellte sich aber heraus, dass der Betonklotz allein keinen genügenden Schutz gegen die auftretenden Erschütterungen bot. Aus diesem Grunde wurde er auf 4 Druckfedern gestellt, wodurch sich eine fast völlige Erschütterungsfreiheit des Gebäudes erzielen liess.

Der Prüfstand selbst besteht in seinen Hauptteilen aus einer Wippe, die in Gummi gelagert ist und an deren vorderem Ende ein Achsstummel für das jeweils zu untersuchende Rad angebracht werden kann. Ebenfalls vorn an der Wippe befindet sich eine Vorrichtung, um verschiedene Gewichtsscheiben für eine unterschiedliche Radbelastung anbringen zu können. Die Gewichte wurden nachträglich auf Gummi gelagert, um eine gewisse Elastizität zu erreichen.

Das Rad rollt auf einem Schwungrad von etwa 1 m Durchmesser ab. Auf diesem Schwungrad, das über ein festes Getriebe von einem Elektromotor angetrieben wird, können Nocken in verschiedener Anzahl und Höhe angebracht werden, sodass die Lauffläche des Schwungrades eine unendliche Strasse darstellt, deren Unebenheiten die Nocken sind. Die Fahrgeschwindigkeit kann durch Auswechseln der Riemenscheiben beliebig geändert werden. Ein Drahtseilzug am vorderen Ende der Wippe ermöglicht es, das Rad von dem Schwungrad abzuheben. Die Wippenlagerung ist in ihrer Höhe soweit verstellbar, dass sich Räder von 200 mm bis zu 1400 mm Durchmesser untersuchen lassen.

2. Versuchsbedingungen

Die Vorversuche wurden mit dem gleichen Rade wie bei den Messungen am fahrenden Gerät durchgeführt. Ein Dehnungsmesstreifen war wiederum an der Innenseite des Radkranzes befestigt. Im einzelnen wurden die Versuche auf die Weise durchgeführt, dass jeweils nur ein Nocken auf dem Schwungrad befestigt war. Das Rad stand bei Beginn des Versuches so, dass die Nockenante nach einer Schwungradumdrehung und der schon erreichten vollen Geschwindigkeit genau unter dem Dehnungsmesstreifen des Radkranzes auftraf. Die Fahrgeschwindigkeit betrug bei sämtlichen Versuchen 1,25 m/s. Die statische Radbelastung von 88 kg entsprach der am fahrenden Gerät.

Die ersten Versuche wurden mit Nockenhöhen von 2,8 bis 20 mm gefahren. Die Gewichtsscheiben zur Erzeugung der benötigten statischen Radbelastung waren starr mit der Wippe verbunden. Bild 7 zeigt das Ergebnis dieser Messungen. Die unterste,

ausgezogene Kurve ist aus Bild 4 übernommen und stellt den erstrebten, am fahrenden Gerät gemessenen Beanspruchungsverlauf dar. Man sieht, dass die Beanspruchungen (Kurve a) bei starrer Gewichts-an-bringung und gleicher Nockenhöhe wesentlich höher liegen als beim fahrenden Gerät.

Bei dem zweiten Versuch wurden die Gewichtsscheiben auf einer Gummiunterlage wenig federnd angebracht. Dadurch sollte die Konstruktion der Wippe der Elastizität des Gerätes angepasst werden. Das Messergebnis (Kurve b) zeigt schon eine wesentlich bessere Angleichung an die gewünschte Kurve.

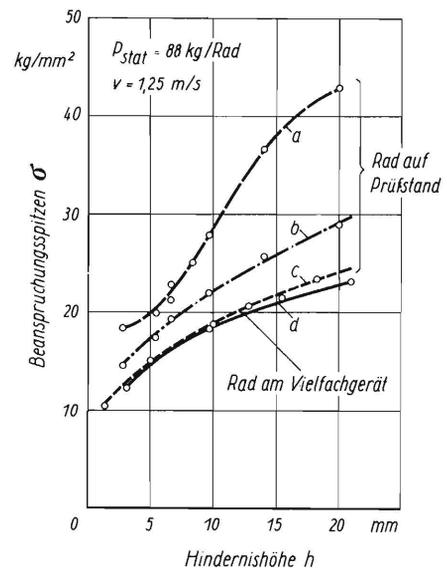


Bild 7. Beanspruchungen des Radkranzes auf dem Dauerprüfstand im Vergleich zu den Beanspruchungen des Radkranzes am Vielfachgerät bei Fahrt über Einzelhindernisse.

- a Prüfstandversuch, Radlast unabgedert
 - b „ „ „ auf Gummi gefedert
 - c „ „ „ auf Gummi gefedert und Nockenhöhe reduziert
 - d Fahrversuch mit Vielfachgerät (angestrebter Kurvenverlauf)
- Messpunkte sind Mittelwerte aus 3 Messungen.

Der dritte Versuch wurde im Hinblick auf Überlegungen unternommen, die dadurch hervorgerufen wurden, dass eine stark gekrümmte Fahrbahn mit Nocken andere Versuchsbedingungen ergibt als eine ebene Fahrbahn. Ein mit Nocken von reduzierter Höhe und mit gefederten Gewichtsscheiben gefahrener Versuch brachte eine recht gute Angleichung der Beanspruchungen (Kurve c) an diejenigen, die im Rade am fahrenden Gerät auftreten.

Zum Abschluss erfolgte noch unter den so gefundenen Versuchsbedingungen eine Aufnahme der Häufigkeitsverteilung der Beanspruchungen; sie ist in Bild 8 der entsprechenden Häufigkeitsverteilung an einem Gerät, das auf Kopfsteinpflaster fährt, gegenübergestellt. Die Übereinstimmung beider Häufigkeitsverteilungen kann als genügend angesehen werden, sodass die anschließende Dauerprüfung der

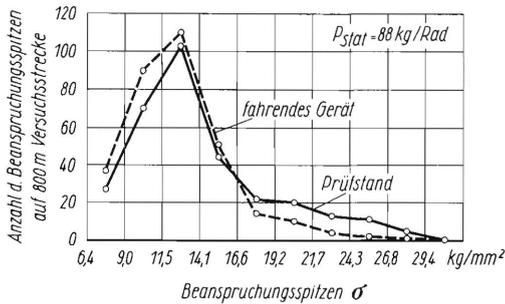


Bild 8. Beanspruchungen des Radkranzes auf dem Dauerprüfstand bei nachgeahmten Strassenhindernissen.

Räder unter ähnlichen Bedingungen wie im praktischen Betrieb durchgeführt werden konnte.

3. Durchführung der Dauerprüfung

Jedes Rad musste zunächst, gemäss den obenangewiesenen Bedingungen, 100 km auf einer dem Kopfsteinpflaster entsprechenden Nockenbahn laufen. Die Laufzeit betrug $100 \text{ km} / 4,5 \text{ km/h} = 22,2$ Stunden. In einem Protokoll wurden sämtliche Wahrnehmungen über Radschäden eingetragen. Trat während dieser Laufzeit an irgendeiner Stelle des Rades ein Bruch auf, so wurde der Versuch beendet. Bei geringfügigen Schäden, die die Einsatzfähigkeit des Rades nicht beeinträchtigen würden, wurde der Versuch über die volle Soll-Laufzeit fortgesetzt.

Viele Räder überstanden die geforderte Soll-Laufzeit ohne jegliche Beanstandungen, sodass sich bei ihnen auf Grund dieser Dauerprüfung noch keine Anhaltspunkte für gefährdete Stellen am Rade ergaben. Daher wurden diese Räder einer weiteren Laufstrecke von 50 km unter erschwerten Bedingungen unterworfen. Die statische Radlast und die Fahrgeschwindigkeit blieben bestehen, während die Nockenbahn geändert wurde. Auf dem Schwungradumfang von ungefähr 3 m wurden jetzt ein Nocken von 20 mm, ein Nocken von 15 mm und 2 Nocken von 15 mm Höhe (die letzteren zur Schwungradachse um 45 bzw. 135 Grad versetzt) aufgeschraubt. Durch die schrägen Nocken traten auch axiale Stosskraftkomponenten auf, sodass die Räder neben Radialkräften auch in der Richtung wechselnden Axialkräften ausgesetzt waren.

4. Ergebnis der Dauerprüfung

Die Dauerprüfung liess als Ergänzung zu den statischen Dehnungsmessungen durch Brüche oder sonstige Schäden eindeutig die schwachen Stellen an den Rädern erkennen, wobei es sich bei den meisten von ihnen um Stellen handelte, die durch Dehnungsmessungen nicht zu erfassen waren.

Betrachtet man die aufgetretenen Schäden, so kann zunächst festgestellt werden, dass in den weitestmeisten Fällen die Speichen zu Beanstandungen Anlass gaben. Einer der Gründe dafür ist

ihr unsachgemäßes Eingiessen in die Nabe. Bild 9 zeigt, dass die eingegossenen Speichenenden nicht mit Kerben versehen waren, um eine Lockerung zu erschweren. Ein weiterer Grund ist das Durchnieten der Speichen durch den Radkranz. Sind die Nietköpfe erhaben ausgeführt, so entsteht eine zusätzliche Beanspruchung des Rades durch diese, da sie die Anzahl der wirksamen Strassenunebenheiten und auch ihre wirksame Höhe vergrössern. Sind die Nietköpfe aber abgeflacht, so besitzen sie meistens zu wenig Material und reissen schnell aus (Bild 10). Das Auftreten der Speichenbrüche kurz unterhalb des Radkranzes (Bild 11) ist nicht überraschend, da die Dehnungsmessungen an diesen Stellen der Speichen Maximalwerte aufwiesen.

Die Brüche an den Schweissnähten lassen vermuten, dass beim Schweissen nicht immer genügend

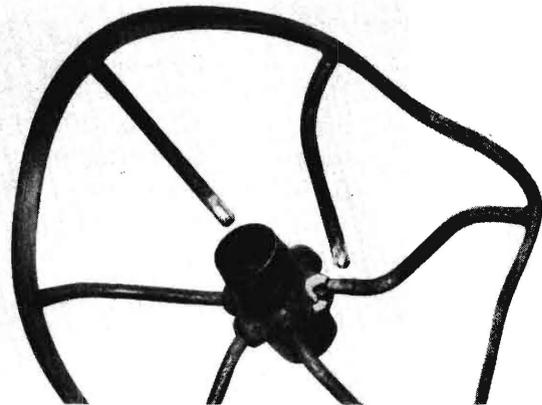


Bild 9. Speichenlockerungen an der Nabe.

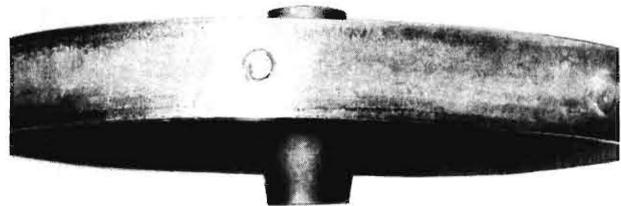


Bild 10. Abgerissener Nietkopf einer Speiche.

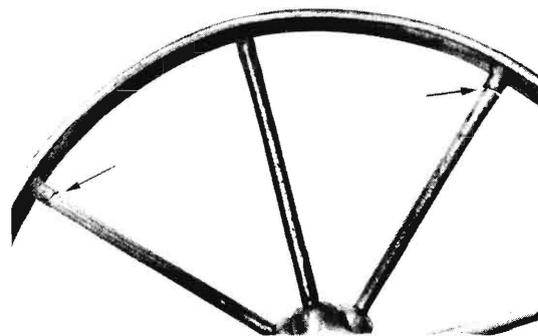


Bild 11. Speichenbrüche nahe an der Radkranzbefestigungsstelle.

Sorgfalt geübt wurde. Bei dem in Bild 12 gezeigten Rade war fast ein Drittel der Bruchfläche vollkommen verrostet, was darauf schliessen lässt, dass an dieser Stelle keine richtige Verschweissung stattgefunden hat. Weiterhin ist an dem Beispiel des Bildes 13 zu erkennen, wo die Schweissnähte nicht liegen sollen. Die Speichen dieses Rades sind in der Radebene sehr steif, wodurch auch bei geringen Radkranzdurchbiegungen hohe Beanspruchungen an den Stellen auftreten, an denen die Speichen mit der Nabe verschweisst sind und wo auch die ersten Risse auftraten.

C. Erkenntnisse aus den Untersuchungen

Die Untersuchungen erbrachten eine ganze Reihe von Erkenntnissen, die ohne eingehende Messungen nicht zu erlangen gewesen wären. Es ist nicht möglich, auf Grund dieser Untersuchungen eine für alle Fälle geltende optimale Radkonstruktion vorzuschlagen, da die Verwendungszwecke der Räder viel zu unterschiedlich sind. Möglich ist es aber, aus den Ergebnissen der Einzeluntersuchungen zu erkennen, welchen Einfluss diese oder jene Radabmessung oder konstruktive Einzelheit auf das Rad ausübt und somit aus der Vielzahl der einzelnen Einflüsse die für den jeweiligen Verwendungszweck günstigsten Möglichkeiten anzuwenden.

Durch ergänzende Überlegungen lässt sich weiterhin feststellen, dass die Belastung der Speichen mit zunehmender Radkranzsteifigkeit abnimmt. Die Radkranzsteifigkeit wird aber bei gleicher Materialmenge pro Längeneinheit durch sein Profil bestimmt, lässt sich also durch Profile mit hohem Trägheitsmoment günstig beeinflussen.

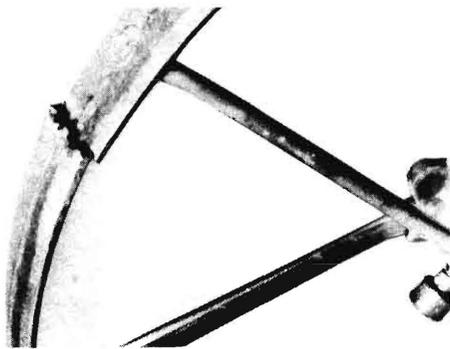


Bild 12. Trennbruch der Schweissnaht des Radkranzes.

Die Elastizität des Rades beeinflusst den Teil der Stosskräfte, der durch die unabgefederten Massen von Rad und Achse hervorgerufen wird, recht erheblich. Um die Stosskräfte klein zu halten, muss das Rad elastisch sein. Da der Radkranz aber möglichst steif sein soll, wie oben gefordert wurde, so kann die Elastizität, sofern man von besonderen Federgliedern absieht, nur noch von den Speichen

hergegeben werden. Damit wird auch die Belastung der einzelnen Speichen gleichmässiger.

Als Speichenprofile kommen Rundeisen-, Rohr-, Flacheisen- und evtl. mit einer Sicke versehene Blechprofile in Betracht.

Die Forderung nach einer möglichst grossen Elastizität der Speichen lässt hierbei Rohr- und gesickte Blechprofile ausscheiden, da eine grosse Elastizität der Speichen nur durch Biegung derselben zu erreichen ist. Es kommen also als elastische Speichen nur Flacheisen in Betracht, da die Werkstoffausnutzung bei Rundeisen wesentlich schlechter ist. Die Forderung nach grosser Elastizität der Speichen tritt aber ihrer Wirkung nach hinter der einer grossen Speichenanzahl und eines steifen Radkranzes zurück, sodass man damit zu Rädern mit auf Zug vorgespannten Speichen kommt.

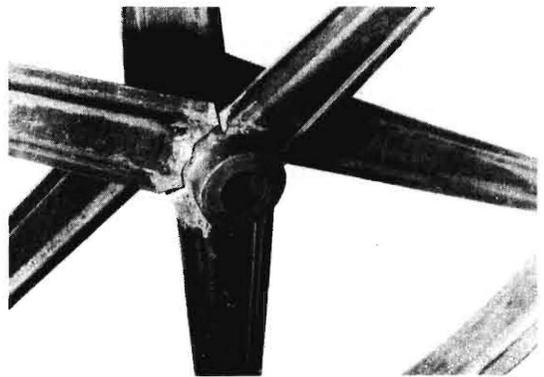


Bild 13. Schweissnahttriss an den Speichen.

Einreihige Speichenräder sind in den meisten Fällen bei Radialbelastung sehr steif und bei Axialbelastung sehr weich, wodurch besonders an den Speichen hohe Beanspruchungen entstehen.

Zweireihige Speichenräder besitzen bei Radialbelastung durch die sehr oft angewendeten gekröpften Rundeisenspeichen eine grössere Elastizität als einreihige Räder. Bei Axialbelastung haben sie den Vorteil einer wesentlich grösseren Seitenstabilität als die einreihigen Räder. Es ist daher, besonders bei grossen Raddurchmessern, den zweireihigen Speichenrädern der Vorzug vor den einreihigen Rädern zu geben.

Die Speichenbefestigung am Radkranz ist von dem Radkranzprofil und der Speichenart abhängig. Grundsätzlich sollten Befestigungsarten, bei denen die Speichen mit der Fahrbahn in Berührung kommen (z.B. durch Flacheisenradkranz durchgenietete Rundeisenspeichen), vermieden werden, da durch Verschleiss Lockerungen und Abreissen der Speichen entstehen. Bei den Speichenbefestigungen an der Radnabe ist bei eingegossenen Speichen darauf zu achten, dass sich an den Speichenenden, die eingegossen werden sollen, Kerben befinden, die einer Lockerung weitgehend entgegenwirken. Bei Speichen,

die an der Nabe angeschweisst sind, ist darauf zu achten, dass die Schweissnähte parallel zur Speichenachse verlaufen, um hohe Beanspruchungen in ihnen zu vermeiden.

D. Zusammenfassung

Bei den früheren statischen Dehnungsmessungen [1] konnten die Lastannahmen nur recht grob getroffen werden. Aus diesem Grunde wurden den theoretischen Betrachtungen über die Stossvorgänge beim Rollen eines Rades über ein Hindernis Beanspruchungsmessungen mit Dehnungsmessstreifen am Rade eines fahrenden Vielfachgerätes gegenübergestellt. Aus den so gewonnenen Erfahrungswerten liess sich näherungsweise eine Formel für die Stosskraft in einem fahrenden Gerät aufstellen, mit deren Hilfe sich die momentane Radlast beim Fahren über Unebenheiten rechnerisch erfassen lässt. Anhand dieser Formel wurden sodann für bestimmte Verhältnisse die Kräfte errechnet, mit denen die Räder bei den folgenden der Einfachheit halber statisch durchgeführten Dehnungsmessungen zu belasten waren. Das Ergebnis dieser Dehnungsmessungen liess Schlüsse auf den Einfluss der Abmessungen und der Gestaltung einzelner Radteile zu und zeigte deutlich die gefährdeten Stellen auf. Im Rah-

men der statischen Dehnungsmessungen wurde weiterhin erkannt, dass bei den Speichenrädern die Beanspruchungen den jeweiligen Radbelastungen proportional sind und das Verhältnis der Beanspruchungen an zwei verschiedenen Messtellen des Rades bei statischer und dynamischer Belastung gleich ist. Betrachtungen über das Verhältnis der Beanspruchungen an Radkranz und Speichen eines Rades schlossen sich an.

Die Messungen und theoretischen Betrachtungen wurden durch eine Dauerprüfung der Räder ergänzt. Auf einem dynamischen Räder-Prüfstand wurden Beanspruchungen erzeugt, die den tatsächlichen beim Fahren auf einer Strasse weitgehend angepasst waren. Das Ergebnis der Dauerprüfungen bestätigte zum grossen Teil die Aussagen auf Grund der statischen Prüfungen und zeigte darüber hinaus die schwachen Stellen der Räder auf, die durch statische Untersuchungen nicht erfasst werden konnten.

Schrifttum

- [1] Müller, H.: Beanspruchung von Speichenrädern. Grundlagen der Landtechnik 1951, Heft 1, S. 68/73.
- [2] Kloth, W.: Eiserne Speichenräder. Landtechnik 6 (1953) S. 250/251.

Institut für Landtechnische Grundlagenforschung
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode
Direktor: Prof. Dr. Ing. W. Kloth

Anschrift des Verfassers: Dipl.-Ing. Hans Müller, (20b) Braunschweig, Forschungsanstalt für Landwirtschaft

STAUBSCHUTZ VON LAGERN

Von Gerhard Hockner

Der beim Betrieb von Maschinen aller Art festzustellende Verschleiss von geschmierten Flächen, also auch von Lagern, besteht in der Hauptsache aus

1. dem reinen Gleitverschleiss, der beim Gleiten der Lagerflächen aufeinander entsteht, und
2. einem zusätzlichen Verschleiss, der durch harte Teilchen, die zwischen die Gleitflächen gelangen, hervorgerufen wird.

Verschleiss der ersteren Art kann durch geeignete Auswahl der Werkstoffe und vor allem richtige Bemessung der aufeinander gleitenden Teile, ferner gute Werkarbeit, ausreichende Schmierung und geeignete Schmiermittelwahl herabgesetzt, bzw. sofern eine Vollschmierung im hydrodynamischen Sinne erreicht wird, vollständig verhindert werden.

Der zusätzliche Verschleiss durch feste Teilchen, die in das Lager eingedrungen sind, erreicht

häufig die Höhe des reinen Gleitverschleisses, oft sogar ein Vielfaches desselben. Eine Herabsetzung dieses zusätzlichen Verschleisses kann auf zwei Arten erfolgen, und zwar

1. durch geeignete Werkstoffpaarung, dies gilt insbesondere für Gleitlager, und
2. durch teilweise oder gar vollständige Verhütung des Eindringens der festen Teilchen zwischen die Gleitflächen durch Abdichtung der Lager gegen die Aussenluft.

Während durch Wahl einer geeigneten Werkstoffpaarung lediglich erreicht wird, dass die schädliche Auswirkung der in das Lager eingedrungenen harten Staubteilchen herabgesetzt wird und damit eine vollständige Unterbindung des zusätzlichen Verschleisses nicht möglich ist, erscheint es wesentlich günstiger, das Eindringen der festen Staubteilchen in das Lager durch geeignete Dichtungen zu verhindern.