

ÜBER EINIGE FRAGEN DES LEICHTBAUES VON VERKEHRSMITTELN

Von

G. RUDNAI

Gruppe für strukturelle und technologische Gestaltung des Lehrstuhls für Flugzeugbau
der Technischen Universität, Budapest

Vortrag

gehalten am 28. September 1959 im Moskauer Institut für Luftfahrt-Technologie (MATI)
(gekürzt)

Meine und die Arbeit meiner wenigen Mitarbeiter setzt sich seit 2—3 Jahren die Übertragung der Ergebnisse der Luftfahrttechnik auf die anderen Zweige des Maschinenbaues zum Ziel. Viel konnte in dieser kurzen Zeit noch nicht geschehen. Ich möchte daher heute eher einen Einblick in die Methoden unserer Arbeit geben und bitten, unsere Bemühungen zur Entfaltung dieser Methoden mit Ihrer Kritik zu fördern.

Der Leichtbau

Zunächst müssen wir uns darüber einigen, was wir unter Leichtbau verstehen.

Es ist bekannt, daß für den Fortschritt der menschlichen Gesellschaft die unaufhörliche Steigerung der Produktivität, die fortwährende Verminderung der zur Erzeugung der Gebrauchsgüter aufgewendeten menschlichen Arbeit unerlässlich ist. Dies ist, wie LENIN sagte, besonders für den Sieg unserer neuen Gesellschaftsordnung das erste, hauptsächlichste Erfordernis. Von der Industrie der Gebrauchsgüter aus gesehen, steckt aber der größte Teil des menschlichen Arbeitsaufwandes bei Maschinen- und anderen Fertigfabrikaten in der bereits vorher geleisteten, der sogenannten »toten« Arbeit, deren erheblicher Teil die verschiedenen Formen von Material angenommen hat.

Nun ist das Maß des Materialaufwandes dessen Masse, bzw. das dazu proportionale Gewicht des Materials. Eine der wichtigsten und wirksamsten Methoden zur Steigerung der Produktivität ist demnach das Vermindern des Gewichtes unserer Gebrauchsgüter. Selbstverständlich darf der Aufwand zur Erzielung dieser Gewichtersparnis die Ersparnis selbst nicht aufzehren.

Es gibt aber Produkte, bei denen die Bedeutung der Materialersparnis weit darüber hinausgeht. Dies sind jene Gebrauchsgüter, bei denen die Verminderung der Masse nicht nur die Produktivität ihrer Herstellung steigert, sondern auch ihren Gebrauchswert unmittelbar erhöht.

Hierher gehört zunächst ein bedeutender Teil der Ingenieurbauten, deren Belastung überwiegend von ihrem eigenen Gewicht herrührt. Die Gewichtser-

sparnis wirkt hier nicht nur an sich, unmittelbar, sondern auch noch mittelbar, durch die hierdurch mögliche Bemessung des Bauwerkes für eine verminderte Belastung. *Die Gewichtersparnis wirkt sich also potenziert aus.* Dann gehören hierher die landwirtschaftlichen und einige andere Bodenbearbeitungsmaschinen, die dem Boden durch einen zu großen Druck schaden würden, ferner die bewegten Teile an Kranen, Fahrstühlen und anderen Transportmaschinen, wegen der auftretenden Trägheitskräfte, die dem Gewicht dieser bewegten Teile proportional sind. Schließlich gehören hierher alle diejenigen Maschinen, die betriebsmäßig ihren Platz wechseln, vor allem diejenigen, deren Bestimmung gerade der Platzwechsel ist, nämlich die Verkehrsmittel. Auch bei diesen werden die unmittelbaren Vorteile der Gewichtersparnis potenziert, und zwar durch die Einsparung an Transportarbeit. Die Verminderung an Beschleunigungsenergie und Reibung gestattet nicht nur die Erhöhung der Anfahr- und Bremsbeschleunigung, sondern infolgedessen auch das Erzielen größerer Durchschnittsgeschwindigkeiten, günstigere Fahrpläne, kürzere Umlaufzeiten. Dies alles ermöglicht die Senkung des anteiligen Aufwandes beim Verkehr und Transport, und damit die Steigerung der Produktivität des Transportwesens. Die so erzielbare Ersparnis an laufenden Betriebskosten der Verkehrsmittel kommt auf diese Weise zu der durch die Gewichtersparnis unmittelbar — und durch die längere Lebensdauer von Straße und Bahn mittelbar — erzielbaren Einsparung an einmaligen Anschaffungskosten hinzu.

Es gibt außerdem noch eine besondere Gruppe von Verkehrsmitteln, bei der die Wichtigkeit der Gewichtersparnis auch hierüber noch weit hinausgeht, da sie die unumgängliche Voraussetzung ihrer Funktion ist: die Luftfahrzeuge, deren Betrieb ja die Überwindung der Schwerkraft erfordert. Dies ist ohne die Anwendung von Leichtkonstruktionen nicht möglich. Die Gewichtersparnis ist deshalb bei Luftfahrzeugen im Grunde genommen keine wirtschaftliche Frage mehr, sondern eine technische. Ohne Leichtkonstruktionen gibt es keine Flugtechnik.

Wie weit kann man aber mit der Verminderung der Masse bzw. des Gewichtes von Konstruktionen gehen?

Eine ideale Leichtkonstruktion enthält offenbar nicht das geringste überflüssige Material mehr. Sie enthält also nur noch dort Material, wo dies zur Funktion der Konstruktion nötig ist, und nur soviel, wie zur Erfüllung dieser Funktion gerade ausreicht. Auch die Art des Materials ist nicht gleichgültig: der eine Werkstoff ist zweckentsprechender als der andere. Kurz ausgedrückt ist *eine ideale Leichtkonstruktion eine solche, die sich ihrer Bestimmung, und sei diese noch so vielseitig und abwechslungsreich, vollkommen anpaßt.*

Im Gegensatz zu den leblosen Gegenständen können sich die lebendigen Organismen den Einwirkungen ihrer Umgebung, auch den mechanischen Belastungen, anpassen. Als es vor gut 150 Jahren der Stand der Technik ermöglichte, die Eroberung der Luft auf die Tagesordnung zu setzen, lag es daher sehr

nahe, als Bauelemente der nötig gewordenen Leichtkonstruktionen die weitgehend ihrer Belastung angepaßten Produkte der lebendigen Natur zu verwenden. Die ersten primitiven Leichtkonstruktionen, die man allerdings noch kaum als Maschinen bezeichnen kann, und die der Anfertigung von Luftballons dienten, wurden aus entsprechend ausgewählten organischen Werkstoffen gefertigt.

Als aber nach den ersten erfolgreichen Aufstiegversuchen die nächste Aufgabe die Verwirklichung der planmäßig gesteuerten Bewegung der Luftfahrzeuge war, konnten diese wenig oder garnicht formsteifen Gebilde nicht mehr befriedigen. Für Luftschiffe wie für Flugzeuge waren gleichermaßen mehr oder weniger starre Konstruktionen, nunmehr wirkliche Maschinen nötig, deren Formänderung während des Betriebes — abgesehen von der Bewegung der Steuerungsorgane und anderer Mechanismen — sich in den Grenzen der Gesetze der Elastizitätslehre hielt. So entstanden die *klassischen Leichtkonstruktionen* der Flugtechnik, die die stetigen Formen der Natur mit stufenweise gegliederten und durch Verbindungselemente vereinigten Konstruktionen annähern. Der Grad der Annäherung ändert sich natürlich entsprechend dem jeweiligen Stand der Technik. Die Überwindung der Gravitation steht aber durchaus im Mittelpunkt der Aufgabe und verdrängt etwaige wirtschaftliche Überlegungen.

Der Zusammenhang der Flugtechnik mit den übrigen Zweigen des Maschinenbaues beschränkt sich aber nicht auf die Übernahme der Metalle als Baustoff; die Verbindung war und ist wechselseitig. Die anderen Zweige des Maschinenbaues fingen allmählich an, die für sie nützlichen Ergebnisse des klassischen Leichtbaues zu übernehmen.

Auf dem Gebiet des allgemeinen Maschinenbaues (und wir beschränken uns auf dieses Gebiet der Technik) zeigt sich dies in erster Reihe bei den Verkehrsmitteln. Hier ist es nicht mehr um jeden Preis nötig, Leichtkonstruktionen anzustreben, sondern nur soweit es die mögliche Ersparnis an Transportarbeit als vorteilhaft erscheinen läßt. Die Annäherung des *allgemeinen Leichtbaues* an die ideale Leichtkonstruktion und die Gliederung der Fahrzeuge ist demnach viel größer, als die der Flugzeuge.

Auf den übrigen Gebieten des Maschinenbaues verursacht ein etwaiges Mehrgewicht nicht mehr die Potenzierung des Aufwandes, so daß dort die Bedeutung der einmaligen Aufwendungen vorherrscht. Auf diesen breiten Gebieten des Maschinenbaues genügt statt des Leichtbaues die Anwendung von *Sparkonstruktionen*, deren Gestalt einfach ist, und die wenig Montagearbeit erfordern. Die Steigerung der Produktivität erfordert auch hier Sparsamkeit mit dem Material; dies sind jedoch keine ausgesprochenen Leichtkonstruktionen mehr.

Ich werde demnach nur solche Konstruktionen als Leichtbau bezeichnen, bei denen man *auf die Gewichtersparnis* eine *gesteigerte*, über das zur Erzielung einer Produktivitätssteigerung nötige Maß hinausgehende *Sorgfalt und Mehr-*

arbeit aufwendet, also eine Konstruktion, die sich ihrem Bestimmungszweck besser angepaßt hat, als es im allgemeinen üblich ist.

Nach dem Gesagten ist es selbstverständlich, daß der allgemeine Leichtbau in erster Linie aus den reichen Erfahrungen des klassischen Leichtbaues (im Flugwesen) schöpfen wird, daß aber bei der Übernahme seiner Ergebnisse und Methoden Erwägungen wirtschaftlicher Art eine sehr große Rolle spielen und die Anwendung so mancher Verfahren des Flugzeugbaues verhindern werden. Es zeigen sich so die Umrisse eines neuen selbständigen Wissenszweiges, der *Lehre vom Leichtbau*.

Untersuchen wir nun die Wege, die zu einer bewußten Anpassung einer Konstruktion an ihre Betriebsbedingungen führen. Zur Vereinfachung des Problems wollen wir uns jetzt lediglich mit der Frage der *Bestimmung der Abmessungen* beschäftigen, und alles andere, die Form der Maschine und ihrer Teile, sowie ihren Mechanismus als *gegeben*, bzw. als im Laufe der Entwurfsplanung bereits festgelegt betrachten, obwohl alle diese verschiedenen Schritte der Ausbildung einer Konstruktion besonders vom Standpunkt des Leichtbaues in engster dialektischer Gegenwirkung miteinander stehen. Die Grundsätze der Formgebung und der Werkstoffwahl des Leichtbaues habe ich versucht, in meinem Aufsatz¹ über die »Theorie des Leichtbaues« systematisch zu behandeln.

Die zu erwartenden Belastungen

Die Bestimmung der Abmessungen einer Maschine erfordert zwei grundsätzlich verschiedene Schritte: erstens die *Bestimmung des Kräftespiels*, zweitens die *Festlegung der sich hieraus ergebenden Maße*. Das Kräftespiel im Organismus der Maschine wird durch die äußeren Belastungen hervorgerufen. In erster Linie muß man also diese kennen. Dies klingt selbstverständlich, ist es aber nicht. Die Entwicklung der Technik hat gezeigt, daß man am Anfang die Abmessungen der Maschinen und Bauwerke ohne nähere Kenntnis der Belastungen rein gefühlsmäßig bestimmte und dieses »Gefühl« auf Grund der Erfahrungen den jeweiligen Betriebsverhältnissen anpaßte. Zu einer solchen Anpassung haben im Flugzeugbau erst vor kurzem die Unfälle der englischen Comet-Flugzeuge geführt. Die Anpassung erfolgt aber nur dann zwangsläufig, wenn sich die Konstruktion als zu schwach erweist, d. h. verstärkt werden muß. Zur Erleichterung einer bewährten, aber zu schweren Konstruktion besteht kein zwingender Anlaß, und dann interessiert man sich auch kaum für die auftretenden Belastungen. So sind auch die Belastungen nicht zuverlässig bekannt, denen Autobusse im Betrieb unterworfen sind. Im allgemeinen rechnet man mit dem 2...3-fachen der statischen Belastung als Höchstlast. Zwei-

¹ Periodica Polytechnica (Eng.) 2 (1958) Nr. 4.

fellos schleppen die Autobusse viel unnützes Gewicht mit sich herum; andererseits kommen aber manchmal auch Brüche des Wagenkastens vor. Etwas besser steht es mit Schiffen und Eisenbahnwagen, obwohl meines Erachtens auch hier noch beachtliche Gewichtsparsnisse erzielt werden könnten, wenn die Betriebslasten genauer bekannt wären.

Unsere Autobusfabrik *Ikarus* hat in dieser Lage bereits einige orientierende Versuche unternommen, um die auftretenden Höchstkräfte zu bestimmen. Die Anzeige zweckentsprechend angebrachter Beschleunigungs-Geber wurde oszillografisch aufgenommen. Die Versuche wurden mit verschiedenen, auf einer glatten Betonbahn angebrachten Hindernissen bei verschiedenen Geschwindigkeiten vorgenommen. Es ergab sich, daß die Höchstlasten im Wagenkasten bei mäßiger Geschwindigkeit am größten sind, bei großen Geschwindigkeiten hingegen abnehmen. Die Höchstlast erreichte etwa das 2,5-fache der statischen Belastung. Der Hauptmangel dieser Versuche war die Vereinfachung der Betriebsverhältnisse und ihre kurze Dauer, die durch den großen Umfang der verwendeten Apparatur und durch die beschränkte Laufzeit der Oszillografen-Streifen bedingt war. Eine statistische Auswertung der wirklichen Betriebserfahrungen war auf diese Weise nicht möglich.

Bereits vorher hatte ich mit meinen Mitarbeitern mit Unterstützung der Ungarischen Akademie der Wissenschaften die Entwicklung eines Gerätes in Angriff genommen, das klein genug werden soll, um in Fahrzeugen im fahrplanmäßigen Dienst angebracht werden zu können, das keine Aufsicht benötigt, und beliebig lange Laufzeit hat, da es ohne die Aufnahme eines Oszillogrammes die statistische Häufigkeitskurve — das Histogramm — der Meßwerte unmittelbar aufnimmt.

Das statistische Meßgerät — das Histometer — besteht aus Gebern, deren elektrische Signale durch einen Verstärker in einen Diskriminator gelangen, der sie nach ihrer Größe in 10 verschiedene Kanäle sortiert. Jeder Kanal endet in Zählröhren, deren Impulse von einem gewöhnlichen Telefon-Zählwerk gezählt werden.

Als Geber dienen für unsere Zwecke Dehnungs-Meßstreifen in der bekannten Brückenschaltung, mit denen wir die Dehnung geeigneter ausgewählter Teile des Wagenkastens, z. B. von Fachwerkstäben messen wollen. Natürlich können für andere Zwecke auch andere Geber angeschlossen werden; so kann man mit Hilfe optischer oder mechanischer Abtastung auch Oszillogramme auswerten. Der Verstärker muß zeitunabhängig und verzerrungsfrei arbeiten, deshalb ist er für eine 10^7 -fache Verstärkung ausgelegt, von der aber nur 1...2 Größenordnungen weniger ausgenutzt werden. Der Diskriminator kann der zu messenden Bandbreite der Amplituden angepaßt werden. Besondere Schwierigkeiten macht die Abgrenzung der Kanäle, die sehr scharf sein muß, da weder durch Zwischenräume, noch durch Überdeckung Signale verfloßen gehen dürfen. Die ganze Anlage wird vom Akkumulator des Fahrzeuges über einen Flug-

zeugumformer gespeist. Wir hoffen, das Gerät am Anfang des nächsten Jahres in einem Fahrzeug des fahrplanmäßigen Autobusverkehrs erproben zu können. Das Meßgerät wird nicht nur für die Bemessung von Wagenkästen von Wichtigkeit sein, sondern auch die objektive Klassifizierung der Straßendecken ermöglichen und Daten für die Fortentwicklung der Federungen liefern.

Auf diese Weise wollen wir nicht nur die auf unsere Konstruktion wirkenden größten Kräfte, sondern auch deren Spektrum in Abhängigkeit von den Hauptparametern der Konstruktion und ihrer Betriebsverhältnisse ermitteln. Damit wäre die Grundlage für die Bestimmung der äußeren Kräfte geschaffen.

Die Vereinfachung des Aufbaus

Das Spiel der inneren Kräfte hängt aber nicht nur hiervon, sondern auch von der Gestaltung unserer Maschine ab. Die Struktur einer modernen Maschine ist jedoch so kompliziert, daß man das Kräftespiel nur in den seltensten Fällen verfolgen kann. Man ist gezwungen, den tatsächlichen Aufbau durch ein vereinfachtes System zu ersetzen, das der rechnerischen Erfassung zugänglich ist, und von dem man sich durch sorgfältige Überlegung überzeugt hat, daß sein Kräftespiel nur in erlaubtem Maße von dem der wirklichen Konstruktion abweicht.

Sofort stellt sich die Frage, wie groß das erlaubte Maß ist? Bei einem Flugzeug, bei dem die Gewichtersparnis funktionsbedingt ist und schon ein kleiner Schaden zu einer Katastrophe führen kann, ist dieses Maß offenbar sehr klein. Man wird daher bestrebt sein, möglichst genau zu rechnen, und dafür auch einen sehr großen Arbeitsaufwand in Kauf nehmen. Dieser große Aufwand hat heute zu einem nicht geringen Teil die Gestalt »toter« Arbeit, die in großen elektronischen Rechenmaschinen vergegenständlicht ist. Anders steht es mit den Land- oder Wasserfahrzeugen, z. B. den Autobussen, bei denen der Zweck der Gewichtseinsparung die Erhöhung ihrer Wirtschaftlichkeit im Betrieb ist, und kleine Schäden sich nicht katastrophal auswirken. Hier wird es in erster Linie von der Handlichkeit des Rechenverfahrens abhängen, ob man es anwendet und so die durch genauere Dimensionierung erreichbaren Ersparnisse voll ausnützt oder nicht.

Zunächst sieht man also von solchen Unregelmäßigkeiten — oder allgemeiner Eigenarten — des Aufbaues ab, die das Kräftespiel nur örtlich beeinflussen oder stören, wie Ausschnitte, Türen und dergl., und versucht das Kräftespiel des ungestörten Systems zu bestimmen. Es ist bekannt, daß man hierzu schon von Anfang an einige, in Wirklichkeit nicht ganz erfüllte Voraussetzungen machen muß, z. B. die, daß die Stäbe von Fachwerken gelenkig aneinander angeschlossen sind, oder daß die Querschnitte bei allen Verformungen eben bleiben, usw. Auf diesen oder ähnlichen Voraussetzungen beruhen unsere sämt-

lichen Verfahren zur Berechnung der inneren Kräfte, und die Praxis hat ihre Zulässigkeit und auch die Grenzen ihrer Anwendbarkeit gezeigt. Aber auch so kommen wir in vielen Fällen noch immer nicht zu genügend einfachen Rechenverfahren, wie wir gleich sehen werden.

Wenn man einen möglichst leichten Wagenkasten konstruieren will, so denkt man auf Grund der Erfahrungen des Flugzeugbaues zunächst an eine Schalenkonstruktion. Die Wagenkästen von Autobussen und Waggons unterscheiden sich aber von den Flugzeuigrümpfen in einem Punkte wesentlich. Bei den Flugzeugen passen sich Form und Größe der Fenster der Forderung kleinsten Gewichtes an, bei Landfahrzeugen dagegen wird Gewicht bewußt geopfert, um die Bequemlichkeit der Passagiere durch möglichst freie Aussicht bietende, große Fenster zu erhöhen. Der Wagenkasten wird durch die ringsherumlaufende Fensterreihe mehr oder weniger in zwei Teile geschnitten. Untersuchen wir den Einfluß der Fenster.

Die Seitenwand der Autobus-Karosserie

Da der Querschnitt der Wagenkästen viereckig ist — und nicht rund, wie der der Flugzeuge — genügt die Untersuchung einer Seitenwand. Als Modell dieser Seitenwand, die für die Ermittlung des Kräftespiels geeignet ist, können wir einen Vierendeel-Träger mit starkem Ober- und Untergurt und mit im Verhältnis zu diesen schwachen Pfosten nehmen. Besonders bei Autobussen sind diese nach der heutigen Mode sehr schwach. Der Rahmenträger ist statisch unbestimmt, der Grad seiner Unbestimmtheit ist dreimal so groß wie die Anzahl n der Fenster. Der Stammträger entsteht beispielsweise, indem man die Fensterpfosten bis auf einen durchtrennt (Bild 1). Offensichtlich verursachen alle 3 an einer Trennstelle auftretenden Kräfte X an allen anderen Trennstellen Formänderungen, also werden die $3n$ unbekanntes Kräfte in allen $3n$ Gleichungen, die wir für die Trennstellen ansetzen können, auftreten. Zur Bestimmung der unbekanntes Kräfte erhalten wir somit ein Gleichungssystem aus $3n$ Gleichungen mit ebensoviel Unbekanntes, — bei z. B. 7 Fenstern also 21 simultane Gleichungen, wobei in jeder Gleichung alle 21 Unbekannte vorkommen, — deren Lösung viel Arbeit kostet und viele Fehlermöglichkeiten in sich birgt.

Eine Vereinfachung erhalten wir bereits, wenn wir den Stammträger nicht durch Trennen der Pfosten, sondern eines Gurtes erzeugen (Bild 2). Die unbekanntes Kräfte erzeugen jetzt nur noch im betroffenen und den benachbarten, also in 3 Feldern Formänderungen, und da 3 unbekanntes Kraftkomponenten an jeder Trennstelle auftreten, enthält jede der 21 Gleichungen im allgemeinen nur noch 9 Unbekannte. In der Praxis konnte sich auch dieses Verfahren noch nicht durchsetzen. Es wurde z. B. von BIECK² so vereinfacht, daß

² Glasers Ann., I. und 15. Dez. 1927.

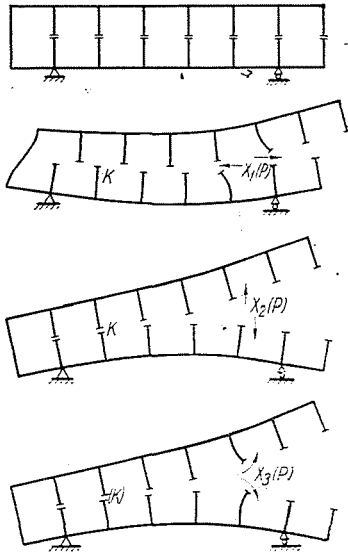


Bild 1

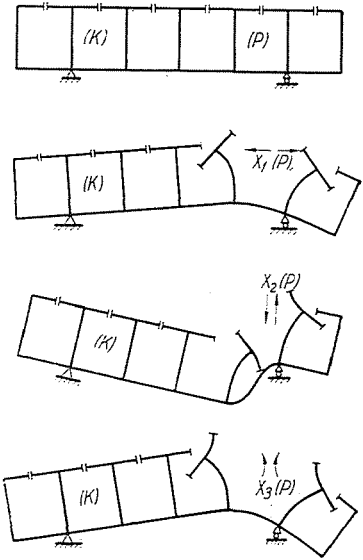


Bild 2

er die Momente und die Querkräfte an den Trennstellen vernachlässigte, und so ein System von nur n Gleichungen mit nur je 3 Unbekannten übrigbehielt. Dies entspricht der Wirklichkeit jedoch nur dann, wenn der durchgetrennte Gurt tatsächlich sehr biegungsweich ist.

Wir kommen der Wirklichkeit viel näher durch Anwendung des Prinzips, das der ungarische Gelehrte Antal KHERNDL im Jahre 1882 für die Berechnung geschlossener einfacher Rahmen ausarbeitete, des sogenannten σ -Punkt-Verfahrens.

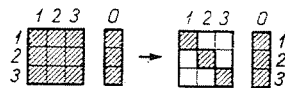


Bild 3

Nach diesem Verfahren kann man das bei einem einfachen Rahmen auftretende System von 3 Gleichungen mit 3 Unbekannten auflösen in 3 Gleichungen, die voneinander unabhängig sind und nur je eine der 3 Unbekannten enthalten (Bild 3), so daß man die Unbekannten einfach ausrechnen kann. KHERNDL erreichte dies bekanntlich dadurch, daß er die Unbekannten in dem Punkt, eben dem σ -Punkt, angreifen ließ, den er mit der angenommenen Trennstelle durch unendlich steife Stäbe verband, und für den die in den ursprünglichen Gleichungen auftretenden Koeffizienten mit gemischten Gliedern δ_{12} ,

δ_{23}, δ_{31} verschwinden. Vernachlässigt man die Normal- und Querkräfte und betrachtet nur die Momente, so lautet die Bedingungsleichung hierfür

$$\delta_{ik} = \int \frac{M_i M_k}{EJ} ds = 0 \text{ für } i \neq k.$$

Bezeichnet man $\frac{ds}{EJ} = du$ als das »laufende Gewicht« des Rahmens, so liegt der σ -Punkt in dessen »Schwerpunkt«, wie man leicht beweisen kann; die Koordinaten muß man dabei in konjugierten Richtungen (Hauptachsen) annehmen. Bei symmetrischen Rahmen werden alle diese Bedingungen erfüllt, wenn man die Symmetrielinien als Achsen, also ihren Schnittpunkt als σ -Punkt

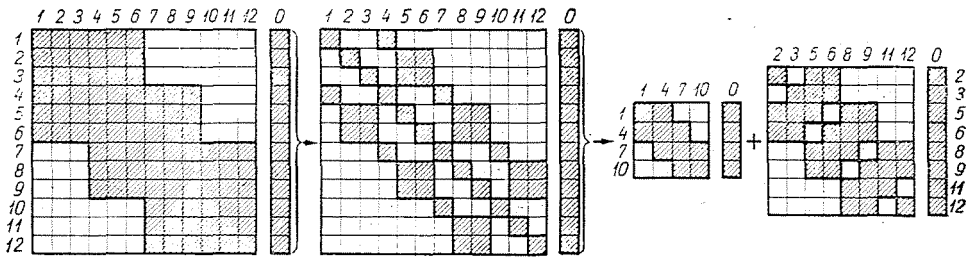


Bild 4

nimmt. Eine einfache Überlegung ergibt sogar, daß bei solchen symmetrischen Rahmen die Bedingungsleichung $\delta_{ik} = 0$ auch für die den Achsen parallelen Seiten getrennt, also sowohl für die Seiten in x -Richtung, als auch für die in y -Richtung gilt.

Wenden wir nun das σ -Punkt-Verfahren auf unsere Seitenwand an, und bestimmen wir für jeden Fensterrahmen den σ -Punkt. Nehmen wir zunächst an, die Seitenwand sei zur (horizontalen) x -Achse symmetrisch, so sind nach dem eben Gesagten die gemischten Integrale für die Fensterstäbe auch für sich bereits $= 0$. Damit zerfällt unser System von $3n$ Gleichungen in zwei Systeme. In dem einen kommen nur die n Unbekannten vor die in Richtung x wirken, im anderen von $2n$ Gleichungen nur die Kräfte in y -Richtung und die unbekanntenen Momente. Die erhaltene Vereinfachung zeigt Bild 4. Hier sind die Zeilen sowie die Spalten mit den einzelnen fortlaufenden Indizes bezeichnet; das Feld, wo sie sich kreuzen, entspricht dem mit diesen Indizes bezeichneten Koeffizienten δ ; ist es schraffiert, so existiert der Koeffizient, ist es leer, so ist er $= 0$. Im ersten System kommen in jeder Gleichung höchstens 3, im zweiten System höchstens 5 Unbekannte vor. Wenn man die Koeffizienten ausrechnet, ergibt sich, daß sich mehrere von ihnen paarweise nur durch einen Proportio-

nalitätsfaktor unterscheiden. Infolgedessen kann man weitere Unbekannte ausfallen lassen und erhält eine einfachere Form des zweiten Systems mit höchstens 4 Unbekannten pro Gleichung (Bild 5). Die Lösung dieses Gleichungssystems ist erheblich einfacher als die des ursprünglichen Systems. An einem Beispiel aus der Praxis zeigte sich eine Arbeitersparnis von etwa 90%.

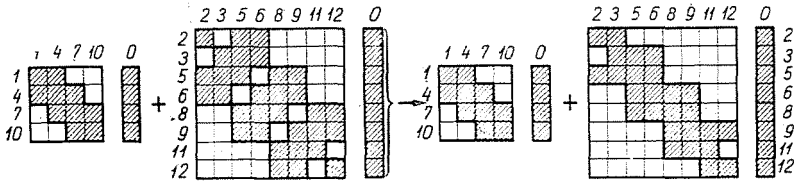


Bild 5

In Wirklichkeit sind jedoch die Seitenwände von Wagenkästen zur x -Achse nicht symmetrisch, der σ -Punkt liegt also nicht auf der Mittellinie der beiden Gurte. Seine Lage ergibt sich aus

$$y_s = \frac{\oint y \frac{ds}{EJ}}{\oint \frac{ds}{EJ}}$$

Diese Formel zeigt, daß die Abweichung der Lage des σ -Punktes von der Mitte in erster Linie von den Abschnitten des Rahmens abhängt, für die EJ klein ist, also von den weichen Abschnitten. Bei Wagenkästen also, bei denen die Fensterstäbe verhältnismäßig sehr weich sind, also z. B. bei Autobussen, kann man daher die Abweichung des σ -Punktes von der Mitte vernachlässigen, und die entwickelte Methode als gutes Näherungsverfahren anwenden. Auch bei Eisenbahn-Personenwagen üblicher Abmessungen beträgt die Verschiebung des σ -Punktes aus der Mitte höchstens 10–20 mm, die Näherung ist also noch gut.

Die Berücksichtigung der Querkräfte beeinflusst den Rechnungsgang nicht; die Koeffizienten auf der Hauptdiagonalen bekommen nur ein größeres Gewicht gegenüber den übrigen. Wenn man auch die Normalkräfte berücksichtigt, ist die zweite Vereinfachung nicht möglich, es kommen also bis zu 5 Unbekannte je Gleichung vor; bei unsymmetrischen Gebilden wird aber so die Abweichung des Näherungswertes vom genauen Wert kleiner.

Beachtenswert ist die Vergrößerung der Beanspruchung der Fensterstäbe, die sich bei Berücksichtigung der Querkräfte herausstellt, und die in Extremfällen bis zu 30% betragen kann. Bei der Dimensionierung der Fensterstäbe dürfen also die Querkräfte nicht vernachlässigt werden.

Im übrigen ist aber der Querschnitt der Fensterstäbe von Autobussen modernen Aufbaus so klein, daß diese die Mitwirkung des Daches des Wagen-

kastens am Tragen der Belastung nicht bewerkstelligen können. Von dieser Erkenntnis hat man z. B. bei den neuen Moskauer Trolleybussen schon 1957 Gebrauch gemacht und auch auf den Schein der Einbeziehung des Daches in das Tragsystem verzichtet. Zur Berechnung des Wagenkastens von Autobussen kann man also nicht von der vulgären Vorstellung ausgehen, der Wagenkasten sei eine Schalenkonstruktion wie etwa ein Flugzeugrumpf. Man muß vielmehr ein der Wirklichkeit näher liegendes Modell des Wagenkastens suchen.

Die Karosserie als Tragrost

In der Praxis kann man zwei grundsätzliche Systeme des Aufbaues unterscheiden. Das eine System besteht aus Chassis und Karosserie, die getrennt voneinander hergestellt und später zu einem Wagenkasten zusammengebaut werden. Bei dem zweiten System bildet das Chassis einen Teil der Karosserie selbst. Diese Bauart nennt man Bodenrahmen- oder Plattformbauart. Beim ersten System trägt das Chassis im Prinzip sämtliche Lasten, und die Karosserie dient nur der Raumabgrenzung und Unterbringung der Passagiere und ihres Gepäcks. Beim zweiten System bildet der Bodenrahmen oder die Plattform nicht nur die untere Wand, sondern gleichzeitig auch das tragende System des Wagenkastens. Diese Bauart wird oft selbsttragende Karosserie genannt; die Benennung ist aber falsch, da wir gesehen haben, daß der obere Teil der Karosserie durch die Reihe der Fenster praktisch abgetrennt ist und am Tragen der Belastung nicht teilnimmt. Die Plattformbauart ist die modernere; aber auch die Chassis-Bauart ist noch keineswegs veraltet.

Bei der Chassis-Bauart hat man — wie erwähnt — als tragende Konstruktion nur das Chassis selbst angesehen und dieses auch nur auf Biegung als symmetrischen Rahmen auf zwei Stützenpaaren berechnet. Erst im Jahre 1954 haben OSCHNOKOW³ und BOTSCHAROW⁴ und unabhängig von ihnen 1956 ERZ⁵ die Berechnung des Chassisrahmens auf Torsionsbeanspruchung ausgearbeitet, aber auch sie berücksichtigten die Mitwirkung des Wagenkastens beim Tragen der Belastung nicht. Die Berücksichtigung der Zusammenarbeit des selbständigen Chassis mit dem unabhängigen, meist aus anderem Werkstoff gebauten Wagenkasten ist aber unerlässlich. Sie führt grundsätzlich zu demselben bisher nicht behandelten Problem, wie die Berechnung der Bodenrahmen- oder Plattformbauart, wie wir gleich sehen werden.

Den grundsätzlichen Aufbau der Plattformbauart kann man sich folgendermaßen vorstellen: Die Unterteile der Seitenwände — bis zur Unterkante des

³ OSCHNOKOW, W. A.: Theoretische und experimentelle Untersuchung der Festigkeitsfragen von Rahmen. Dissertation (russisch), Moskau 1954.

⁴ BOTSCHAROW, N. F.: Festigkeitsberechnung der Rahmen von Lastkraftwagen. Dissertation (russisch), Moskau 1954.

⁵ ERZ, K.: ATZ 59 (1957) pp. 89—96, 163—170, 345—347 und 371—375.

Fenstergürtels — bilden äußere Längsträger; zwischen ihnen sind noch meistens zwei, selten auch noch mehr, innere Längsträger angeordnet. Diese insgesamt vier (oder manchmal mehr) Längsträger werden durch mehrere Querträger torsionssteif miteinander verbunden. Die so entstandene Konstruktion ist also keinesfalls eine Schale, sondern ein Tragrost mit rechteckigen Feldern.

Setzen wir zunächst als einfachste Form eines solchen Tragrostes einen regelmäßigen Aufbau voraus, d. h. gleiche Abstände der Querträger und einen in ihrer ganzen Länge gleichbleibenden Querschnitt der Längsträger. Die Konstruktion habe vier Längsträger — zwei äußere und zwei innere — und sei selbstverständlich symmetrisch zur Mittelachse des Wagenkastens.

Bekanntlich ist so ein Tragrost mehrfach statisch unbestimmt. Zur Ermittlung des Kräftespiels müssen wir zunächst durch Trennen der überzähligen Stäbe einen geeigneten Stammträger aus ihm herauslösen. Je geschickter wir hierbei vorgehen, umso mehr können wir unsere Rechenarbeit vereinfachen.

Verlegen wir die Trennstellen der überzähligen Stäbe — ähnlich wie zuvor — in die Längsträger, dann erhalten wir ein Gleichungssystem, bei dem in jeder Gleichung höchstens 5 Unbekannte vorkommen. Aber auch die genaue Lösung dieses Gleichungssystems ist noch viel zu umständlich. Untersuchen wir daher, welche Näherungen möglich sind ohne an Genauigkeit unerlaubt viel einzubüßen.

Die Kraftverteilung wird bekanntlich durch die Steifigkeit der Trägerelemente bestimmt. Maßgebend ist hierbei das Verhältnis der Steifigkeitszahlen $1/EJ = 1/\rho$ der einzelnen Bauglieder. Für den Fall, daß die Querträger ebenso *steif* oder *steifer* sind wie die Längsträger, können wir die Querträger mit guter Näherung als *unendlich steif* betrachten. Diese Näherung ist natürlich nicht anwendbar, wenn das Trägheitsmoment der Längsträger größer ist als das der Querträger. Bei ausgeführten Bodenrahmen und auch bei Chassis, die mit den Querträgern unmittelbar zusammengebaut sind, kommt dies aber nur sehr selten vor.

Betrachten wir diese vereinfachte Konstruktion zunächst *auf Biegung*. Das erste Problem ist das der Krafteinleitung. Wir können auch hier zwei Fälle unterscheiden:

a) Die äußeren Kräfte wirken auf die Querträger, und verteilen sich mittels der Querträger auf die Längsträger im Verhältnis ihrer Steifigkeit. Dieses Schema ist für die meisten Belastungen geeignet.

b) Die äußeren Kräfte wirken nur auf die Längsträger. Dies führt zu einem Krafteinleitungsproblem mit rasch abklingenden Momenten. Das Abklingen dieser Biegemomente ist unabhängig vom Trägheitsmomentenverhältnis der Träger. Die Träger können daher als steif gestützt betrachtet werden.

Das Ergebnis der ausführlichen Untersuchung dieser Vereinfachungen können wir folgendermaßen zusammenfassen:

1) Das Abklingen der eingeleiteten Kräfte geht sehr rasch vor sich. Deshalb genügt es, die Berechnung nur auf eine kurze Strecke durchzuführen, etwa auf einen Abschnitt bis zum zweiten oder dritten Querträger.

2) Bei langen Wagenkästen und gleichem Abstand der Querträger ergibt sich eine Differenzgleichung, aus der dann eine geschlossene Berechnungsformel abgeleitet werden kann.

3) Bei Wagen mit getrennten Chassis läßt sich dieses Verfahren gleichfalls anwenden, wenn die Querträger mit dem Chassis zusammengebaut sind und mit ihm einen Tragrost bilden.

Gehen wir nun auf die Berechnung der *Verdrehung* über. Die eben angewandte Voraussetzung biegungssteifer Querträger ergibt hierbei keine wesentliche Vereinfachung. Wir kommen besser zum Ziele, wenn wir das OSCHNOKOW—BOTSCHAROW—ERZ-sche Verfahren fortentwickeln und voraussetzen, daß sämtliche Glieder des Tragrostes biegungssteif sind. Das Gleichungssystem, das wir so für die Verdrehung der Rahmenelemente erhalten, enthält aber nur $\frac{2}{3}$ der ursprünglichen Zahl der Gleichungen (mit je 5 Unbekannten pro Gleichung); es können hieraus also auch nur $\frac{2}{3}$ der vorhandenen Unbekannten bestimmt werden, nämlich $\frac{1}{3}$ der ursprünglichen Unbekannten, und die Summen von je zweien der restlichen $\frac{2}{3}$. Aus diesem Gleichungssystem kann weiter eine geschlossene Gleichung abgeleitet werden, die die Torsionsmomente in den Bodenelementen zu bestimmen gestattet. Die weiteren Unbekannten erhält man aus einem neuen Gleichungssystem, bei dem man wieder — wie vorhin — nur noch die Querträger als biegungssteif betrachtet, die Längsträger aber nicht. Dieses System enthält nur halbsoviel Gleichungen wie das vorige und ergibt demnach ein zweites Drittel der Unbekannten, nämlich die aus der Verdrehung der Querträger entstehenden zusätzlichen Biegemomente in den Seitenwandträgern, je ein Glied der eben erwähnten Summen; durch Subtraktion können wir also auch die restlichen Unbekannten trennen.

Im allgemeinen erfordert also die vereinfachte Bestimmung des Kräftespiels eines symmetrischen Wagenkastens mit n Querträgern die Lösung

1) einer geschlossenen Gleichung;

2) je eines Systems von $n-2$ Gleichungen mit je drei Unbekannten (eines für Biegung und eines für Verdrehung).

Die in Wirklichkeit vorkommenden Wagenkästen sind natürlich nicht so schematisch aufgebaut. Vor allem ergibt die Einleitung der Belastungen sowie die Anbringung der nötigen Ausschnitte — wie Türen usw. — Abweichungen, die auch das einfache Kräftespiel verändern. Die vorkommenden Abweichungen können wir am besten durch Überlagern eines zweiten Tragsystems auf den regelmäßig aufgebauten Wagenkasten erfassen (Bild 6).

Sehen wir uns zuerst das Problem des Türausschnittes an. In diesem Falle ist eine negative Kräfteeinleitung nach Bild 6 auf den regelmäßigen Wagenkasten zu überlagern. Die Kräfteeinleitung klingt sehr rasch ab; es ergibt sich

somit, daß sich die Beeinflussung des Wagenkastens durch den Türausschnitt nur auf die unmittelbare Umgebung der Tür erstreckt. Der Türrahmen ist im Verhältnis zum Wagenkasten sehr wenig steif, kann also praktisch als vollkommen weich betrachtet werden. Bei Annahme steifer Querträger zerfällt das so erhaltene Gleichungssystem in zwei Systeme mit je höchstens drei Unbekannten, die also verhältnismäßig einfach zu lösen sind.

Als zweites Problem erwähnen wir die Montagespannungen zwischen Chassis und Karosserie bei Wagenkästen getrennter Bauart. Wir finden das interessante Ergebnis, daß die Spannungen bei fehlerhafter Montage schon bei

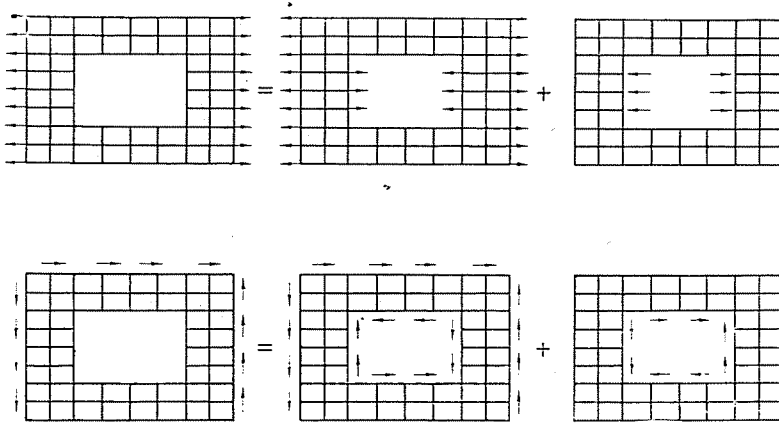


Bild 6

kleinen Abweichungen der Paßflächen von Wagenkasten und Rahmen dieselbe Größenordnung erreichen können, wie die Kräfte aus den Betriebslasten. In solchen ungünstigen Fällen können sich also die Spannungen im Wagengerippe verdoppeln.

Zusammenfassung der Rechenergebnisse

Das Ergebnis unserer Untersuchungen können wir im folgenden zusammenfassen:

1) Für die Berechnung des Kräftespiels von Wagenkästen können wir sehr viele Bauelemente praktisch als völlig steif betrachten. Im allgemeinen gilt dies für alle Querträger, für die Längsträger über den Fenstern, bei Torsionsbelastung für alle Träger gegenüber Biegung, für die Seitenwände der Kästen bei der Chassisbauart usw. Die Änderung der Steifigkeit dieser Glieder innerhalb der praktisch vorkommenden Grenzen beeinflusst das Kräftespiel des Wagenkastens nicht.

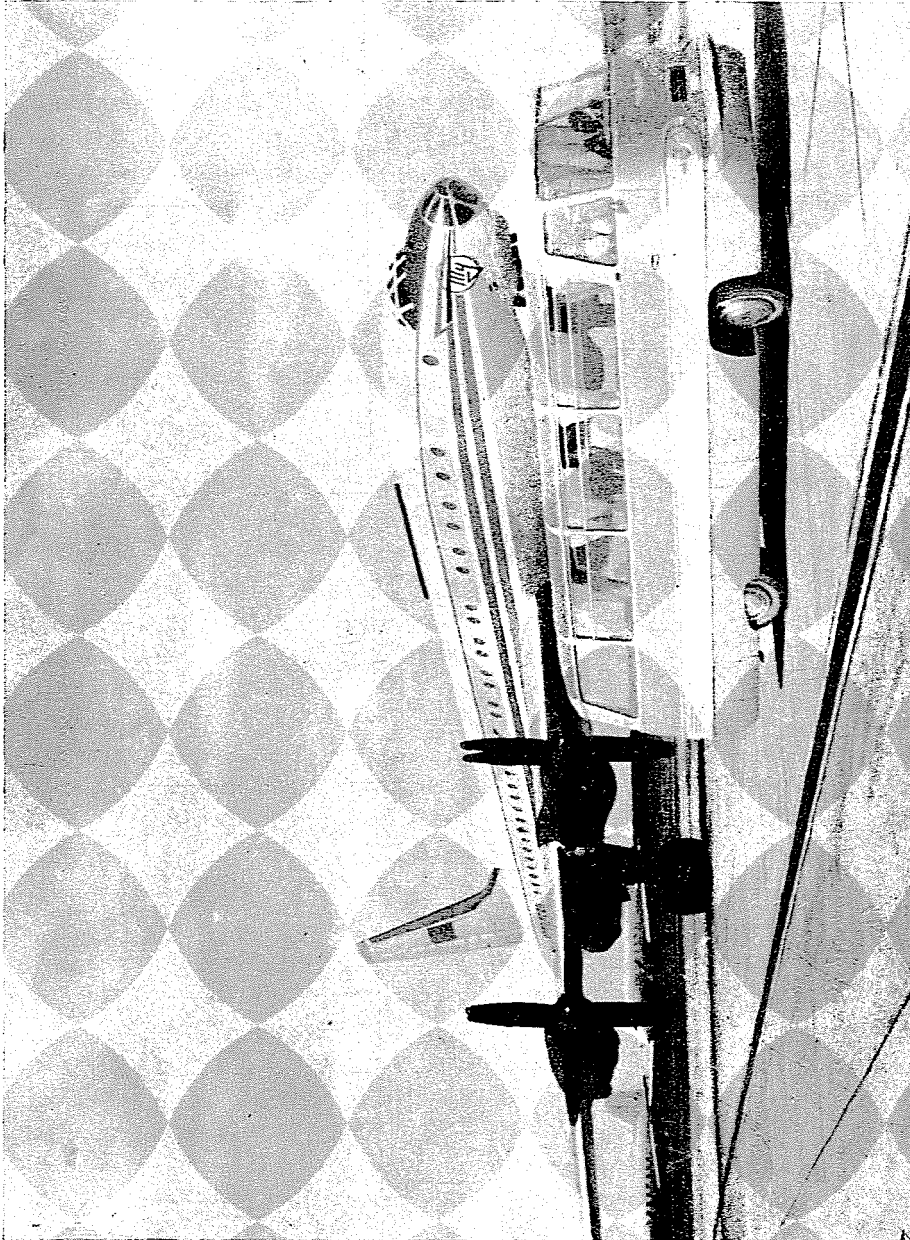


Bild 7

2) Bei Wagenkästen von weniger als 8 m Länge und heute üblicher Bauart sind die Querschnitte der tragenden Bauteile aus technologischen Gründen wohl immer genügend groß, um den auftretenden Belastungen zu genügen. Eine Berechnung solcher Wagenkästen ist also nicht nötig und eine Gewichtsersparnis ist bei ihnen kaum zu erzielen. Dies ist wohl auch die Ursache dafür, daß die meisten Karosseriefabriken Berechnungen der Karosserie überhaupt nicht vornehmen. Dies gilt aber nur für kurze Karosserien. Bei Wagen von mehr als 8 Meter Länge (und solche Wagen gibt es in ständig zunehmender Zahl) darf jedoch die Berechnung nicht mehr vernachlässigt werden und kann erhebliche Gewichtsersparnisse bringen.

Die Berechnung der Fensterposten auf Querbelastung darf man auch bei kurzen Wagen auf keinen Fall vernachlässigen.

3) Die mit Wagenkästen der Fabrik »Ikarus« vorgenommenen Versuche zeigten, daß die der beschriebenen Rechnungsmethode zu Grunde liegenden Annahmen, und zwar:

der Wagenkasten ist ein Trägrost und keine Schale;

das Dachteil des Wagenkastens ist ohne Einfluß auf das Kräftespiel, trägt also nicht mit;

die Querträger der Bodenrahmen können als vollkommen steif betrachtet werden;

der Einfluß des Türeausschnittes zeigt sich nur in seiner unmittelbaren Nachbarschaft

völlig berechtigt sind. Die mit Dehnungsmeßstreifen gemessene Spannungsverteilung im Wagenkasten stimmt mit der berechneten recht gut überein. Wie erfolgreich diese Methode beim Bau von Autobussen angewendet werden kann, zeigt das Bild 7 des neuesten Typs 303 von »Ikarus«, dessen Gewicht bei einer Länge von 8,6 m mit 37 Sitzplätzen noch keine 6000 kg beträgt.

Das Rechenverfahren und seine Ergebnisse sind in der Dissertation meines Aspiranten und Mitarbeiters Paul MICHELBERGER ausführlich beschrieben, der obige Ergebnisse entnommen sind.

Unsere Arbeiten auf dem Gebiete des Leichtbaues sind erst jung. Vieles ist erst ein Plan für die Zukunft. Besonders die Fragen der Lebensdauer von Konstruktionen, die hier nicht erwähnt sind, bedürfen noch vieler Untersuchungen und bieten ein reiches Feld nützlicher Tätigkeit. Ich hoffe, daß meine Ausführungen trotzdem nicht ganz ohne Interesse waren, und ihre kritischen Bemerkungen recht viel dazu beitragen werden, daß wir in Fortentwicklung unserer Arbeit den rechten Weg finden, zum Nutzen und zum Gedeihen unserer Verkehrsmittel-Industrie.

Prof. Dr. techn. G. RUDNAI, Budapest IX. Kinizsi u. 1—7. Ungarn.