Windkanalsmessungen am Modell eines Luftkissenfahrzeuges

Autor(en): **Baumann, H. / Murao, R.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **81 (1963)**

Heft 11

PDF erstellt am: **28.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-66739

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

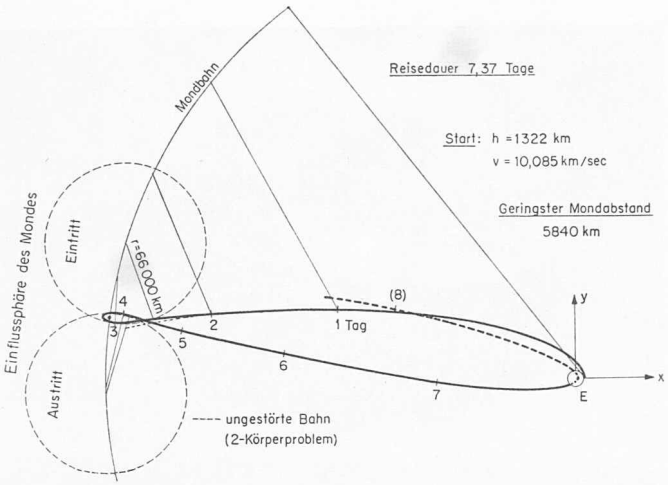


Bild 3 Flugbahn eines Satelliten, der den Mond umfliegt (geringster Abstand von der Mondoberfläche 5480 km) und nach 7,37 Tagen wieder auf die Erdoberfläche auftrifft

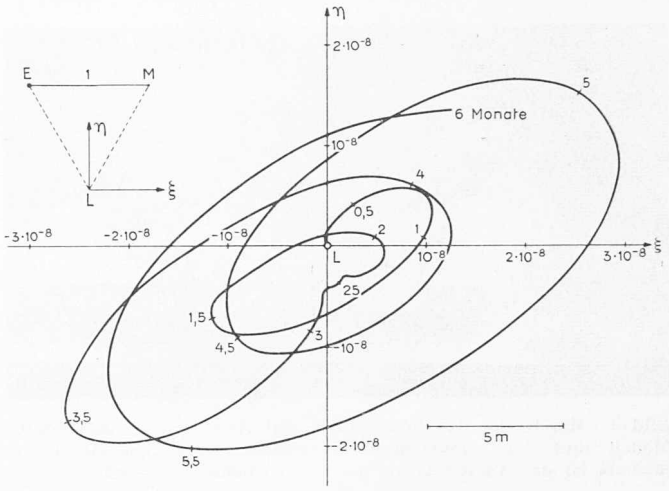


Bild 4 Schwingung um einen stabilen Librationspunkt im rotierenden System Erde—Mond

tinuierliche Anpassung der Schrittweite an die Genauigkeit und sind so wirkungsvoll, dass auch beim Auftreffen des Satelliten auf den Mondmittelpunkt die Differentialgleichungen über den Stoss hinaus integriert werden können. Ein entsprechendes Programm für die ERMETH wurde nach Abklärung der theoretischen Fragen von Waldvogel am Institut für angewandte Mathematik der ETH aufgestellt, wobei die Rechnung ausgezeichnete Resultate lieferte und auch Flugbahnen integriert werden konnten, bei welcher die Methode von Cowell versagte. Ein Bericht über diese Untersuchungen soll demnächst erscheinen [1].

4. Ergebnisse

In den Bildern 2 bis 4 sind die Ergebnisse einiger Berechnungen zusammengefasst, welche nach dem Cowellschen Verfahren auf der ERMETH durchgeführt wurden. Die Bilder 2 und 3 zeigen Satelliten-Flugbahnen von der Erde zum Mond, wobei die erste auf dem Mond auftrifft, während bei der zweiten die Anfangsbedingungen so gewählt sind, dass das Raumschiff den Mond in einer Schleifenbahn umfliegt und wieder zur Erde zurückkehrt. Bei beiden Flugbahnen erfolgt der Start in einer Höhe von 1322 km über der Erdoberfläche mit einer horizontalen Geschwindigkeit von 10,085 km/s, der einzige Unterschied in den Anfangsbedingungen für beide Bahnen besteht lediglich in einer kleinen Differenz bei der Ausgangslage des Mondes im Zeitpunkt $t = 0$.

Bei der in Bild 2 dargestellten Auftreffbahn, welche den Satelliten in etwas mehr als drei Tagen zum Mond führen würde, verläuft die berechnete Bahnkurve so nahe am Mondmittelpunkt vorbei, dass das Rechenverfahren aus dem in § 3 erwähnten Grunde dort abbrach. Im Gegensatz dazu konnte J. Waldvogel [1] mit Hilfe der regularisierten Differentialgleichungen diese auch über die «fast singuläre Stelle» hinweg integrieren; bei der von uns immer angenommenen Idealisierung der vollkommenen Konzentration der Mondmasse im Mondmittelpunkt gelang es ihm so, die Bahnkurve über den mondnächsten Punkt hinweg weiterzuführen.

Die Schleifenbahn um den Mond nach Bild 3 zeigt den möglichen Flugweg eines Satelliten, welcher den Mond an dessen Hinterseite in einem minimalen Abstand von 5840 km von der wirklichen Mondoberfläche umfliegt und durch die Mondmasse gerade so stark abgelenkt wird, dass er zur Erde zurückfliegt, wo er nach einem etwas mehr als eine Woche dauernden Flug wieder eintrifft. In diesem Fall gelingt es auch mit dem Cowellschen Verfahren, die Flugbahn über den erdnächsten Punkt hinweg weiterzuführen, was in der gestrichelten Kurve dargestellt ist.

Als weiteres Resultat ist in Bild 4 die Bewegung eines Raumkörpers in der Umgebung eines stabilen Librationspunktes L angegeben, welcher — wie in Bild 4 skizziert — in der Spitze eines gleichseitigen Dreiecks über der Verbindungslinie Erde—Mond liegt. Die Kurve ist deshalb interessant, weil sie zeigt, mit welch ausserordentlicher Genauigkeit das Cowellsche Verfahren arbeitet, beträgt doch der maximale Abstand des Körpers vom Librationspunkt L, welcher im rotierenden System Erde—Mond festliegt, in dem ganzen untersuchten Zeitraum von sechs Monaten weniger als zwanzig Meter. Verglichen mit dem Abstand Erde—Mond stellt dies rund den zwanzigmillionsten Teil dar. Trotz dieser äusserst geringen Schwingungsamplituden der Störung können die Kurven mit grosser Präzision bestimmt werden.

Literaturverzeichnis

[1] *J. Waldvogel:* Numerische Berechnung von Erde-Mond-Flugbahnen auf Grund von Regularisierungsmethoden (erscheint demnächst).

[2] *M. F. Subbotin:* Lehrbuch der Himmelmechanik, Band 2 ONTI (1937).

[3] *V. A. Egorov:* Einige Probleme der Dynamik des Fluges zum Mond; 2. Sonderband der Reihe «Fortschritte der Physik»: Künstliche Erdsatelliten; Akademie-Verlag Berlin, 1959.

[4] *G. Stracke:* Bahnbestimmung der Planeten und Kometen; Springer Berlin, 1927.

[5] *P. Henrici:* Discrete Variable Methods in Ordinary Differential Equations; John Wiley & Sons, New York, 1962.

[6] *T. Levi-Civita:* Die Regularisierung des Dreikörperproblems und ihre Tragweite; Springer 1923.

Windkanalmessungen am Modell eines Luftkissenfahrzeuges

DK 533.6:629.124.8

Von **H. Baumann**, dipl. Ing., Wallisellen und **R. Murao**, dipl. Ing., Tokio *)

Herrn Professor Dr. **J. Ackeret** zum 65. Geburtstag gewidmet

Einleitung

Durch eine steigende Anzahl von Firmen in der ganzen Welt wurden in den letzten Jahren Luftkissenfahrzeuge gebaut und im ganzen auch ziemlich erfolgreich erprobt. Während man sich in den USA mehr für die militärischen Anwendungen dieser Fahrzeugkategorie interessiert, haben sich die britischen Firmen einen klaren Vorsprung im Bau von zivilen Typen für Fahrten über Wasserflächen erworben. In der Sowjetunion werden ebenfalls Versuche mit grossen Fahrzeugen dieser Art für den zivilen Einsatz durchgeführt. Wenn auch der fahrplanmässige Verkehr bisher eine nicht sehr grosse Regelmässigkeit erreichte, da er mit den kleineren in England letztes Jahr dazu verwendeten Fahrzeugen noch zu stark von Wetter und Wellengang abhängig

*) Beide Autoren sind ehemalige Mitarbeiter am Institut für Aerodynamik an der ETH, Zürich.

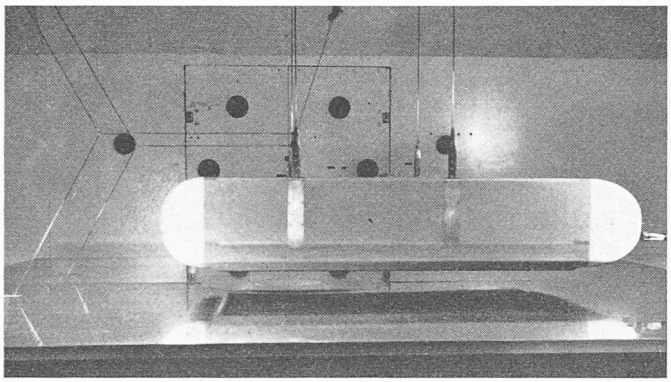


Bild 1. Messtrecke des Windkanals mit dem darin aufgehängten Modell und dem eingebauten Zusatzboden. Im Spiegelbild des Modells ist der Austrittsspalt des Luftvorhangs zu sehen

war, so darf man daraus doch nicht schliessen, Luftkissenfahrzeuge seien für den kommerziellen Einsatz nicht geeignet. Die Entwicklung steht vielmehr erst am Anfang und geht sicherlich auch in der Richtung auf grössere Typen, die sich dann höher über den Wasserspiegel erheben und dementsprechend weniger vom Seegang abhängig sein werden.

Bemerkenswert an dieser ganzen Entwicklung ist die Tatsache, dass bisher erst wenige theoretische Unterlagen für die Berechnung von Luftkissenfahrzeugen bei Vorwärtsfahrt bestehen und dass auch noch nicht viele Windkanalmessungen bekannt geworden sind. Lediglich für das Schweben ohne Vorwärtsgeschwindigkeit beim Anstellwinkel 0° und konstanter Schwebehöhe lässt sich für die verschiedenen Arten von Luftkissenfahrzeugen eine verhältnismässig einfache Berechnungsmethode für die zur Auftriebserzeugung nötige Leistung und Luftmenge angeben [1]). Im grossen Windkanal des Institutes für Aerodynamik an der ETH [2]) wurden deshalb — teilweise im Rahmen von Laboratoriumsübungen für Studenten — die im folgenden beschriebenen Messungen am Modell eines Luftkissenfahrzeuges durchgeführt.

Verzeichnis der verwendeten Symbole

A	Auftrieb
$D_{aeq} = 4F/l_V$	aequivalenter Durchmesser des Luftkissens (= 0,654 m)
F	Fläche des Luftkissens (= 0,5 m²)
L	Länge des Modells (= 1,5 m)

1) und 2) siehe Seite 173

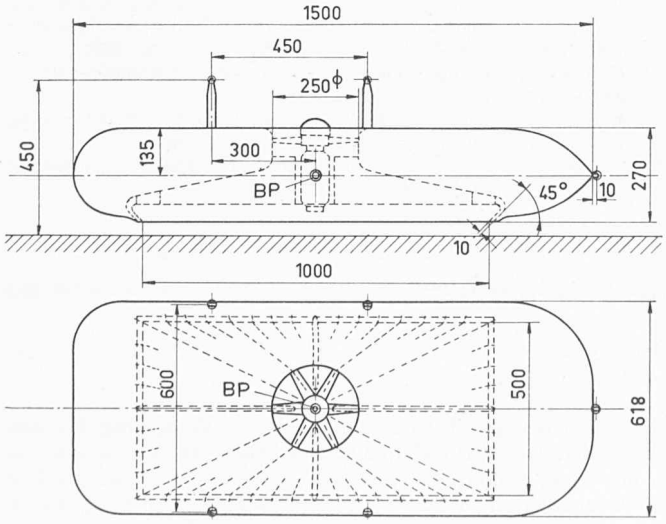


Bild 2. Seitenansicht und Grundriss des Modells. Im Grundriss sind die Trennwände und Umlenkbleche zur Führung der Luft vom Gebläse zum Luftvorhang eingezeichnet. BP bezeichnet den Bezugspunkt für das Längsmoment

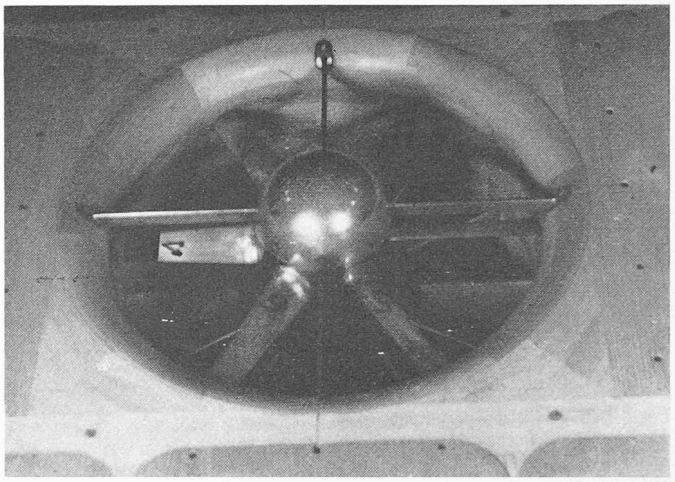


Bild 3. Das im Modell eingebaute Axialgebläse. Darunter sind die verschiedenen Trennwände für den Luftstrom zu erkennen

M	Längsmoment
Q	aus den Messungen am Rohreinlauf berechnete sekundliche Luftmenge
V_∞	Anblasgeschwindigkeit im Windkanal
W	Widerstand
$c_A = A/Fq_\infty$	Auftriebsbeiwert
c_{A0}	Auftriebsbeiwert bei ausgeschaltetem Gebläse
$c_W = W/Fq_\infty$	Widerstandsbeiwert
c_{W0}	Widerstandsbeiwert bei ausgeschaltetem Gebläse
$c_M = M/LFq_\infty$	Längsmomentenbeiwert
h	mittlere Schwebehöhe
l_V	gesamte Länge des Luftvorhangs (= 3,056 m)
n	Drehzahl des Gebläses
p_∞	statischer Druck in der Messtrecke
p_{GV}	örtlicher Gesamtdruck im Luftvorhang
$\overline{p}_{GV}$	mittlerer Gesamtdruck im Luftvorhang
p_{stV}	örtlicher statischer Druck im Luftvorhang
p_B	örtlicher statischer Druck im Luftkissen am Modellboden
$\overline{p}_B$	mittlerer statischer Druck im Luftkissen am Modellboden
$\Delta\overline{p}_B = \overline{p}_B - p_\infty$	
Δp_Q	statische Druckdifferenz zur Bestimmung der Luftmenge
$q_\infty = \frac{\rho}{2} V_\infty^2$	Staudruck der Anströmung
$q_V = \frac{\rho}{2} w^2 = p_{GV} - p_{stV}$	örtlicher Staudruck im Luftvorhang

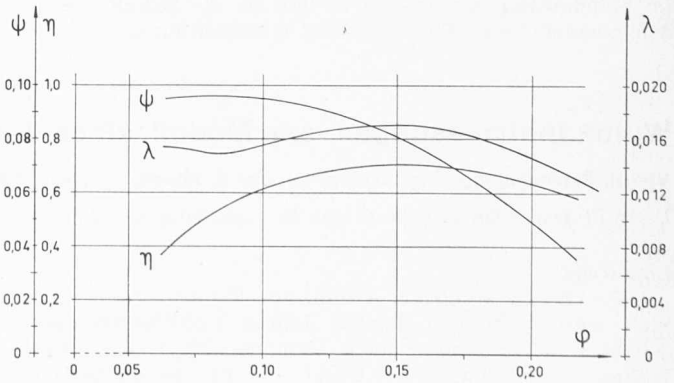


Bild 4. Dimensionslose Charakteristik des verwendeten Gebläses. Die Kennzahlen sind auf die Verhältnisse am Aussendurchmesser bezogen

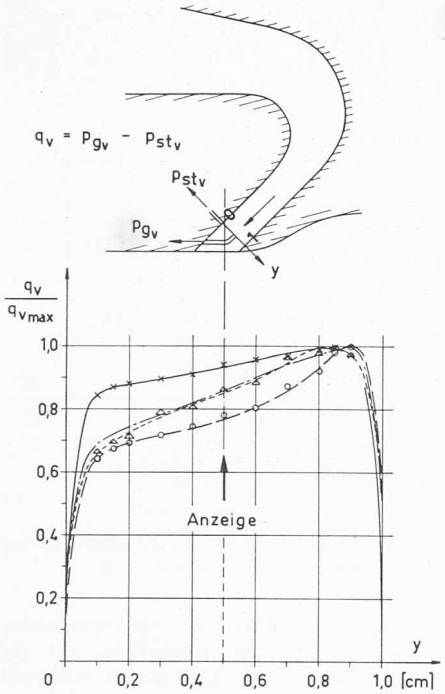


Bild 5 (links). Schematische Darstellung des Austrittsspaltes des Luftvorhangs mit den Messpunkten. Unten sind einige bei einer Schwebehöhe von rd. 1 m (praktisch ohne Bodeneffekt) an verschiedenen Stellen des Luftvorhangs gemessene Staudruckverteilungen gezeichnet

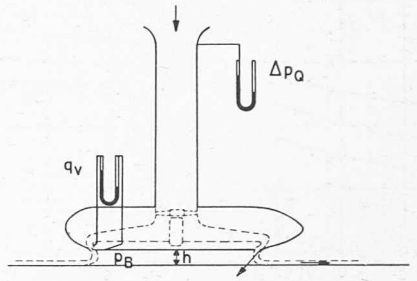
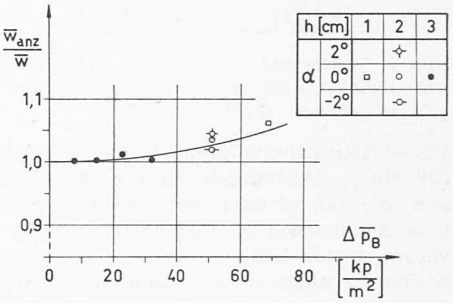


Bild 6 (rechts). Bestimmung der Luftmenge mit Hilfe eines speziellen Rohreinlaufes. Im Diagramm unten ist das Verhältnis der auf die beiden Arten ermittelten mittleren Geschwindigkeiten im Luftvorhang über dem mittleren Ueberdruck im Luftkissen $\Delta \bar{p}_B$ aufgetragen

$$\bar{w}_{anz} = \frac{1}{16} \sum_{n=1}^{16} \left(\sqrt{\frac{2}{\rho} q_v} \right)_n \; ; \; \bar{w} = \frac{Q}{s\, l_v}$$



$q_{V0} = \bar{p}_{GV} - p_\infty$	mittlerer Bezugsstaudruck im Luftvorhang
s	Dicke des Luftvorhangs (= 10 mm)
w	örtliche Geschwindigkeit im Luftvorhang
$\bar{w}_{anz}$	aus den Messwerten im Luftvorhang berechnete mittlere Geschwindigkeit im Luftvorhang
$\bar{w}$	aus der Ansaugmengenmessung berechnete mittlere Geschwindigkeit im Luftvorhang
y	Koordinate im Luftvorhang senkrecht zur Strömungsrichtung
α	Anstellwinkel des Modells gegenüber dem Boden
η	Wirkungsgrad des Gebläses
λ	Leistungszahl des Gebläses
ρ	Luftdichte
φ	Durchflusszahl des Gebläses
ψ	Druckzahl des Gebläses

Modellbeschreibung

Das für die Messungen verwendete Modell wurde im Institut für Aerodynamik hergestellt und ist in den Bildern 1 und 2 zu sehen. Die Erzeugung des Luftkissens erfolgte mittels eines längs der Peripherie des Modellbodens verlaufenden, rechteckigen Luftvorhanges von 10 mm Dicke, der um 45° gegen die Modellmitte zu geneigt war. Es sind Dreikomponentenmessungen (Auftrieb, Widerstand, Längsmoment) sowie Druckmessungen im Luftvorhang (Gesamtdruck und statischer Druck) und am Modellboden im Luftkissen (statischer Druck) ausgeführt worden. Die Modellabmessungen hatten sich nach der Grösse des Querschnitts der Windkanalmesstrecke zu richten. Das Gewicht betrug 31 kp, wozu noch 36 kp Bleiballast kamen, um eine ausreichende Vorspannung der Aufhängungsdrähte auch bei grossen Auftriebskräften zu gewährleisten. In die Messstrecke wurde in passender Höhe unter dem Modell ein zusätzlicher Boden mit profilierter Lufteintrittskante eingebaut. Damit wurde erreicht, dass die Bodengrenzschicht unter dem Modell viel dünner war, als wenn die Messungen direkt auf dem Windkanalboden durchgeführt worden wären. Die Höhe dieses Zusatzbodens war fest, während das Modell in vertikaler Richtung so verstellt werden konnte, dass die Schwebehöhe 0 bis 14 cm betrug. Die Verstellung erfolgte an den vier Aufhängungspunkten mit Hilfe von vier an der Drahtaufhängung befestigten Flacheisenprofilen, die in vier entsprechenden U-Profil-Schienen am Modell verschiebbar waren.

Zur Förderung der Luft in den Vorhang diente ein vorhandenes Axialgebläse ohne Leitrad (Modellgebläse zu den beiden Antriebsgebläsen des grossen Windkanals, Bild 3). Seine Charakteristik ist in Bild 4 dargestellt. Zum Antrieb stand ein Dreiphasen-Asynchronmotor zur Verfügung, der über einen Frequenzumformer gespeist wurde, so dass die Drehzahl von 0 bis 15 000 U/min verändert werden konnte. Trenn- und Umlenkwände führten die Luft vom Gebläse zum Luftvorhang. Damit konnte eine gleichmässige Verteilung längs des gesamten Vorhangs erreicht werden. Die elektrischen Leitungen sowie die Druckmessleitung vom im Modell montierten ferngesteuerten Umschalthahn nach aussen wurden im Totwasser am hinteren Ende des Modells mit flexiblen Uebergangstücken weggeführt, um die Messungen so wenig wie möglich zu beeinflussen.

Modellaufhängung, Messungen

Um im Bereich des Luftvorhanges Drahtdurchführungen durch den Zusatzboden zu vermeiden, wurde das Modell mit der Oberseite nach *oben* aufgehängt, was im Gegensatz zur normalen Praxis bei Flugzeugmodellen steht. Auftrieb, Widerstand und Längsmoment hat man für verschiedene Schwebehöhen (1 cm $< h <$ 6 cm), Anstellwinkel ($-3° < \alpha < +3°$), Vorwärtsgeschwindigkeiten ($0 < q_\infty < 40$ kp/m²) [3]) und Gebläsedrehzahlen gemessen. Bei einer Anstellwinkeländerung blieb die mittlere Schwebehöhe nicht konstant, weil die Drehachse durch den vorderen Aufhängungspunkt und nicht durch die Modellmitte verlief, Bild 1. Die in den folgenden Diagrammen für konstante Schwebehöhe gezeichneten Kurven konnten daher erst durch Interpolation der Messresultate erhalten werden. Bedingt durch die etwas eckige Form des Modells traten Strömungsablösungen auf, die vor allem an der Längsmomentenwaage zu starken Schwankungen führten. Die Genauigkeit der Momentenwägungen dürfte darunter etwas gelitten haben.

An 16 Stellen im Luftvorhang, etwa 8 mm vor dem Austritt aus dem Modellboden, wurden Druckmessungen durchgeführt. Der Gesamtdruck ist mit Staurohren von 1,2 mm Aussendurchmesser in der Mitte des 10 mm breiten Spaltes gemessen worden, während der statische Druck mit Wandanbohrungen auf der Innenseite des Spaltes abgenommen wurde, Bild 5 oben. Um aus diesen Messwerten die Mittelwerte des dynamischen Druckes und der Geschwindigkeit im Luftvorhang zu erhalten, war es notwendig, die Verteilung des dynamischen Druckes im Spalt zu ermitteln. Diese wird nun aber durch Schwebehöhe, Anstellwinkel und

[3]) Siehe Seite 173

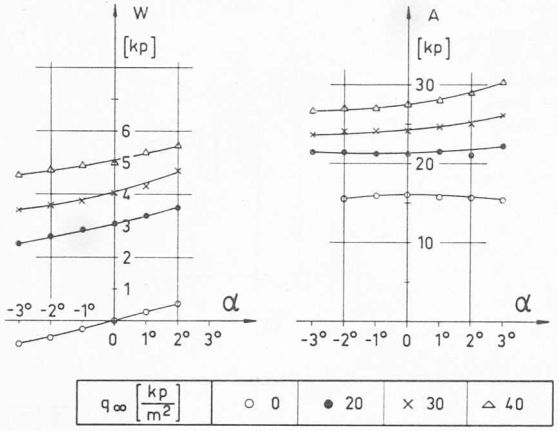


Bild 7. Widerstand und Auftrieb in Abhängigkeit vom Anstellwinkel α mit q_∞ als Parameter. Schwebehöhe h = 4 cm (rd. 0,06 · D_{aeq})

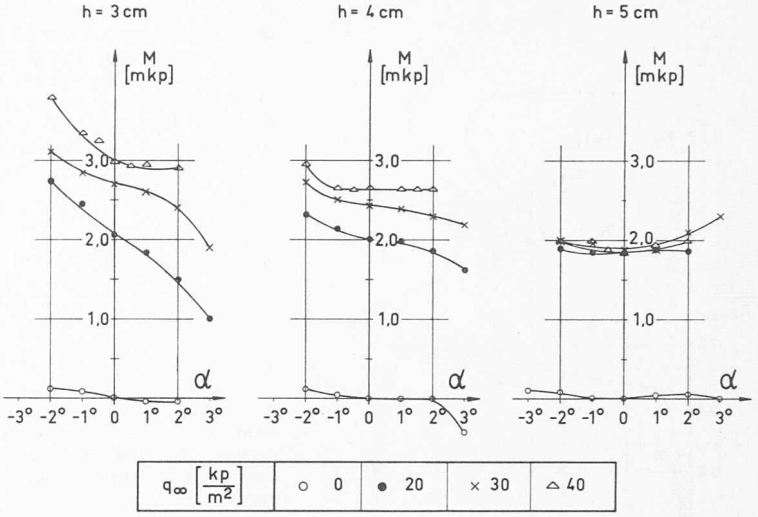


Bild 8. Längsmoment in Abhängigkeit vom Anstellwinkel α mit q_∞ als Parameter für drei verschiedene Schwebehöhen h

Vorwärtsgeschwindigkeit beeinflusst. In Bild 5 unten sind für einige Vorhangstellen die Staudruckverläufe aufgetragen, die bei grosser Schwebehöhe gemessen wurden, wo kein nennenswerter Bodeneffekt mehr vorhanden ist. Die vorangehende Umlenkung der Luft hat zur Folge, dass die Strömung nicht symmetrisch bezüglich der Spaltmitte ist.

Neben diesen Messungen im Luftvorhang zur Bestimmung der Luftmenge ist noch eine andere, «integrale» Messmethode angewendet worden, die in Bild 6 dargestellt ist. Auf die Saugöffnung des Gebläses im Modell wurde ein Rohr mit einem Einlauf aufgesetzt, mit dem die Luftmenge genau gemessen werden konnte. Daraus ergab sich die mengenmässig mittlere Geschwindigkeit $\bar{w}$ im Luftvorhang, die mit der über die gesamte Vorhangslänge gemittelten Geschwindigkeit $\bar{w}_{anz}$ der Messtellen im Vorhang verglichen werden konnte. Der Quotient $\bar{w}_{anz}/\bar{w}$ ist in Bild 6 unten über dem mittleren Ueberdruck $\Delta\bar{p}_B$ im Luftkissen aufgetragen. Die derart bei $V_\infty = 0$ gewonnene Eichkurve wurde für die Messreihen mit Vorwärtsgeschwindigkeit ebenfalls verwendet. Wegen der Abhängigkeit der Spaltströmung von den beidseits des Luftvorhanges herrschenden Drücken, d. h. grob gesprochen vom mittleren Ueberdruck im Luftkissen, ist der damit begangene Fehler sicher nicht schwerwiegend.

Am Modellboden waren auf den Mittellinien in Längs- und Querrichtung statische Druckmesstellen angeordnet, die zur Ermittlung der Druckverteilung im Luftkissen dienten. Daraus liess sich graphisch der mittlere Kissendruck $\Delta\bar{p}_B$ bestimmen.

Allgemein ist zu den Messungen zu bemerken, dass die wirklichen Verhältnisse in Fahrt mit der vorliegenden Messanordnung nicht ganz genau wiedergegeben werden. Am feststehenden Zusatzboden bildet sich eine Grenzschicht, die unter einem fahrenden Luftkissenfahrzeug nicht vorhanden ist. Zu erwarten ist, dass der Grenzschichteinfluss mit abnehmender Schwebehöhe grösser wird. Um diesen Nachteil auszuschalten, müsste auch der Boden mit der Geschwindigkeit V_∞ gegen das Modell zu bewegt werden, was aber mit ziemlichen Schwierigkeiten verbunden wäre.

Ergebnisse

Zuerst wurden bei konstanter Gebläsedrehzahl Messungen mit verschiedenen Schwebehöhen h, Anstellwinkeln α und Vorwärtsgeschwindigkeiten V_∞ durchgeführt. Die Ergebnisse sind aus den Bildern 7 bis 9 ersichtlich. Betrachtet man in Bild 7 zunächst die Kurven für $q_\infty = 0$, d. h. Windkanal ausser Betrieb, dann fällt sofort die zu erwartende Abhängigkeit vom Anstellwinkel auf. Bei positivem Anstellwinkel übt das Luftkissen eine Kraftkomponente entgegen der Fahrtrichtung aus, ebenso hat die Reaktion auf den totalen Impulsstrom des Luftvorhanges eine nach rückwärts gerichtete Komponente. Daher ergibt sich für grösser werdenden Anstellwinkel ein stetig steigender Widerstand. Umgekehrt beobachtet man für negative Anstellwinkel einen negativen Widerstand, d. h. einen Schub. Für horizontale Lage des Modells ($\alpha = 0°$) verschwindet der Widerstand, während der Auftrieb ein schwaches Maximum erreicht, da hier die vertikale Impulsstromkomponente am grössten wird.

Zu den Kräften im Stand addiert sich sodann ein durch die *Vorwärtsgeschwindigkeit* verursachter Anteil. Widerstand und Auftrieb setzen sich damit aus drei verschiedenen Komponenten zusammen, von denen eine durch die Vorwärtsgeschwindigkeit und die äussere Form, die zweite durch den Druck im Luftkissen und die dritte durch den Impulsstrom des Luftvorhanges gegeben ist. Diese beeinflussen sich gegenseitig sehr stark, so dass es schwierig ist, eine Aufteilung der gemessenen Kräfte auf diese Anteile vorzunehmen, wie es für die theoretische Erfassung des Problems notwendig wäre.

Die *Widerstandskurven* für verschiedene Vorwärtsgeschwindigkeiten laufen fast genau parallel. Demnach kommt zu den Werten im Stand ein fester, nur von der Vorwärtsgeschwindigkeit und nicht vom Anstellwinkel abhängiger Betrag dazu. Wegen der vorhin erwähnten Interferenz bedeutet

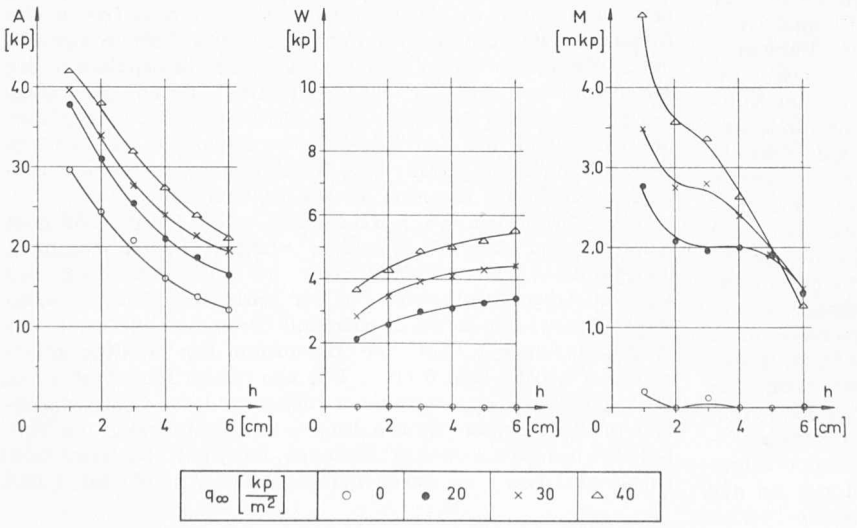


Bild 9. Auftrieb, Widerstand und Längsmoment in Abhängigkeit von der Schwebehöhe h mit q_∞ als Parameter. Anstellwinkel $\alpha = 0°$. Drehzahl des Gebläses bei den Versuchen nach den Bildern 7, 8 und 9 9280 U/min

Bilder 10 bis 15. Die massgebenden Grössen sind in Abhängigkeit vom Staudruckverhältnis q_∞/q_{V0} mit der dimensionslos gemachten Schwebehöhe $h\,l_V/4F$ als Parameter und beim Anstellwinkel $\alpha = 0°$ darstellt. Die eingekreisten Sterne bezeichnen Punkte, bei denen sich die Strömungsverhältnisse ändern

dies aber nicht, dass der Formwiderstandsbeiwert des Fahrzeuges unabhängig vom Anstellwinkel ist. — Im Gegensatz zum Widerstand ist der grössere Teil des *Auftriebs* schon im Stand durch den Druck des Luftkissens und die Reaktion auf die vertikale Impulsstromkomponente des Luftvorhangs vorhanden. Erst bei Geschwindigkeiten von 100 km/h oder darüber wird der Auftrieb doppelt so gross wie im Stand. Der von der Vorwärtsgeschwindigkeit herrührende Auftriebsanteil ist naturgemäss stark von der äusseren Form des Fahrzeuges abhängig und dürfte bei den meisten bisher gebauten Luftkissenfahrzeugen eher kleiner sein. Er kommt im wesentlichen durch Sog an der Fahrzeugoberseite zustande und wächst mit steigendem Anstellwinkel ähnlich wie bei einem Tragflügelprofil. Eine Ablösung der Strömung ist dabei nicht so schnell zu befürchten, da durch das Gebläse eine ständige Absaugung an der Oberseite bewirkt wird. Die Kurven in Bild 7 gelten für eine mittlere Schwebehöhe von $h = 4$ cm, d. h. etwa 6 % des aequivalenten Luftkissendurchmessers D_{aeq}. Für andere Schwebehöhen ist die Abhängigkeit vom Anstellwinkel ähnlich.

Anders werden die Verhältnisse beim *Längsmoment*, wie Bild 8 zeigt, auf dem der Verlauf des Längsmomentes über dem Anstellwinkel für drei verschiedene Schwebehöhen dargestellt ist. Aus dem schon erwähnten Grund ist die Streuung der Punkte hier stärker als bei den Auftriebs- und Widerstandskurven. Positives Vorzeichen bedeutet schwanzlastiges Moment bezogen auf den Momentenbezugspunkt BP, der in Bild 2 eingetragen ist. Auf der Schwebehöhe $h = 3$ cm (etwa $0{,}045 \cdot D_{aeq}$) ist das Fahrzeug statisch stabil, das schwanzlastige Moment nimmt mit steigendem Anstellwinkel ab. Bei der grössten gemessenen Vorwärtsgeschwindigkeit (entsprechend $q_\infty = 40$ kp/m²) ist allerdings für positive Anstellwinkel schon Indifferenz zu beobachten, obschon für kleinere Geschwindigkeiten die Stabilität grösser ist als im Stand. Die Kurven für grössere Schwebehöhen ($h = 4$ cm, etwa $0{,}06 \cdot D_{aeq}$, $h = 5$ cm, etwa $0{,}075 \cdot D_{aeq}$) und grössere Staudrücke ($q_\infty = 30$ kp/m², 40 kp/m²) zeigen, dass die statische Längsstabilität mit h abnimmt. Schon auf der Höhe $h = 5$ cm wurde für positive Anstellwinkel statische Labilität festgestellt, das Fahrzeug neigt also zum Aufbäumen. Das kann damit erklärt werden, dass die Sogspitze vorn auf der Modelloberseite bei steigender Geschwindigkeit und steigendem Anstellwinkel grösser wird. Allerdings ist auch für den Fall ohne Vorwärtsgeschwindigkeit der Momentenverlauf derselbe, was auf einen andern Grund zurückgeführt werden muss.

Die Kurven in Bild 9 beruhen auf denselben Messungen wie die bisher besprochenen. Für den Anstellwinkel 0° sind Auftrieb, Widerstand und Längsmoment über der Schwebehöhe h mit q_∞ als Parameter aufgetragen. Der Auftrieb zeigt den theoretisch zu erwartenden Verlauf, er nimmt mit wachsender Schwebehöhe ab. Die Stabilität in bezug auf die Schwebehöhe ist damit gewährleistet. Solange Gebläseleistung, Vorwärtsgeschwindigkeit und Anstellwinkel nicht verändert werden, kehrt das Fahrzeug nach Störungen wieder in die ursprüngliche Höhe zurück. Der *Widerstand* hat steigende Tendenz mit grösser werdender Schwebehöhe. Der Grund dafür ist nicht ohne weiteres einzusehen. Wie die obere Kurve in Bild 17, auf das später noch einmal eingegangen wird, zeigt, ist bei abgestelltem Modellgebläse der reine Formwiderstand für kleine Schwebehöhen grösser. Es muss daher angenommen werden, dass für den gemessenen Widerstandsverlauf bei laufendem Modellgebläse im wesentlichen die Strömung im *Luftvorhang* verantwortlich ist. Die durch das Gebläse geförderte Luftmenge wächst mit steigendem Bodenabstand, weil der zu überwindende Gegendruck kleiner wird. Damit kann sich der Impulsanteil des Widerstandes vergrössern.

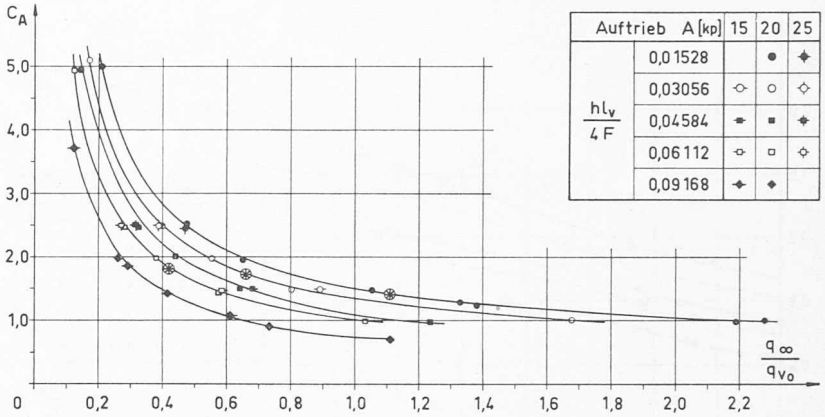


Bild 10. Auftriebsbeiwert c_A

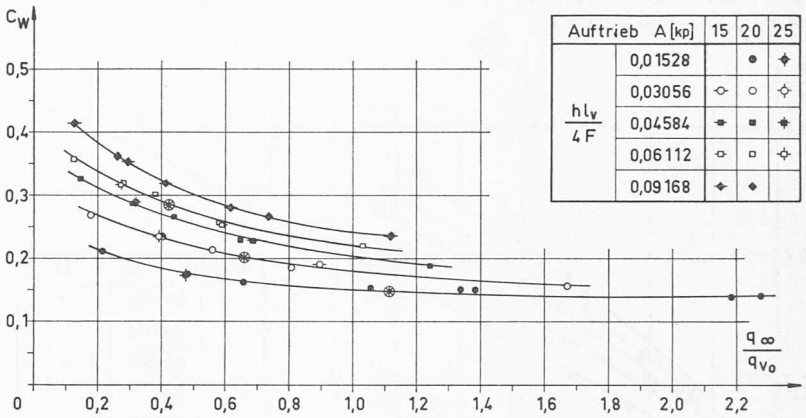


Bild 11. Widerstandsbeiwert c_W

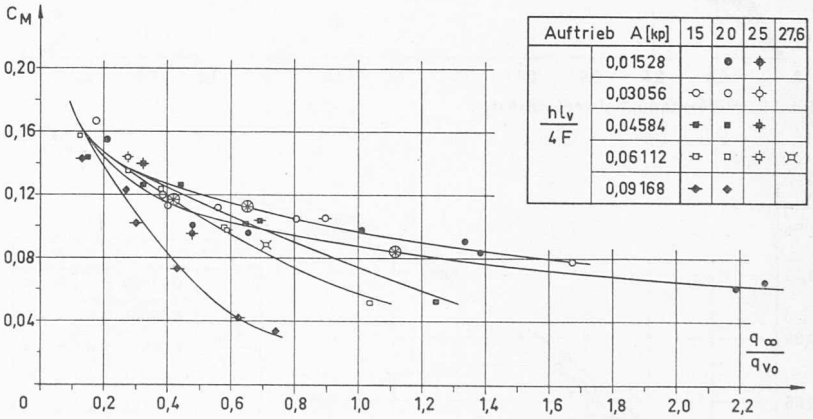


Bild 12. Längsmomentenbeiwert c_M

Das *Längsmoment* bei Anstellwinkel 0° sinkt mit wachsender Schwebehöhe. Es müsste für sehr grosse Schwebehöhe und ohne Luftvorhang wegen der ziemlich symmetrischen Modellform praktisch verschwinden, so dass eine Abnahme plausibel erscheint.

Wenn zunächst die dimensionsbehaftete Darstellungsweise der Messergebnisse gewählt wurde, so geschah es deshalb, weil keine Form der dimensionslosen Darstellung voll befriedigt. Die analog wie bei einem Flugzeug definierten Beiwerte c_A, c_W und c_M haben hier nicht dieselbe Aussagekraft, da Auftrieb, Widerstand und Längsmoment eben nicht nur vom Staudruck q_∞ der Vorwärtsgeschwindigkeit, sondern auch vom Staudruck q_V im Luftvorhang abhängen. Für $q_\infty = 0$, d. h. im Stand, würden die drei Koeffizienten

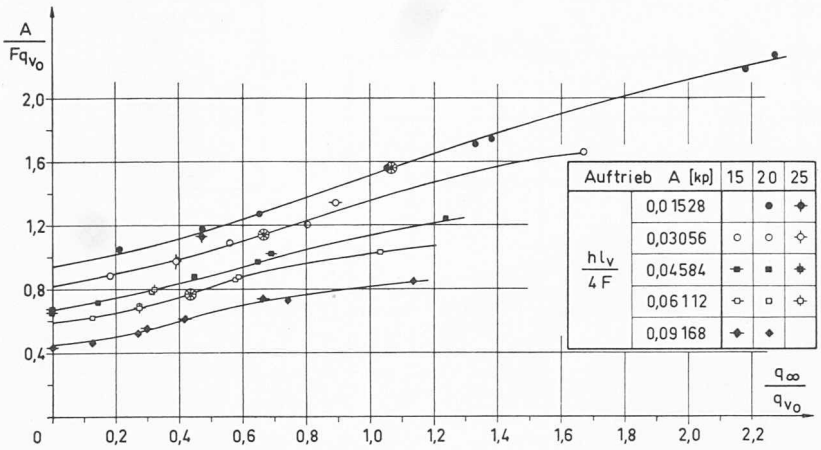


Bild 13. Auftriebswert A/Fq_{V0}

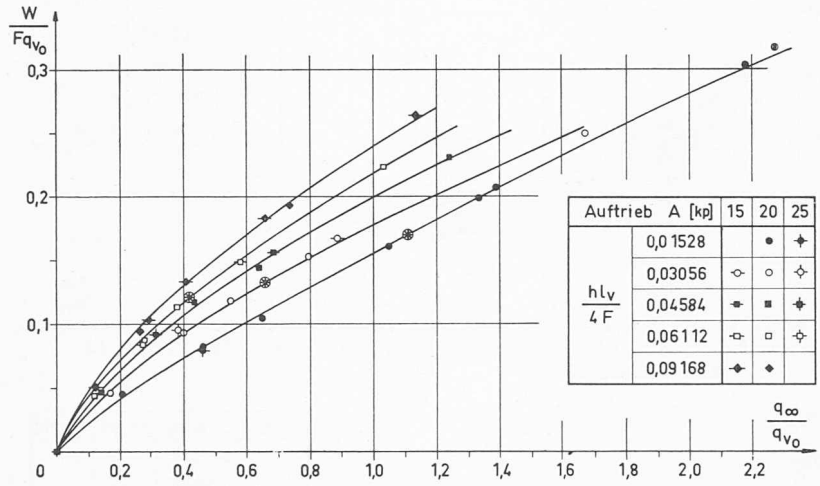


Bild 14. Widerstandsbeiwert W/Fq_{V0}

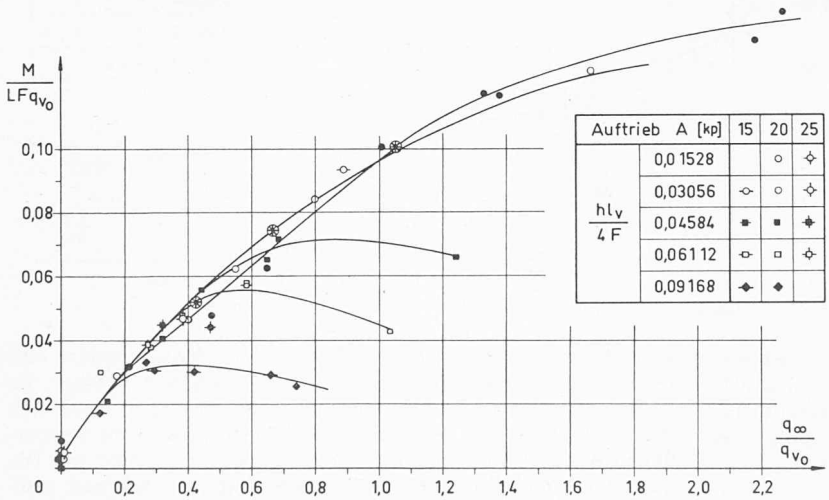


Bild 15. Längsmomentenbeiwert M/LFq_{V0}

sogar unendlich gross, was offenbar nicht sinnvoll ist, da in diesem Spezialfall die vorhandenen Kräfte und Momente eine andere Ursache haben. Es ist daher ebenso gut denkbar, drei andere Beiwerte zu bilden, bei deren Definition der mittlere Bezugsstaudruck q_{V0} im Luftvorhang anstelle von q_∞ verwendet wird. In den Bildern 10 bis 15 sind die sechs Beiwerte c_A, c_W, c_M, A/Fq_{V0}, W/Fq_{V0} und M/LFq_{V0} über q_∞/q_{V0} aufgetragen. Diese Darstellungsweise verknüpft die genannten Grössen mit dem Verhältnis der Staudrücke von Vorwärtsgeschwindigkeit und Luftgeschwindigkeit im Vorhang, das bei Luftkissenfahrzeugen eine wichtige Rolle spielt. Davon ist die Art der Strömung auf der Fahrzeugunterseite abhängig, die ihrerseits wieder die Kräfte und Momente beeinflusst. Die Ergebnisse in den Bildern 10 bis 15 wurden aus einer neuen Messreihe gewonnen, in der beim Anstellwinkel $\alpha = 0°$ Schwebehöhe und Vorwärtsgeschwindigkeit geändert wurden. Anstelle der Gebläsedrehzahl hat man den Auftrieb A konstant gehalten und zwar auf den drei Grössen $A = 15$, 20, 25 kp, was durch entsprechende Drehzahleinstellung erreicht werden konnte. Die Berechtigung solcher Messreihen leitet sich daraus ab, dass auch in Wirklichkeit unabhängig von Schwebehöhe, Geschwindigkeit und Anstellwinkel immer dasselbe Gewicht getragen werden muss. Um den Auftrieb konstant zu halten, muss bei grösser werdendem Staudruck q_∞ der Vorwärtsgeschwindigkeit der Staudruck q_{V0} im Luftvorhang verringert werden.

Wie aus den Diagrammen ersichtlich ist, haben alle sechs Beiwerte in der gewählten Darstellung einen stetigen Verlauf. Die Schwebehöhe h tritt dabei als Parameter auf. Die Abhängigkeit von der absoluten Grösse des Auftriebs ist unbedeutend. Die Erklärung für den qualitativen Verlauf der *Auftriebsbeiwerte* ist verhältnismässig einfach. Die auf q_∞ bezogenen c_A-Werte, Bild 10, nehmen ab, weil mit grösser werdendem Quotient q_∞/q_{V0} die Strömung im Luftvorhang mehr und mehr gestört wird und sie daher immer weniger zur Auftriebserzeugung beitragen kann. Der ansteigende Verlauf von A/Fq_{V0}, Bild 13, ist analog damit zu erklären, dass die Vorwärtsgeschwindigkeit für die Auftriebserzeugung umso wichtiger ist, je grösser q_∞/q_{V0} wird.

Die Abnahme des *Widerstandsbeiwertes* c_W, Bild 11, bei grösser werdendem Quotient q_∞/q_{V0} lässt die Vermutung zu, dass ein Teil des Impulswiderstandes wegen der veränderten Strömungsverhältnisse im Luftvorhang wieder wegfällt. Der Impulswiderstand entsteht ja durch die Umlenkung der in das Modellgebläse von vorne einströmenden Luft in den Luftvorhang. Von den sechs definierten Beiwerten hat W/Fq_{V0}, Bild 14, offensichtlich die geringste Bedeutung, weil der Widerstand zum weitaus grössten Teil von q_∞ abhängt. Es ist aber auch hier erkennbar, dass er mit wachsender Schwebehöhe steigt.

Die Kurven für die *Längsmomentenbeiwerte* sind wiederum am schwierigsten zu deuten. Immerhin kann die Abnahme von c_M, Bild 12, mit grösser werdendem q_∞/q_{V0} darauf zurückgeführt werden, dass der vordere Luftvorhang immer mehr durchbrochen wird. Dadurch werden die Anströmung und die Druckkräfte an der Modellnase immer symmetrischer bezüglich der Horizontalebene durch den Momentenbezugspunkt. Für kleine Werte von q_∞/q_{V0} ist das Längsmoment hauptsächlich von q_∞ und wenig von q_{V0} abhängig, wie Bild 15 zeigt. Erst wenn q_∞/q_{V0} eine bestimmte Grösse erreicht hat, bei der auch das Strömungsbild wechselt, Bild 16, tritt eine Aenderung im Verhalten von M/LFq_{V0} ein. Das schwanzlastige Moment verhält sich dann insbesondere bei grossen Schwebehöhen beinahe proportional zu q_{V0}, wenn q_∞ konstant gehalten wird. Darin spiegelt sich erneut die Tatsache wider, dass die Strömung um die Vorderseite des Modells zunehmend symmetrischer wird, je mehr der Luftvorhang geschwächt ist.

Wenn die Bilder 10 bis 15 näher betrachtet werden, lässt sich die interessante Tatsache beobachten, dass die Kurven beim Wert $q_\infty/q_{V0} = 1$ keinerlei Besonderheit aufweisen. Es liegt die Annahme nahe, wenn der Staudruck der Anströmung den Wert des Staudruckes im Luftvorhang erreiche und überschreite, müssten sich die aerodynamischen Verhältnisse und damit der Charakter der Kurven wesentlich ändern. Wie die aus Beobachtungen mit Fadensonden

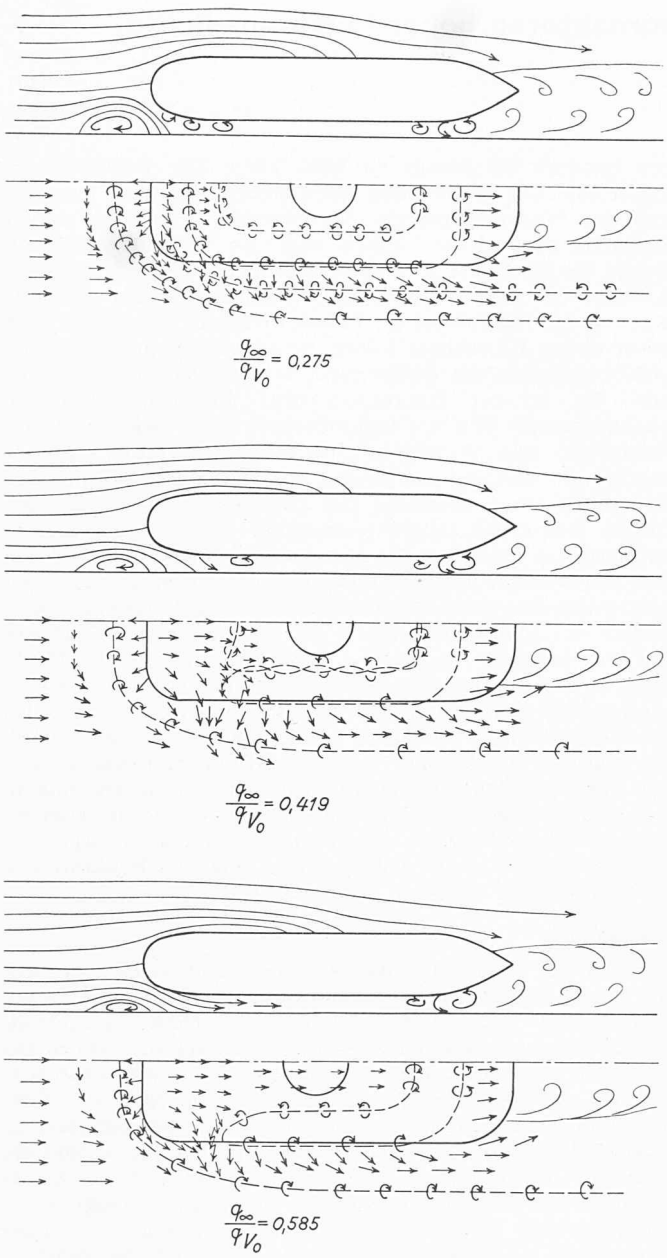


Bild 16. Mit Fadensonden beobachtete Strömungsbilder bei verschiedenen Staudruckverhältnissen $q\infty/q_{V0}$ · Anstellwinkel $\alpha = 0°$. Schwebehöhe $h = 4$ cm = rd. $0{,}06 \cdot D_{aeq}$

zusammengestellten Strömungsbilder, Bild 16, erkennen lassen, ist die Aenderung der Strömungsverhältnisse viel eher allmählich. In erster Linie ist das Verhalten der Strömung unmittelbar vor dem vorderen Luftvorhang interessant. Bei kleinem Quotienten q_∞/q_{V0} ($< 0{,}3$) baut sich hier durch die Stauwirkung des Luftvorhangs ein kompliziertes Wirbelsystem auf, das sich zunehmend vereinfacht, je mehr die Vorwärtsgeschwindigkeit gegenüber der Geschwindigkeit im Vorhang vergrössert wird. Von $q_\infty/q_{V0} \approx 0{,}55$ an, d. h. lange bevor die Vorwärtsgeschwindigkeit den Betrag der Vorhanggeschwindigkeit erreicht, ist der vordere Luftvorhang im wesentlichen durchbrochen, wenn auch die Geschwindigkeit unter dem Modell infolge der sich immer noch bemerkbar machenden Spaltströmung viel kleiner als V_∞ ist. Ungefähr die Mitte dieses Aenderungsbereiches ist zum Teil in den Bildern 10 bis 15 besonders bezeichnet, erweist sich jedoch aus dem erwähnten Grund für die meisten Kurven als nicht wesentlich für ihren Verlauf. Die Strömung am hinteren Luftvorhang wird wegen der verringerten Geschwindigkeit unter dem Modellboden durch die Vorgänge an der Vorderseite wenig beeinflusst.

Wollte man die vorliegenden Ergebnisse noch näher analysieren, was hier aber nicht beabsichtigt ist, dann

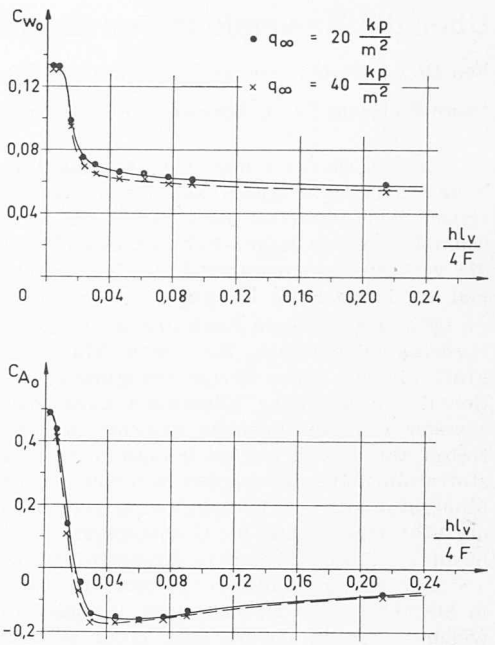


Bild 17. Bei abgestelltem Gebläse gemessene Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte c_{W0} und c_{A0} in Abhängigkeit von der dimensionslos gemachten Schwebehöhe $h\,l_V/4F$

müsste man versuchen, die Wirkungen der Strömung im Luftvorhang und der Parallelanströmung auf die aerodynamischen Kräfte und Momente voneinander zu trennen. Die Messungen haben gezeigt, dass eine starke gegenseitige Beeinflussung vorhanden ist, dass also die beiden Grenzfälle ohne Vorwärtsgeschwindigkeit bzw. ohne Luftvorhang nicht einfach überlagert werden dürfen, was ohne weiteres einzusehen ist.

Der Wunsch, auch einen Ueberblick über die Verhältnisse bei abgestelltem Gebläse, d. h. ohne Luftvorhang zu gewinnen, hat zur Messreihe geführt, deren Ergebnisse in Bild 17 dargestellt sind. Der Gebläseeinlauf und der Spalt des Luftvorhangs waren dabei zugedeckt. Die Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte c_{A0} und c_{W0} sind in Bild 17 über der Schwebehöhe aufgetragen. Bei ganz kleinem Spalt zwischen Modell und Boden ergibt sich durch den Sog an der Fahrzeugoberseite ein Auftrieb und gleichzeitig erreicht der Widerstand hier sein Maximum. Wird die Schwebehöhe vergrössert, lässt sich für beide Beiwerte ein markanter Abfall beobachten. Dieser tritt offenbar dann auf, wenn sich unter dem Fahrzeug eine stark beschleunigte Strömung ausbilden kann, die durch Sog nach unten den Auftrieb negativ werden lässt. Dazu ist zu bemerken, dass der Ort dieses Abfalls ohne die am Boden vorhandene Grenzschicht wahrscheinlich mehr links liegen würde.

Ein Ueberblick über die durchgeführten Messungen zeigt, dass die verschiedenen Parameter auf mannigfache Weise kombiniert werden können. Es wurde deshalb danach getrachtet, die wichtigsten Parameterkombinationen zu erfassen. Das Schwergewicht ist dabei auf den Anstellwinkel 0° gelegt worden. Naturgemäss sind die Ergebnisse auch stark von der Bauart und der äusseren Form des Modells abhängig. Sie können deshalb nicht ohne weiteres auf andere Verhältnisse übertragen werden. Immerhin ist die Modellform so einfach, dass sich keine spezifischen Effekte von irgendwelchen Aufbauten überlagern. Die Resultate können somit als Richtwerte für Kräfte und Momente bei dieser Fahrzeugkategorie angesehen werden.

1) *J. Ackeret* und *H. Baumann:* Ueber Luftkissenfahrzeuge, «Schweiz. Bauzeitung», 78. (1960), S. 137-141.

2) Beschreibung in *J. Ackeret:* Das Institut für Aerodynamik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule, «Mitteilung Nr. 8 aus dem Institut für Aerodynamik an der ETH» (1943).

3) Im folgenden ist der Anschaulichkeit halber immer von Vorwärtsgeschwindigkeit die Rede, während es sich natürlich um die Anblasgeschwindigkeit im Windkanal handelt.