AUSWAHL DER FERTIGUNGSTOLERANZEN BEIM ZUSAMMENBAU VON WAGENKASTEN UND FAHRGESTELL AN AUTOBUSSEN MIT FAHRGESTELL

Von

P. Michelberger und I. Körmendy

Lehrstuhl für Schienenfahrzeuge, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 12. Oktober 1963)

Vorgelegt von Prof. Dr. G. Rudnai

1. Einleitung

In unserer Abhandlung [1] haben wir bewiesen, daß die Beanspruchung des Fahrgestells bzw. der Seitenwand des Wagenkastens von Omnibussen — angenommen, daß die Querträger gleichmäßig verteilt sind und entlang der Trägerlänge eine konstante Starrheit herrscht — mit simultanen Differenzengleichungen berechnet werden kann. Bei Annahme unendlich starrer Querträger handelt es sich nur um Differenzengleichungen zweiter Ordnung, und das Biegemoment des Fahrgestell-Längsträgers bzw. der Seitenwand läßt sich aus einer verhältnismäßig einfachen geschlossenen Formel bestimmen. Werden die einzelnen Querträger — ausgehend von einem der Omnibusenden — mit 1,2,3,... i, ...m bezeichnet und wird an den einzelnen Querträgern die Größe des vor dem Zusammenbau abzumessenden Spieles mit y_i angegeben, ergibt sich das Moment der Längsträger bei einem beliebigen k-ten Querträger (es wird nur die zur Wagenlängsachse symmetrische Vorspannung berücksichtigt) zu

$$M_k = \pm 3e^{\varphi} \sum_{i=1}^{m} A_i y_i e^{-\varphi|i-k|} (-1)^{|i-k|} . \tag{1}$$

Wenn der Summationsindex i mit dem festen Index k nicht übereinstimmt, gilt hier:

$$A_1 = A_m = -A = \frac{-2}{al^2 (4e^{-\varphi} - 15)}$$

$$A_2 = A_{m-1} = 6\,A = \frac{12}{al^2 (4e^{-\varphi} - 15)}$$

$$A_3 = A_4 = \ldots = A_{m-2} = B = \frac{6}{al^2 (2e^{-\varphi} - 7)} ,$$

während man, sofern der Summationsindex i mit dem festen Index k übereinstimmt,

$$A_1 = A_m = 0$$

$$A_i = A\,\frac{9 - 2e^{-\varphi}}{e^{\varphi}}, \quad \text{wenn } 3 > i \text{ oder } i > m - 2$$

$$A_i = B\,\frac{5 - e^{-\varphi}}{3e^{\varphi}}, \quad \text{wenn } 2 < i < m - 1,$$

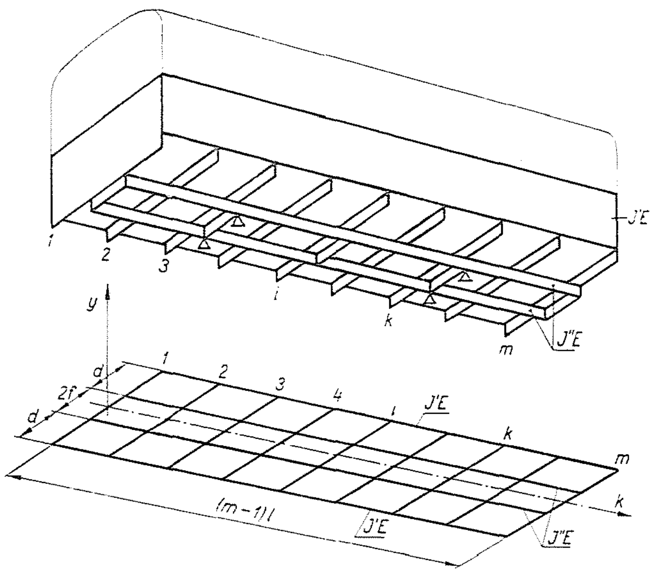

Abb. 1

ferner

$$a = \frac{1}{J'E} + \frac{1}{J''E}$$

$$e^{-\varphi} = 2 - \sqrt{3}$$

erhält. Die übrigen Bezeichnungen sind aus Abbildung 1 ersichtlich.

Wir haben ferner nachgewiesen [1], daß der Wert von M_k gegenüber der Verschiebung des Koordinatensystems in Richtung y bzw. gegenüber einer kleinen (wenige Grade betragenden) Verdrehung desselben invariant ist, daß also

$$M_k(y_i) \equiv M_k(ai + y_i + b) = M_k(y_i'), \tag{2}$$

worin a und b beliebig angenommene Zahlen sind.

Die Beziehung (2) ermöglicht, unser Koordinatensystem für die Berechnungsaufgabe stets auf die geeignetste Weise anzunehmen. In der Abhandlung

[1] wurde der Wert von y_i und y_m im allgemeinen nach Belieben mit Null gleichgesetzt, so daß in diesem Fall die in der Formel (1) vorkommende Summation lediglich von $i = 2$ bis $i = m - 1$ vorzuschreiben ist.

In der angeführten Abhandlung sind wir auch auf die Untersuchung der antimetrischen Vorspannung, bezogen auf die Längsachse des Omnibusses, eingegangen, im vorliegenden Beitrag behandeln wir jedoch diese Frage nicht, weil die genannte Vorspannung, formal betrachtet, zu Beziehungen führt, die der symmetrischen Vorspannung völlig ähnlich sind.

2. Gesichtspunkte für die Wahl der Fertigungstoleranz

Nach dem bisherigen Verfahren läßt sich die Belastung errechnen, die sich an einem Autobus aus Montage-Ungenauigkeiten ergibt, angenommen, daß der Wert von y an jedem Verbindungspunkt bekannt (gemessen) ist.

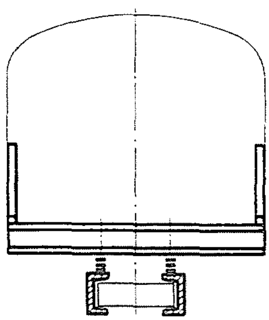

Abb. 2

Während des Zusammenbaues bietet sich aber dazu nur in den seltensten Fällen eine Möglichkeit. Der Kraftwagenbauer braucht eigentlich die Umkehrlösung der Aufgabe, d. h. er muß darüber im klaren sein, wie groß beim Zusammenbau die noch zulässige Montage-Ungenauigkeit sein darf, damit die in den einzelnen Trägern entstehenden Beanspruchungen den vom Konstrukteur vorgeschriebenen, zulässigen Wert nicht überschreiten.

Während aber die gestellte Aufgabe in der Abhandlung [1] lediglich eine Lösung hatte, gibt es für die Umkehraufgabe mehrere, voneinander zahlenmäßig wesentlich abweichende Lösungsmöglichkeiten. Die Mehrwertigkeit der Lösung ergibt sich — wie dies aus dem nachfolgenden hervorgeht — daraus, daß die in den einzelnen Trägern verursachte Beanspruchung nicht nur von der Größe der Montagespiele, sondern auch von der Folgeanordnung derselben abhängt.

Zur ausführlicheren Analyse muß der Montagevorgang selbst überblickt werden; Fahrgestell und Wagenkasten werden mit zwischengelegten Unterlagen miteinander verschraubt (Abb. 2). Der Montageanweisung gemäß müssen an zwei geeignet ausgewählten Verbindungspunkten Zwischenlagen so lange gesetzt werden, bis an sämtlichen anderen Verbindungspunkten ein Spiel entsteht. (Der Einfachheit halber wählen wir in der vorliegenden Untersuchung als Ausgangspunkt den 1. und m-ten Verbindungspunkt.) In dem anschließenden Montagevorgang sind die auf diese Weise entstandenen Spiele durch Unterlagscheiben auszufüllen. Die Spiele lassen sich aber im allgemeinen nicht völlig beheben, da ihre Größe nicht das ganzzahlige Vielfache der Stärke der Unterlagsscheiben beträgt. Die Größe des Spieles also, das in der zweiten Phase der Montage noch besteht, ist ein Wert zwischen Null und der Stärke der Unterlagsscheibe. Im dritten Arbeitsgang der Montage wird der Wagenkasten mit dem Fahrgestell verschraubt. Die Verbindung behebt die Spiele, gleichzeitig erregt sie aber auch Belastungen in der Konstruktion. Unsere Aufgabe besteht letzten Endes darin, die Stärke der in die Montagewerkstatt gelangenden Unterlagsscheiben vorzuschreiben, da die Stärke der Unterlagsscheibe auch die maximale Größe des durch Verschrauben zusammenzuziehenden Spieles eindeutig bestimmt. In unserer Untersuchung bleibt die elastische Deformation der Unterlagsscheibe wegen ihrer Geringfügigkeit unberücksichtigt, die berechneten Belastungen liegen also etwas über den tatsächlichen.

3. Lösung der Aufgabe im ungünstigsten Falle

Aus der Beziehung (1) läßt sich feststellen, daß das Biegemoment, welches durch die Vorspannung an der i-ten Stelle verursacht wird, an den Längsträgern entlang zwischen der k-ten und der ihr folgenden $k+1$-ten Stelle sein Vorzeichen ändert, da das Biegemoment als positiv gilt, wenn $i-k$ eine gerade, und als negativ, wenn $i-k$ eine ungerade Zahl ist.

Die ungünstigste Spielanordnung erhält man unter Berücksichtigung des Gesagten offenbar dann, wenn die Spiele so angenommen werden, daß das aus ihrer Wirkung resultierende Biegemoment an einer ausgewählten Stelle k aus der Summe von Biegemomenten mit gleichem Vorzeichen besteht.

Eine derartige Belastungsart liegt vor, wenn die aufeinander folgenden Spiele abwechselnd als positive bzw. als negative Werte angenommen werden. Die maximale Beanspruchung ergibt sich dann, wenn diese Spiele gleichzeitig den zulässigen maximalen Wert haben (Abb. 3a).

Da bei der Montage kein negatives Spiel auftreten kann, wird man das Koordinatensystem auf Grund der Gleichung (2) zweckmäßig in Richtung y so weit verschieben, daß eben keine negativen Spiele auftreten. In diesem Falle hat das Spiel abwechselnd die Werte Null bzw. y_{max}.

Im weiteren sei angenommen, daß die Größe des Spieles an den Verbindungspunkten mit ungerader laufender Nummer den Nullwert, an den geradzahligen Stellen hingegen den maximalen Wert hat (Abb. 3b). Das

Moment der Längsträger erreicht bei jedem Querträger einen lokalen Extremwert. Die zulässige Größe des Spieles läßt sich offenbar aus der Annahme errechnen, daß das lokale Biegemomentenmaximum des höchsten Absolutwertes gerade den zulässigen Wert erreicht, d. h. es ist das Maximum von M_k in Abhängigkeit von k zu suchen. Bei der angenommenen Anordnung der Spiele gilt für den Wert von M_k anhand von (1) die Beziehung

$$|M_k| = |3\, e^{\varphi}\, y_{\max} \sum_{i=2,4,6\ldots} A_i\, e^{-\varphi|i-k|}|\,. \tag{3}$$

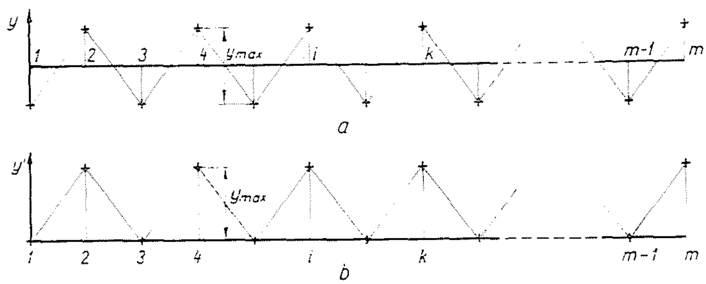

Abb. 3

M_k ist laut (1) nur für die Ganzwerte von k definiert, weshalb die Stelle des Extremwertes durch Einzelvergleiche der Funktionswerte bestimmt werden kann. Dieses Verfahren läßt sich für unendlich viele Querträger (Verbindungspunkte) leicht durchführen. (Nach der Abhandlung [1] können fünf bis sechs Querträger in der Praxis schon als unendlich viel angesehen werden.) Die Berechnung soll zunächst für den ungeraden Wert von k vorgenommen werden.

Zweckmäßig wird man die auf der rechten Seite der Gleichung (3) befindliche Summe in zwei Teile aufspalten, je nachdem, ob i größer oder kleiner ist als k :

$$|M_k| = |3 e^{\varphi} y_{\max} \left\{ \sum_{i=2,4,6\ldots}^{<k} A_i\, e^{(i-k)\varphi} + \sum_{i>k} A_i\, e^{(k-i)\varphi} \right\}|\,. \tag{4}$$

Praktisch kann der Wert von A_i als konstant ($A_i = B$) angenommen werden (nur der Wert von A_2 weicht etwas von den anderen Werten von A_i ab), es läßt sich also

$$|M_k| = |3\, e^{\varphi}\, y_{\max}\, B \left\{ \sum_{i=2,4\ldots}^{<k} e^{(i-k)\varphi} + \sum_{i>k} e^{(k-i)\varphi} \right\}| \tag{4a}$$

herausheben.

Bei einem Omnibus mit unendlich vielen Querträgern und bei endlichem k-Wert ergibt die erste Summe des Ausdrucks (4a) den Betrag einer endlichen, seine zweite Summe hingegen den einer unendlichen geometrischen Reihe.

Wird der Wert von k genügend groß gewählt, d. h., wird ein Verbindungspunkt um die Mitte des Omnibusses untersucht, so ergeben mit guter Näherung zwei unendliche geometrische Reihen den Wert des durch die Vorspannung erregten Biegemomentes zu

$$|M_k| = |3\, e^{\varphi}\, y_{\max}\, B\, 2e^{-\varphi}\, (1 + e^{-2\varphi} + e^{-4\varphi} + \ldots)| . \tag{5}$$

Da von geometrischen Reihen mit gleichem Ausgangswert und gleichem positivem Quotienten die Summe der unendlichen Reihe immer größer ist als die der endlichen Reihe, ergibt die Formel (5) den Grenzwert des Maximums von M_k.

Hat man die Summe der unendlichen geometrischen Reihe ermittelt und die Gleichung geordnet, läßt sich die Größe des höchstzulässigen Spieles aus dem zulässigen Biegemoment in den Längsträgern oder, was diesem gleichwertig ist, die maximale Stärke der bei Montage anzuwendenden Unterlagsscheiben rechnerisch bestimmen aus der Beziehung

$$y_{\max} = \frac{M_{zul}}{6B}\,(1 - e^{-2\varphi}) . \tag{6}$$

(Für den geraden Wert von k erhält man ein ganz gleiches Resultat, und auch die Berechnungsschritte stimmen völlig überein, wenn man das Koordinatensystem im Sinne der Gleichung (2) um den Wert y_{max} in positive Richtung verschiebt. Die Größe der Spiele beträgt in diesem Koordinatensystem an den Verbindungspunkten mit geradzahliger laufender Nummer Null, an den Stellen mit ungeradzahliger Nummer dagegen $y_{\max}$.)

Durch Verordnung der auf Grund der Beziehung (6) gewählten Scheibenstärke wurde die Möglichkeit zum Entstehen eines den vorgeschriebenen Wert übersteigenden Biegemomentes völlig ausgeschlossen, doch hatten wir in unseren Berechnungen willkürlich angenommen, daß die Größe der Spiele an den aufeinander folgenden Verbindungspunkten abwechselnd Null bzw. maximal ist. Da indes dieser Fall nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit eintritt, ergibt sich daraus eine zu strenge Beschränkung hinsichtlich der Größe des maximalen, noch zulässigen Spieles.

4. Bestimmung der zulässigen Unterlagsstärke nach wahrscheinlichkeitsrechnerischen Erwägungen

Zur Berechnung der Größe des zulässigen Spieles erhält man genügende Bedingungen auch dann, wenn die Größe der Spiele als Zufallsveränderliche, und zwar als unabhängige Zufallsveränderliche betrachtet wird.

Es sei angenommen, daß die Spielgrößen an jeder Verbindungsstelle eine normale Wahrscheinlichkeitsverteilung aufweisen. (Da die untere und die obere Grenze der Spielgröße gegeben ist, ist diese Annahme prinzipiell unzutreffend, weil bei einer normalen Verteilung — wenn auch mit geringer Wahrscheinlichkeit — doch sehr große Spiele bzw. Überdeckungen vorkommen können.) Eine sehr gute Näherung ergibt sich jedoch, wenn die vorkommende maximale Spielgröße gleich dem Sechsfachen der Streuung angenommen und die zu erwartende Spielgröße als gleich der Hälfte des maximalen Spieles betrachtet wird. (Wie schon mehrmals angedeutet, beträgt die Spielgröße an der 1. und an der m-ten Stelle — wegen der Wahl des Koordinatensystems — Null, es ist also als eine uneigentliche Verteilung anzusehen, deren Streuung gleich Null ist.)

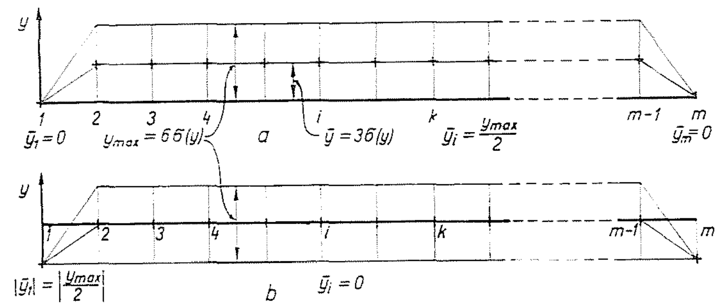

Abb. 4

Als Häufigkeitsfunktion der angenommenen Verteilung gilt für die zwischenliegenden Verbindungspunkte auf Grund des obigen

$$f(y) = \frac{6}{y_{\max}\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{(y-y_{\max}/2)^2}{y_{\max}^2/18}}. \tag{7}$$

Ist die Verteilung der Spielgrößen bekannt, läßt sich auch die Häufigkeitsfunktion der Momentenverteilung errechnen. Die Spiele an den einzelnen i Stellen verteilen sich paarweise voneinander unabhängig, und der Wert des gesuchten Momentes ist auf Grund der Beziehung (1) eine lineare Kombination der Spielgröße y; da ferner die Spielgröße y eine Zufallsveränderliche ist, wird auch M eine Zufallsveränderliche, und zwar wegen der normalen Verteilung von y eine Zufallsveränderliche mit Normalverteilung sein. Der voraussichtliche Wert sowie die Streuung des Biegemoments läßt sich aus dem zu erwartenden Wert der Spiele bzw. aus der Streuung derselben auf einfache Weise bestimmen. Der zu erwartende Wert, oben mit einem Strich bezeichnet, ergibt sich unseren vorangehenden Feststellungen gemäß (Abb. 4a) zu

$$\left.\begin{aligned} &\bar{y}_1 = \bar{y}_m = 0 \\ &\bar{y}_2 = \bar{y}_3 = \ldots = \bar{y}_i = \ldots = \bar{y}_{m-1} = \frac{y_{\max}}{2}\,. \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Verschiebt man zur Bestimmung des voraussichtlichen Biegemomentenwertes das gewählte Koordinatensystem im Sinne der Beziehung (2) in Richtung y um den Wert $\frac{y_{\max}}{2}$, dann nimmt die Beziehung (8) die Form

$$\left.\begin{aligned} \bar{y}_1' = \bar{y}_m' &= \frac{y_{\max}}{2} \\ \bar{y}_2' = \bar{y}_3' = \ldots &= \bar{y}_{m-1}' = 0 \end{aligned}\right\} \tag{8'}$$

an (Abb. 4b).

Der Ausdruck für das an den Längsträgern erregte Biegemoment läßt sich an der Verbindungsstelle k sehr einfach aufschreiben, da er bloß aus zwei Gliedern besteht, man hat also

$$|\overline{M}_k| = 3e^{\varphi} \left| A_1 \bar{y}_1' e^{-\varphi(k-1)} (-1)^{k-1} + A_m \bar{y}_m' e^{-\varphi(m-k)} (-1)^{m-k} \right| . \tag{9}$$

Mit den Werten von A_1 und A_m sowie nach Heraushebung der Beziehung (8') und nach Ausklammern gilt

$$|\overline{M}_k| = 3e^{2\varphi} \frac{y_{\max}}{2} \left| A \left\{ e^{-\varphi(k-1)} (-1)^{k-1} + e^{-\varphi(m-k)} (-1)^{m-k} \right\} \right| . \tag{9'}$$

Da der Wert von $M_1 = M_m$ jedenfalls Null ist, tritt der maximale Wert des Ausdrucks (9) an den Stellen $k = 2$ und $k = m - 1$ auf, um die Mitte des Omnibusses dagegen nimmt seine Größe ab (Abb. 5a). Bei unendlich vielen Querträgern ist der annehmbare Wert des Biegemoments an der Mittelverbindungsstelle Null. Praktisch ist $\overline{M}_k = 0$, wenn $4 < k < m - 3$.

Nach unserer Annahme (7) besitzt die Streuung je einer Spielgröße den Wert $\sigma(y) = \frac{y_{\max}}{6}$. Für die Streuung der Biegemomente dagegen erhält man nach (1)

$$\sigma(M_k) = \sqrt{9\, e^{2\varphi} \sum_{i=1}^{m} A_i^2\, \sigma^2(y_i)\, e^{-\varphi|i-k|2}} \tag{10}$$

und hireaus:

$$\sigma(M_k) = \frac{e^{\varphi}\, y_{\max}}{2} \sqrt{\sum_{i=1}^{m} A_i^2\, e^{-\varphi|i-k|2}} . \tag{10'}$$

Es scheint zweckmäßig, die Summe unter der Quadratwurzel für die Zwecke der Untersuchungen in drei Glieder aufzuteilen, und zwar folgendermaßen

$$\sigma(M_k) = \frac{e^{\varphi}\, y_{\max}}{2} \sqrt{\sum_{i<k} A_i^2\, e^{-2\varphi(k-i)} + \sum_{i>k} A_i^2\, e^{-2\varphi(i-k)} + \underset{i=k}{A_k^2}} . \tag{11}$$

In seinem Aufbau steht der Ausdruck (11) der Gleichung (4) sehr nahe. Der Wert von A_i kann mit guter Näherung als konstant betrachtet werden (wie dies bereits mehrmals geschehen ist), der Wert von A_k hingegen ist — mit Ausnahme der Stellen $k = 1,2$ bzw. $k = m, m - 1$ — proportional dem Wert von A_i.

Damit hat man

$$\sigma(M_k) = \frac{e^{\varphi} y_{\max} B}{2} \sqrt{\sum_{i<k} e^{-2\varphi(k-i)} + \sum_{i>k} e^{-2\varphi(i-k)} + \left[\frac{5 - e^{-\varphi}}{3\, e^{\varphi}}\right]^2} . \qquad (12)$$

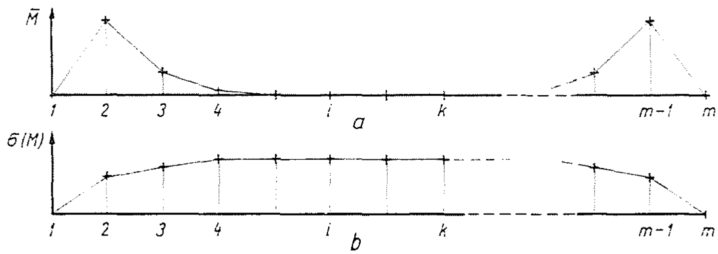

Abb. 5

Die Summe ergeben, ähnlich wie der Ausdruck (4), je eine geometrische Reihe. Im Sinne des in Abschnitt 3 beschriebenen Gedankenganges läßt sich feststellen, daß die Biegemomente um die Mitte des Busses die größte Streuung erreichen (Abb. 5b). (Das dritte Glied des Ausdrucks unter der Quadratwurzel ist von k annähernd unabhängig, so daß die Stelle des Maximums durch dieses Glied nicht beeinflußt wird.)

Es sei bemerkt, daß die Häufigkeitsfunktion der Spiele an allen Verbindungspunkten (ausgenommen die 1. und die m-te Stelle) durch die Gleichung (7) beschrieben wurde, während die Häufigkeitsfunktion der Biegemomentenverteilung an allen Stellen k durch je eine andere Beziehung ausgedrückt wird, da der voraussichtliche Wert und auch die Streuung der Biegemomente Funktionen von k sind. Im weiteren schreiben wir die Häufigkeitsfunktion von M_k nicht auf (obwohl sich diese auf einfache Weise schreiben läßt, wenn die Streuung und der zu erwartende Wert bekannt sind), da die Kenntnis der Streuung und des voraussichtlichen Wertes an und für sich genügt, um die zulässige Spielgröße bestimmen zu können.

Wird angenommen, daß der Wert des zulässigen Biegemomentes in der Tragkonstruktion

$$M_{zul} \leqq M_{\max} = |\bar{M}_k \pm 3\,\sigma(M_k)|_{\max} \qquad (13)$$

beträgt, d. h. daß an jeder beliebigen Verbindungsstelle der Wert des auftretenden Biegemomentes kleiner ist als die Summe, die an der fraglichen Stelle durch Wahrscheinlichkeitsrechnung aus dem zu erwartenden Wert des

Momentes und dessen dreifacher Streuung gewonnen wurde, dann ist praktisch jede Möglichkeit des Entstehens eines Biegemomentes, welches das zulässige überschreitet, ausgeschaltet.

Mit den Gleichungen (9′) und (11) läßt sich aus der Gleichung (13) der Wert von $y_{\max}$ ausdrücken:

$$y_{\max} = \frac{\frac{2}{3} M_{zul}\, e^{-\varphi}}{\left[e^{\varphi} \left| A\left\{e^{-\varphi(k-1)}(-1)^{k-1} + e^{-\varphi(m-k)}(-1)^{m-k}\right\}\right| + \sqrt{\sum_{i<k} A_i^2\, e^{-2\varphi(k-i)} + \sum_{i>k} A_i^2\, e^{-2\varphi(i-k)} + A_k^2}\right]_{\max}} \tag{14}$$

Die größte, eben noch zulässige Spielgröße (das Minimum der Werte $y_{\max}$) ergibt sich, wenn der Nenner des Bruches auf der rechten Seite des Ausdrucks (14) seinen maximalen Wert annimmt. Das Maximum läßt sich ähnlich dem in Abschn. 3 beschriebenen Verfahren durch einen Vergleich der bei positivem ganzem k angenommenen Werte der Funktion

$$\begin{aligned} f(k) = e^{\varphi} \left| A\left\{e^{-\varphi(k-1)}\,(-1)^{k-1} + e^{-\varphi(m-k)}(-1)^{m-k}\right\}\right| + \\ + \sqrt{\sum_{i<k} A_i^2\, e^{-2\varphi(k-i)} + \sum_{i>k} A_i^2\, e^{-2\varphi(i-k)} + A_k^2} \end{aligned} \tag{15}$$

bestimmen. Ist die Zahl der Querträger des Omnibusses unendlich (praktisch reicht es aus, wenn mehr als fünf Querträger vorhanden sind), dann weist die Funktion (15) an den Stellen $k = 2$ und $k = m - 1$ Lokalmaxima auf. Der Wert des Maximums beträgt

$$f(2) = f(m-1) = |A| + \sqrt{B^2 \frac{e^{-2\varphi}}{1 - e^{-2\varphi}} + A^2 \left(\frac{9 - 2\, e^{-\varphi}}{e^{\varphi}}\right)^2}. \tag{16}$$

Damit ergibt sich die bei Montage anwendbare maximale Unterlagenstärke zu

$$y_{\max} = \frac{\frac{2}{3} M_{zul}\, e^{-2}}{|A| + \sqrt{B^2 \frac{e^{-\varphi}}{1 - e^{-2\varphi}} + A^2 (9\, e^{-\varphi} - 2\, e^{-2\varphi})^2}}. \tag{17}$$

Mit guter Näherung kann angenommen werden, daß $B \approx 6\,A$; damit läßt sich der Ausdruck (17) weiter umformen in

$$y_{\max} \leqq \frac{M_{zul}}{6|B|} \frac{24\, e^{-\varphi}}{1 + \sqrt{\frac{36\, e^{-2\varphi}}{1 - e^{-2\varphi}} + (9 e^{-\varphi} - 2 e^{-2\varphi})^2}}. \tag{17'}$$

Die Unterlagenstärke, bestimmt durch den Ausdruck (17'), ergibt sich — unter sonst gleichen Bedingungen — zu dem etwa Zweifachen des Wertes, der aus der Formel (6) errechnet wurde, d. h. durch wahrscheinlichkeitsrechnerische Erwägungen kann bewiesen werden, daß man nach dem in Abschnitt 3 beschriebenen Verfahren eine unnötig strenge Montage-Vorschrift erhält.

5. Zahlenbeispiel

Geometrische Angaben eines Omnibusses der regelmäßigen Fahrgestell-Bauart [1]:

Gesamtlänge	$L = 11\,000$ mm
Anzahl der Querträger	$m = 9$
Abstand zwischen zwei benachbarten Querträgern	$l = 1375$ cm^4
Trägheitsmoment des Fahrgestell-Längsträgers an der ganzen Länge entlang	$I'' = 3\,000$ cm^4
Trägheitsmoment des Seitenwand-Längsträgers an der ganzen Länge entlang	$I' = 6\,000$ cm^4
Elastizitätsmodul des Trägermaterials...	$E = 2{,}1 \cdot 10^6$ kp/cm^2

Auf Grund der geometrischen Daten ist

$$\left.\begin{aligned} A_2 &= A_8 = -0{,}091\,E \\ A_3 &= A_4 = \ldots A_7 = -0{,}0981\,E\,, \end{aligned}\right\}\text{wenn } i \neq k$$

$$\left.\begin{aligned} A_2 &= A_8 = -0{,}0344\,E \\ A_3 &= A_4 = \ldots = A_7 = -0{,}0415\,E\,, \end{aligned}\right\}\text{wenn } i = k.$$

Zulässiges Biegemoment im Fahrgestell-Längsträger:

$$M_{\text{zul}} = 33\,200 \text{ cmkp}$$

zulässige Spielgröße im Falle der ungünstigsten Spielordnung:

$$y_{\max} = 2{,}49 \text{ mm}$$

zulässige Spielgröße, bestimmt durch unsere angeführten wahrscheinlichkeitsrechnerischen Erwägungen:

$$y_{\max} = 4{,}70 \text{ mm}.$$

In dem in der Abhandlung [1] gegebenen Zahlenbeispiel betrug die gegebene maximale Spielgröße (in einem verschobenen Koordinatensystem) 6 mm, d. h. selbst ein Fall, der wesentlich ungünstiger ist, als die auf Grund einer wahrscheinlichkeitsrechnerischen Erwägung bestimmte Spielgröße, hat kein Biegemoment im Längsträger hervorgerufen, das das zulässige übersteigt, die Wahrscheinlichkeitsrechnung liefert also Ergebnisse, die die erforderliche Sicherheit gewährleisten.

Zusamenfassung

Die Fertigungs-(Montage-) Toleranz bei Kraftomnibussen mit Fahrgestell läßt sich aus der für Rahmenkonstruktionen zulässigen Beanspruchung nach mehreren Verfahren (die aber voneinander wesentlich abweichende Resultate ergeben) bestimmen. Die theoretisch ungünstigste Spielanordnung hat eine zu strenge Toleranz zur Folge. Eine Wahrscheinlichkeitsrechnerische Erwägung zeigt, daß sich die Größe des Toleranzbereiches nahezu verdoppelt.

Schrifttum

1. MICHELBERGER, P.: Die aus Montage-Ungenauigkeiten stammenden Innenkräfte beim Zusammenbau von Fahrgestell und Wagenkasten (Karosserie) eines Autobusses. Acta Technica Hung. **44**, 313—328 (1963).

Dr. Pál MICHELBERGER, Dr. István KÖRMENDY } Budapest, XI. Egri József u. 18—20. Ungarn.