

Die Modell-Hecksstielhalterung im Deutsch-Niederländischen Windkanal

Autor(en): **Isler, Rolph / Isler, Urs**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **100 (1982)**

Heft 46

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74892>

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.

Die Modell-Heckstielhalterung im Deutsch-Niederländischen Windkanal

Von Rolph und Urs Isler, Zürich

Der grösste und modernste Windkanal Europas, ein deutsch-niederländisches Gemeinschaftsprojekt, wurde im letzten Herbst im Noordoostpolder der Niederlande in Betrieb genommen und wird der europäischen Luftfahrtindustrie ermöglichen, mit der Spitze der künftigen Flugzeugentwicklung Schritt zu halten. Der Windkanal ist alleine schon hinsichtlich Messstrecken-Grösse, Geschwindigkeit und Reynoldscher Zahl erheblich leistungsfähiger als bestehende Anlagen. Aber auch betreffend Strömungsqualität, Ausstattung, Messeinrichtung und Verwendungsspektrum setzt diese Grossanlage neue Massstäbe.

Eine zentrale Stellung der Messausrüstung nimmt die Modell-Heckstielhalterung ein. Sie ist für alle Bewegungen des Modells im Luftstrom verantwortlich und gewährleistet damit eine wirklichkeitsnahe Simulation aller Flugzustände. An die Reproduzierbarkeit der Positionierung werden sehr strenge Bedingungen gestellt, da man die selbe Fluglage unter verschiedenen aerodynamischen Modifikationen am Modell messen möchte. Die Ergebnisse sind nur dann vergleichbar, wenn die Versuchsbedingungen reproduzierbar sind. Im folgenden Bericht werden die Problematik, die Lösungen und die Realisierung dieser Modell-Heckstielhalterung dargelegt.

Die Entstehung der DNW

In den sechziger Jahren haben Bestandsaufnahmen der aerodynamischen Versuchsanlagen in Europa ergeben, dass die derzeit verfügbaren Windkanäle hinsichtlich Grösse und Leistungsfähigkeit den Anforderungen anspruchsvoller Entwicklungsarbeiten nicht genügen. Insbesondere im *Niedergeschwindigkeitsbereich*, in dem so wichtige Probleme wie die der Start- und Landephase, der VSTOL-Technik einschliesslich Triebwerksimulation, der Rotor-aerodynamik und Aeroelastik zunehmend an Bedeutung gewonnen haben, machte sich der *Mangel an ausreichenden Simulationmöglichkeiten* bemerkbar. Die europäische Luftfahrt-

industrie sah sich deshalb in ihrer Entwicklungstätigkeit so stark eingeschränkt, dass sie die Wettbewerbsfähigkeit in Frage stellen musste. In *Deutschland* und *Holland* entstanden darauf erste Überlegungen für die Realisierung je eines grossen *Unterschallkanals*. Das deutsche Projekt GUK, ausgearbeitet von der DFVLR (Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt), sollte mit zwei Messstrecken von der Grösse $9,5\text{ m} \times 9,5\text{ m}$ und $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ (max. Geschwindigkeit von 65 m/s bzw. 150 m/s) ausgerüstet werden, während in Holland im NLR (Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium) der sog. LST (Querschnitt $8 \times 6\text{ m}$) auf dem Papier Gestalt annahm. Zweifel an einem wirtschaftlichen Betrieb zweier Anla-

gen waren Anlass, die Möglichkeiten eines Gemeinschaftsprojektes zu erwägen. Zudem wiesen beide Vorprojekte ähnliche Auslegungsmerkmale hinsichtlich der Bauart, der Grösse und der Leistung auf. Im Jahre 1975 wurde darauf eine Fachkommission mit der Aufgabe der Erarbeitung einer technischen Gemeinschaftslösung beauftragt.

Zähe Verhandlungen und beidseitige Bereitschaft zur Zusammenarbeit führten Ende 1975 zum Konzept des DNW (Deutsch-Niederländischer Windkanal). Diese Kompromisslösung zwischen GUK und LST weist folgendes Konzept auf:

- drei auswechselbare Messstrecken mit den Querschnitten von $9,5\text{ m} \times 9,5\text{ m}$, $8\text{ m} \times 6\text{ m}$ und $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ und max. Windgeschwindigkeiten von 65 , 120 bzw. 150 m/s ;
- Verwendung der bereits weit ausgearbeiteten Konstruktion der LST-Röhre mit lokalen Anpassungen an die GUK-Messstrecken;
- Antriebsleistung von etwa 13 MW ;
- Möglichkeit eines Luftaustauschs;
- Standort im Noordoostpolder der Niederlande.

Am 27. August 1980 ist der DNW durch die zuständigen Minister beider Länder feierlich eröffnet und offiziell in Betrieb genommen worden.

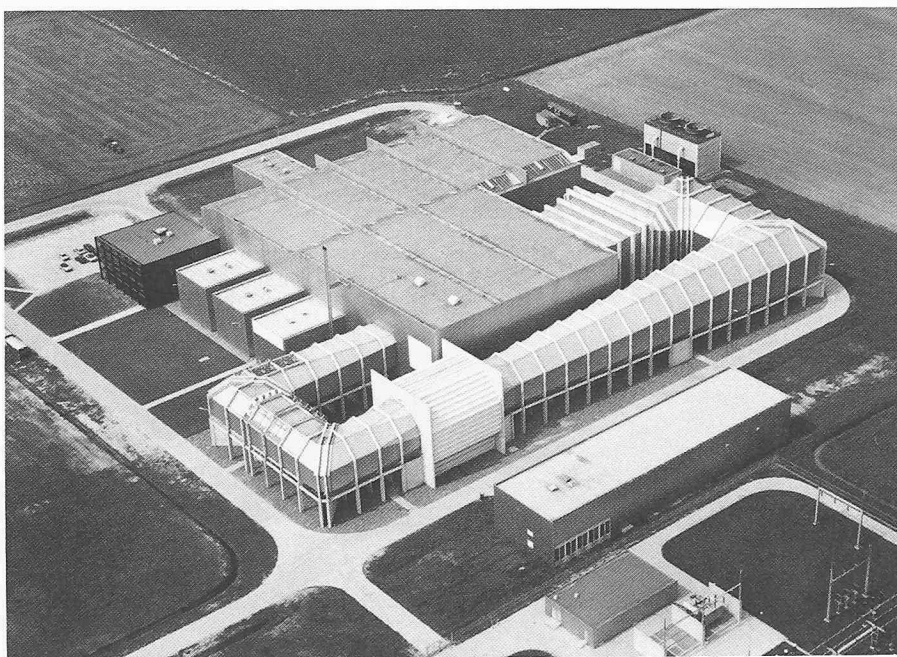
Technische Beschreibung der Anlagen

Bild 1 gibt einen Überblick über die gesamte Windkanalanlage. Kernstück ist die als schmales Rechteck angeordnete geschlossene Röhre (1) mit einer gesamten Achslänge von 318 m . Die ausgedehnte Parkhalle (3) nimmt die auswechselbaren Messstrecken auf, die sich nicht im Einsatz befinden. An die Parkhalle schliessen sich unmittelbar mehrere kleine Hallen an, und zwar eine Versuchshalle (5) mit Versorgungsanschlüssen für statische Tests (z. B. Triebwerksimulation), zwei Modellmontagehallen (6 und 7), eine Eichhalle (9) und das Bürogebäude (8). Die zentrale Steuerwarte (4) nimmt auch die EDV-Anlage auf. Eine Maschinenhalle (11), ein Zwillingsskühlurm (12) und die Energieeinspeisestation ergänzen den Gebäudekomplex.

Drei wechselbare Messstrecken

Typisches technisches Merkmal des DNW sind dessen drei wechselbare Messstrecken. Dies wurde mit einer Kombinationsmessstrecke, bei der durch Verfahren der Seitenwände die Querschnitte $8 \times 8\text{ m}$ und $6 \times 6\text{ m}$ eingestellt werden, sowie durch eine geson-

Ansicht der Deutsch-Niederländischen Windkanalanlage (DNW) in Vollenhove, Noordoostpolder (NL)



derte $9,5 \text{ m} \times 9,5 \text{ m}$ -Messstrecke realisiert. Beim Ändern der Konfiguration werden jeweils auch die entsprechenden Düsen- und Übergangssektionen ausgewechselt bzw. angepasst. Die einzelnen Sektionen werden mit Hilfe von Luftkissenelementen durch die Hallen bewegt. Diese sind bis zu 16 m hoch und wiegen etwa 230 t. Ein kompletter Messstreckenwechsel ist in etwa acht Stunden durchführbar. Mit den drei Messstrecken kann der DNW ein sehr breites Aufgabenspektrum abdecken.

- In der Messstrecke mit einem Querschnitt von $8 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ und maximalen Windgeschwindigkeiten von 430 km/h werden vorrangig die *Start- und Landeeigenschaften* künftiger Flugzeuge untersucht. Dabei stehen Gesichtspunkte der *Sicherheit, Treibstoffersparnis und Umweltfreundlichkeit* im Vordergrund. In diesem Zusammenhang spielt auch die *Weiterentwicklung auftriebserhöhender Mittel* (Klappensysteme an den Tragflügeln) eine wichtige Rolle.
- Die $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ -Messstrecke mit maximal 540 km/h eignet sich besonders für Untersuchungen von *Schnellhubschraubern* und *dynamischen Problemen* (z. B. Flattern).
- Für *sehr grosse* und daher *sehr wirklichkeitsnahe Modelle* mit Spannweiten bis zu 7 m ist die $9,5 \text{ m} \times 9,5 \text{ m}$ -Messstrecke vorgesehen. Die Höchstgeschwindigkeit von etwa 230 km/h reicht aus, um auch das weite Feld *nicht-luftfahrttechnischer Anwendungen* (Gebäude, Brücken, Schiffe, Original-Nutzfahrzeuge) miteinzubeziehen.
- Die vierte, sogenannte «offene» Messstrecke, bei der ein Luftstrahl von $8 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ Querschnitt frei durch die grösste schalltote Halle der Welt strömt, ist besonders für *aeroakustische Untersuchungen* konzipiert. Hier wird der von der Flugzeugzelle, den Triebwerken und Rotoren verursachte Lärm gemessen, um wirksame Massnahmen zur Lärminderung bei Start und Landung entwickeln zu können.

Im Hinblick auf diese aeroakustischen Untersuchungen sind Massnahmen zur Reduzierung des Windkanal-Eigenlärms getroffen worden. Diese betreffen schalldämmende Auskleidungen der gesamten Messhalle sowie der ersten und vierten Umlenkecke.

Beim Bau der Anlage wurden besonders die sehr hohen Anforderungen an die *Messgenauigkeit* berücksichtigt. Für die 318 m lange Windkanalröhre, die aus vorgefertigten Betonplatten besteht, waren *maximale Toleranzen* von 30 mm zugelassen. Die aerodynamischen Waagen, mit denen Luftkräfte

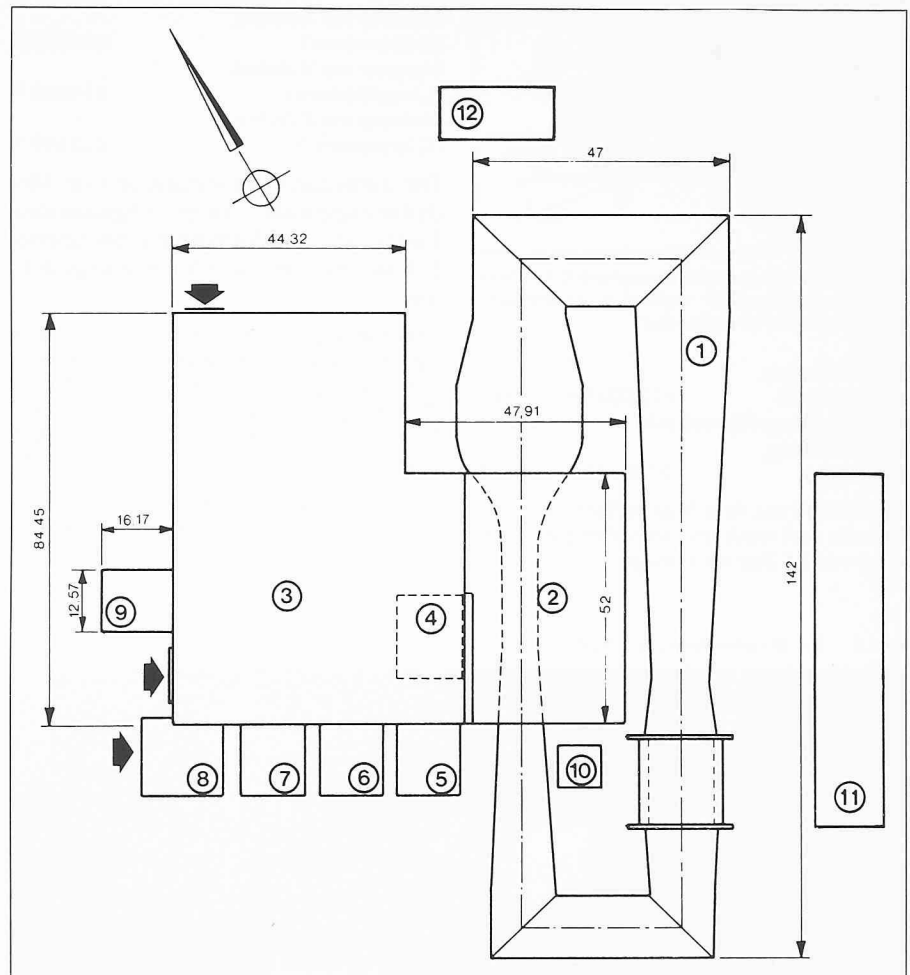


Bild 1. Grundriss der Gesamtanlage

bis zu 6 Tonnen gemessen werden können, haben eine Genauigkeit von 10 g ! Schon diese zwei Beispiele zeigen, welche hohen Anforderungen an Planung, Entwurf und Ausführung gestellt und erfüllt wurden.

Am Beispiel der Modell-Heckstielhalterung wird beschrieben, wie gross der Aufwand war, um die hohen Ansprüche des DNW zu erfüllen. Auftragnehmer für dieses Flugsimulationsgerät war die Firma Turbo-Lufttechnik in Zweibrücken. Sie zeichnete für die Konstruktion und Statik der Strukturteile sowie für den Grossteil der Montage verantwortlich. Mit der Konstruktion und Realisierung des Verstellmechanismus der Achsen, der gesamten Entwicklung des hydraulischen und elektrischen Steuersystems, der Sicherheitsüberwachung sowie der Auslegung der Hydraulikversorgung wurde das Ingenieurbüro Isler beauftragt.

Die Modell-Heckstielhalterung

Aufgabenstellung

Die Heckstielhalterung (Sting) hat im Windkanal die Aufgabe, das Modell in jeder Fluglage in der Strömung zu hal-

ten. Der Mechanismus ist dabei neben dem Modellgewicht von maximal zwei Tonnen den verschiedensten aerodynamischen, statischen und dynamischen Lasten ausgesetzt. Um das Modell ruhig im Luftstrom zu halten, muss die Konstruktion möglichst steif ausgeführt sein. Die Modellumströmung soll andererseits durch die Halterung wenig gestört werden, was zur Forderung schlanker Bauweise führt.

Im Pflichtenheft der Positionierung hat die Reproduzierbarkeit erste Priorität, denn erst damit können Messungen bei kleinen Änderungen der Anströmung oder Modifikationen am Modell verglichen werden.

Für die Vertikalbewegung Z stellte der Auftraggeber die Forderung des Nachvollzuges einer kompletten Flugphase, der Landesimulation. Dieser Bewegungsablauf, der sog. «Special Use» schreibt eine Geschwindigkeit von 5 m/s vor, bei gleichzeitiger Verstellung von α mit $40^\circ/\text{s}$.

Im folgenden ist ein Auszug aus dem anspruchsvollen Pflichtenheft gegeben. Zur Definition der Bewegung diene Bild 2.

An aufzunehmenden *Modellkräften und -momenten* wurden gefordert:

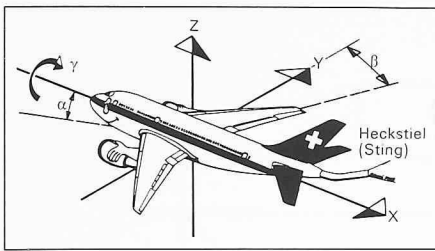


Bild 2. Bewegungen am Flugzeugmodell. X: Widerstand Y: Seitenkraft Z: Auftrieb α : Anstellwinkel β : Schiebewinkel γ : Rollwinkel

In X-Richtung (Widerstand)	+ 12 500 bis -7 500 N
In Y-Richtung (Seitenkraft)	\pm 12 500 N
In Z-Richtung (Auftrieb)	+ 35 000 bis -15 000 N

Ein Modell mit dem Maximalgewicht von 2 Tonnen darf somit im Extremfall einen Auftrieb von 5,5 Tonnen erzeugen.

Moment um X-Achse (Rollmoment)	\pm 15 000 N
Moment um Y-Achse (Längsmoment)	\pm 14 000 N
Moment um Z-Achse (Giermoment)	\pm 12 000 N

Die zulässigen Deformationen im Modellbezugspunkt unter obgenannten Lasten und der Annahme eines unendlich steifen Stiels wurden wie folgt definiert:

Verschiebung in X-Richtung	50 mm
Verschiebung in Y-Richtung	200 mm
Verschiebung in Z-Richtung	50 mm
Drehung um X-Achse	0,5°
Drehung um Y-Achse	0,5°
Drehung um Z-Achse	2°

Die Bereiche und die dazugehörigen Anzeige- und Reproduziergenauigkeiten mussten wie folgt erfüllt werden:

	Bereich	Genauigkeit
Anstellwinkel α	+45° bis -15°	\pm 0,02°
Schiebwinkel β	+30°	+ 0,02°
Rollwinkel γ (mechanisch)	360°	
seitliche Versetzung	\pm 2000 mm	\pm 1 mm
Höhenversetzung	+ 2250 bis -4395 mm	\pm 1 mm

hierzu waren die folgenden Geschwindigkeiten gefordert:

Geschwindigkeit im «Normal Use»

Verstellung Anstellwinkel α	0 bis 5°/s
Verstellung Schiebewinkel β	0 bis 5°/s
Verstellung Höhenlage Z	0,5 m/s

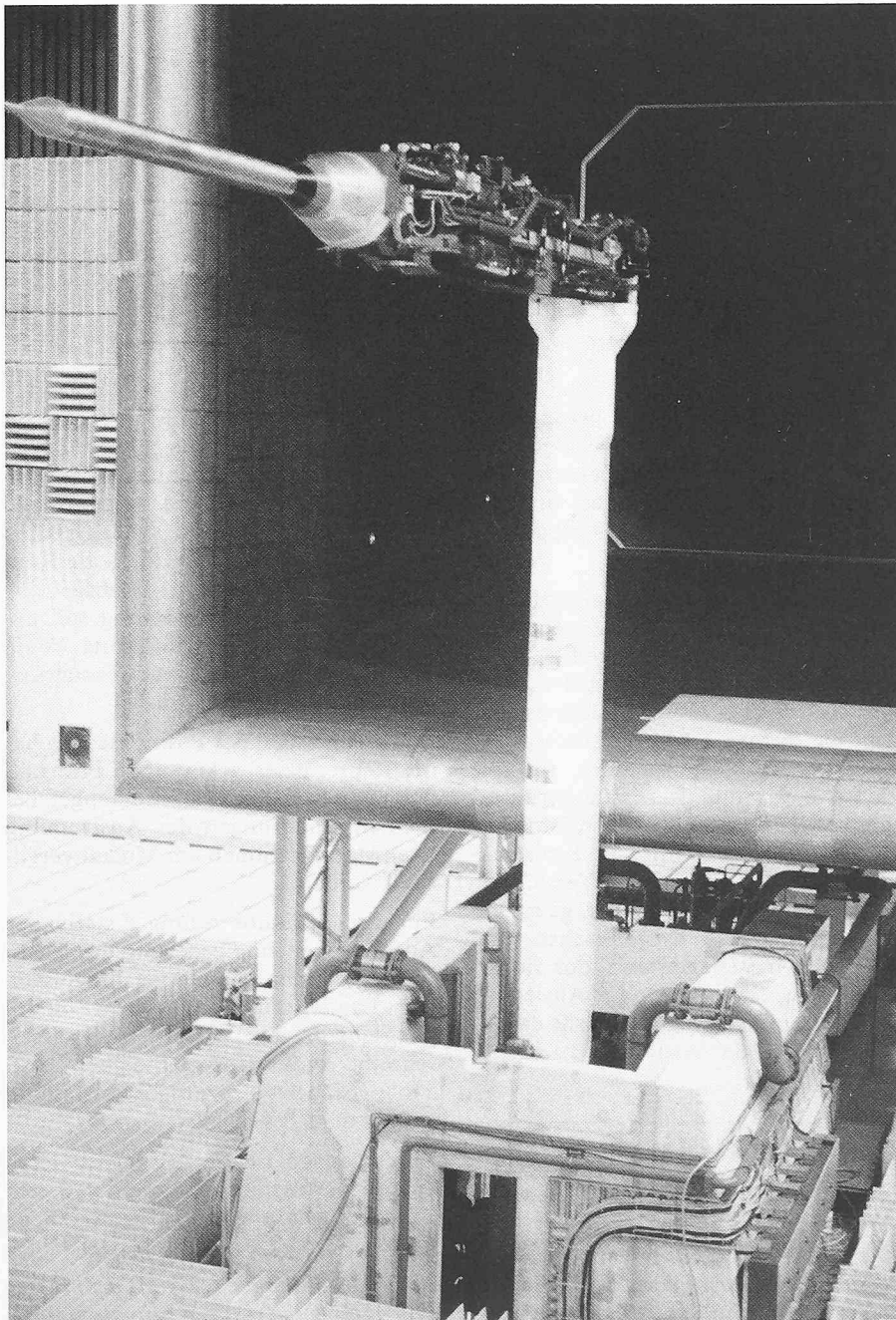
Geschwindigkeiten im «Special Use»

Verstellung Anstellwinkel α	max 40°/s
Verstellung Höhenlage Z (nach unten)	max. 5 m/s
bei einer max. Beschleunigung Z von	\pm 5 m/s ²

Im «Special Use» werden die Schiebewinkel β nicht verstellt, und die Genauigkeitsanforderungen sind gegenüber «Normal Use» etwas gelockert.

Wer die vorstehenden Anforderungen näher analysiert, könnte leicht zur Auffassung gelangen, hier habe krankhafter Perfektionismus in die Welt technischen Wunschdenkens geführt. Wenn auch nicht verschwiegen werden darf, dass Windkanalbauer oft einem Hauch dieser Krankheit erliegen, so müssen doch die Anforderungen im Zusammenhang mit der heutigen Messtechnik gesehen werden; nur so werden die extremen Zahlen verständlich. Es geht in einem modernen Windkanal nicht darum, zu untersuchen, ob ein Flugzeug fliegt. Diese Frage haben die Gebrüder Wright am 14. Dez. 1903 am Kill-Devil-Hügel beantwortet. Im Konkurrenzkampf um schnellere, ökonomischere und leisere Flugzeuge geht es heute um die Untersuchung von Detailmodifikationen. Verbesserung von Promillen im Widerstand können für die Konkurrenzfähigkeit eines Verkehrsflugzeugprojektes entscheidend sein. Die Messtechnik hat sich diesem harten Kampf anzupassen. Die reproduzierbare Genauigkeit aller Einstellgrößen muss deshalb mindestens um eine Zehnerpotenz grösser sein als die Auflösung der Modellmessung.

Bild 3. Die 30 t schwere Heckstielhalterung mit Torpedo und Schwert in der 16 m tiefen Aufnahmgrube



Geschichtlicher Abriss

In der Auslegung der gesamten Anlage war der Umstand erleichternd, dass für die konstruktive Gestaltung des *Torpedos* (Bild 3) eine äusserst fundierte Vorstudie des NLR zur Verfügung stand. Für das Konzept von *Schwert*, *Schwertführung* und die *Auslegung der Steuerung* mussten aber infolge der extrem hohen Anforderungen neue Wege gesucht werden. Gemeinsam mit dem

Hauptauftragnehmer sowie dem Auftraggeber DNW wurde schliesslich beschlossen, das vom Büro Isler vorgeschlagene Steuerungskonzept einer eingehenden Simulationsstudie zu unterziehen. Das hydraulische Institut der *Technischen Hochschule Aachen* hatte die anspruchsvolle Aufgabe übernommen, die servohydraulische Regelung in bezug auf die zu erwartende Genauigkeit und auf dynamisches Verhalten zu analysieren. Die Resultate waren aussagekräftig und gaben wichtige Hinweise für zusätzlich notwendige Sollwerteingaben und Rückführungen in die analogen Regelungskreise. Die Hoffnung, damit unverzüglich an die Realisierung herantreten zu können, zerschlug sich, da die hydraulische Firma, die für die gesamte Ausführung von Hydraulik- und Analogsteuerung hätte verantwortlich zeichnen sollen, aus personellen Gründen kapitulieren musste. Es galt nun, aus schweizerischen und deutschen Firmen ein Entwicklungs- und Fabrikationsteam zusammenzustellen.

Wenn es dann gelungen ist, in kurzer Zeit das Konzept zu definieren und zu entwickeln, dann ist es dem glücklichen Umstand zu verdanken, dass alle beteiligten Firmen Spitzenkräfte für diese Aufgabe zur Verfügung gestellt haben. Die Komplexität der gesamten Anlage liess es als ratsam erscheinen, in einer Werkerprobung bei von Roll, Bern, den Mechanismus aller Bewegungen wie auch die Steuerung zu erproben. Dabei wurden die Z-Bewegung in der Horizontalen, die übrigen Bewegungen auf einer provisorischen Halterung erprobt. Das fehlende, an den Z-Zylindern wirkende Gewicht wurde durch 80 bar Stickstoff ersetzt. Der nicht vorhandene Einfluss der Massenkräfte musste in Kauf genommen werden. Die Spezifikationen von Geschwindigkeit und Genauigkeit wurden erfüllt, was gute Voraussetzungen für eine kurze Inbetrieb- und Erprobungsphase beim DNW ergab. Ein Spezialistenteam vom *Aeroelastischen Institut der DFVLR Göttingen* führte schon in Bern erste Schwingungsversuche durch. Mitte Oktober 1979 fand der Transport nach Noordoostpolder statt, und drei Tage vor Weihnachten erhob sich die 30 Tonnen schwere Stinghalterung erstmals aus der 16 m tiefen Grube. Mitte Februar 1980 wurde der erste gesteuerte «Special Use» gefahren.

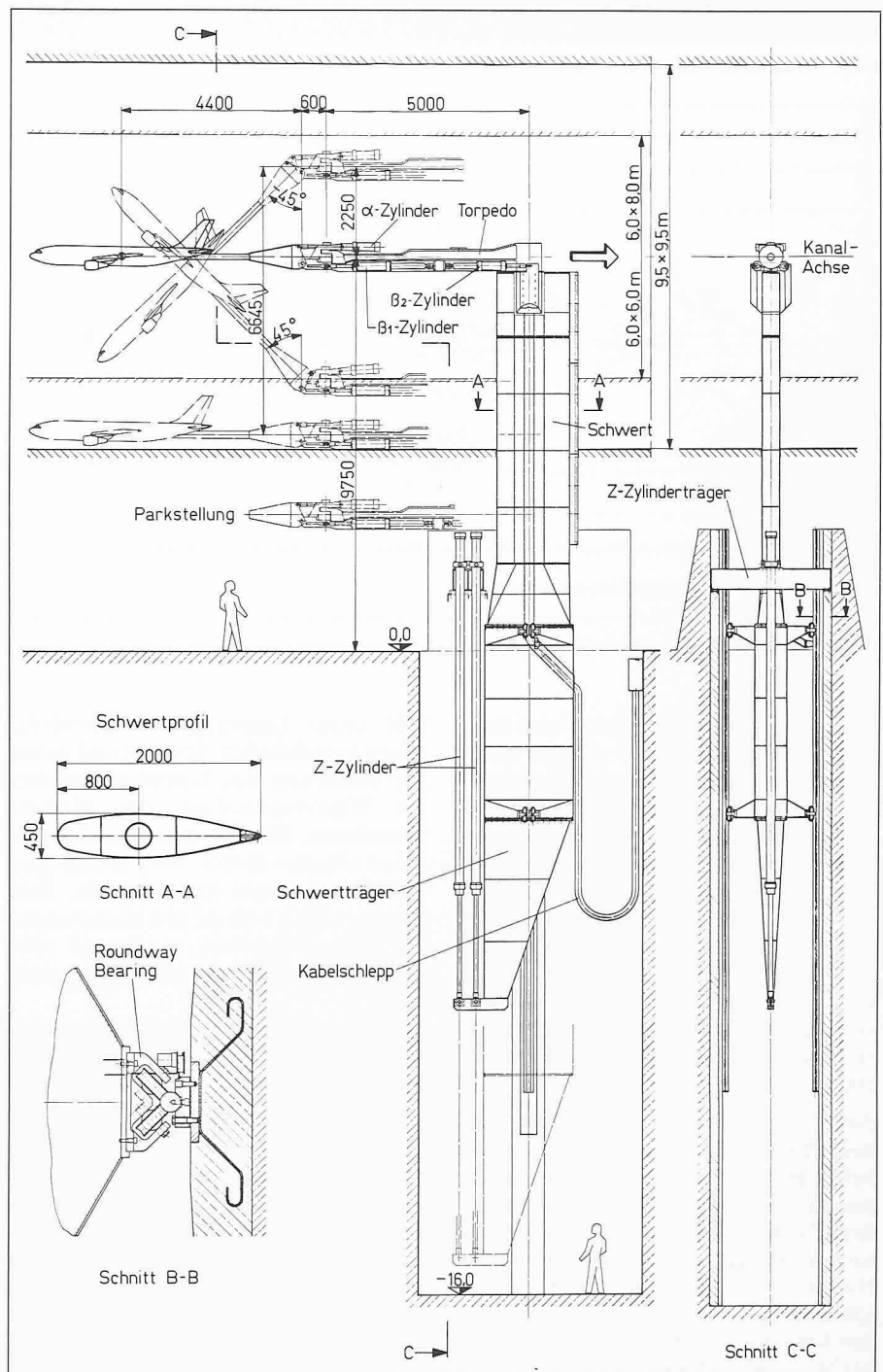
Im Rückblick darf festgehalten werden, wie schwierig sich die Koordination bei einer derart geographisch breiten Streuung des Projektierungsteams gestaltet. Der monatliche Zusammenzug der Verantwortlichen zum Gedankenaustausch und zur Formulierung der nächsten Zwischenziele war eine unabding-

bare Voraussetzung. Es war eine der Hauptaufgaben des Projektleiters, die Defintion der Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten ständig der neuesten Entwicklung anzupassen. Das Nutzen der heutigen Möglichkeiten von Rechensimulationen in der Entwurfsphase sowie der Trockenerprobung im Fabrikationswerk waren notwendige Etappen in der Projekt-Geschichte, denn es wäre nie gelungen, ein derartiges Projekt auf Anhieb zu optimieren.

Die technische Lösung

Bild 4 orientiert über den konstruktiven Aufbau der Heckstielhalterung.

Bild 4. Aufbau der Heckstielhalterung



Deutlich ersichtlich sind zwei charakteristische Baugruppen, namentlich die *senkrechten Strukturteile mit Schwert, Schwerträger* und *Z-Zylinder* und der *Verstellmechanismus von Schiebe- und Anstellwinkel*, das sog. *Torpedo*. Das letzte erhält aus aerodynamischen Gründen noch eine strömungsgerechte Verkleidung.

Die *Hauptlagerung des Schwerträgers*, und damit des ganzen Mechanismus, ist über sog. *Roundway-Bearings*, eine Art *Doppelpanzerrollen*, auf zwei 10 m langen Führungsstangen geführt. An diese Lagerstangen, die im Beton verankert sind, werden hohe Präzisionsanforderungen gestellt. Die Ist-Masse dürfen in der Vertikalen sowie auch in der Di-

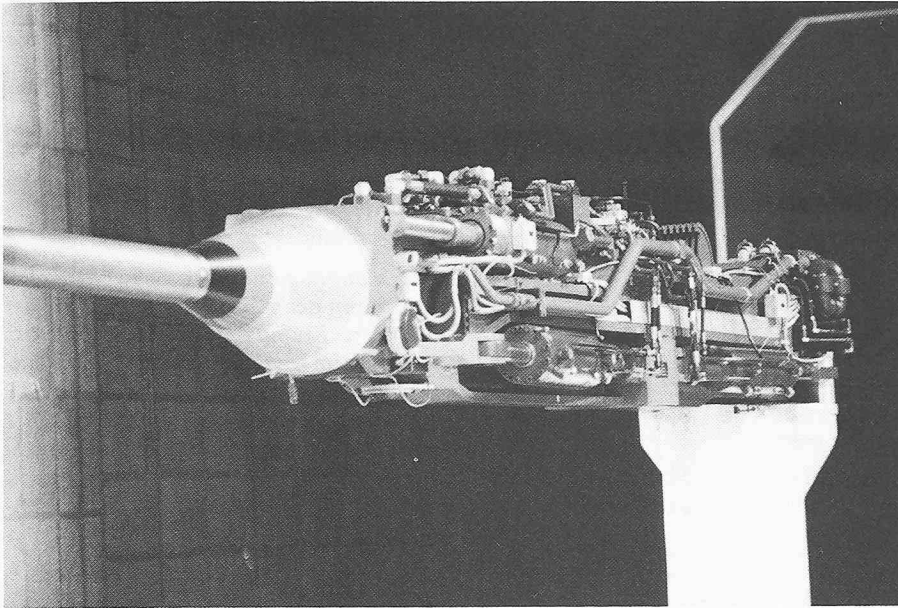


Bild 5. Torpedo mit den hydraulischen Steuerungs- und Verstellrichtungen

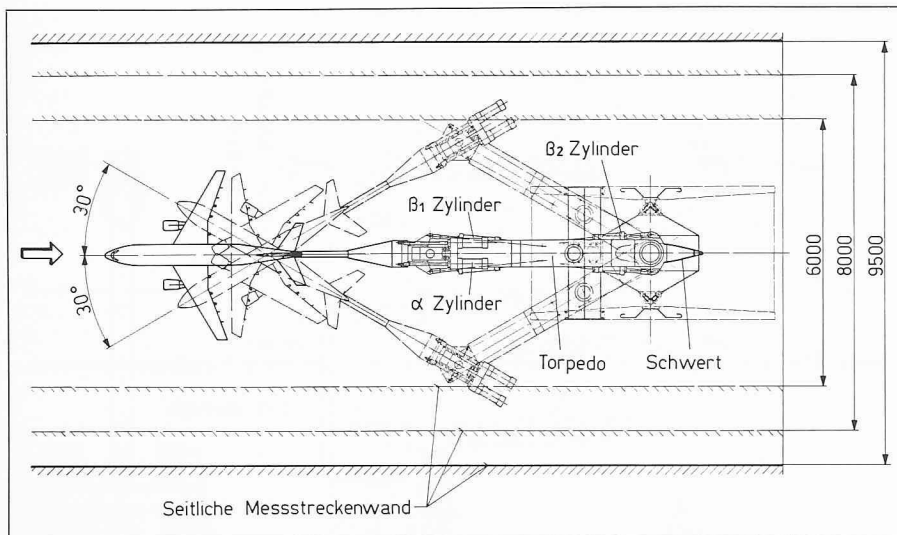


Bild 6. Torpedo. Schiebewinkelmechanismus

stanz zueinander nur 0,1 mm vom Sollmass abweichen. Fehler würden unzulässige Verschiebungen des Modellbezugspunktes ergeben. Die niederländische Spezialität einer negativen Meereshöhe hat beim Bau der 16 m tiefen Grube wohl bautechnischen Aufwand erfordert, für die Lagerung aber ist der Umstand des hohen Grundwasserspiegels und die damit verbundene gute Umspülung von besonderem Vorteil. Die kleinen Temperaturdifferenzen haben eine praktisch spielfreie Führung erlaubt.

Am Schwertträger sind die beiden Verstellzylinder für die Vertikalbewegung befestigt. Sie sind so dimensioniert, dass bei einem Ausfall des einen der andere Zylinder die Heckstielhalterung zu tragen vermag. Der Zu- und Abfluss des Hydrauliköls sowie sämtliche elektrischen Steuer- und Messleitungen werden über einen zentralen Kabelschlepp geführt. Der Schwertträger wird ober-

halb seiner Lagerung zum aerodynamisch ausgebildeten Schwert und damit zur Halterung des Torpedos, welches die Winkelverstellung des Modells übernimmt. Hier ist mechanische Präzision oberstes Gebot. Vom Hauptlager zwischen Schwert und Torpedo, über Lager α und β 2 bis zu den Halterungen der Zylinderantriebe wurde auf eine spielfreie Ausführung besonders geachtet.

Das Modell muss bis zu einem Schiebewinkel von 30° verstellbar sein. Diese Position wird, wie in Abbildung 6 dargestellt, durch ein Ausschwenken des Torpedos um zwei Achsen erreicht.

Durchgehende Kolbenstangen der β_1 - und β_2 -Zylinder verhindern Lagerquerkräfte und vereinfachen die Regelung. Besondere Aufmerksamkeit erfordert die Führung der zahlreichen Messkabel über alle Gelenke. Eine spezielle Vorrichtung gewährleistet deren konstante Spannung und präzise Halterung.

Die Auslegung der Hydraulikversorgung wurde einerseits durch das grosse kurzfristig anfallende Ölvolumen im «Special Use», andererseits durch die vertikale Verstellgeschwindigkeit beeinflusst. Die hohen Durchflussmengen verunmöglichen eine Filtrierung im Rücklauf. Um die extreme Reinheit für die Servoventile trotzdem zu erreichen, wurde ein separater Steuerkreislauf vom eigentlichen Arbeitskreislauf der Zylinderantriebe getrennt. Der letzte umfasst zwei Hydraulikpumpen von je 45 kW mit einem Fördervolumen von 90 Liter/Minute. Die Rückstellung des Heckstiels nach einer Polarenmessung über einen positiven Hub von 3 m in der vorgeschriebenen Zeit von 16 s erfordert jedoch eine noch wesentlich grössere Ölkapazität. Diese Aufgabe übernimmt eine Speicherstation mit einem Ölvolumen von 80 Litern und parallel geschalteter Stickstoffbatterie von 250 Litern.

Die Hydraulikstation liegt durchwegs tiefer als das Torpedo. Einem speziellen Versorgungssystem kommt deshalb die Aufgabe zu, die Hydraulik ständig unter einem Druck von 5 bar zu halten, um zu verhindern, dass Luft in Leitungen und Zylinder gelangt, was Störungen in der Servohydraulik verursachen würde.

Das Konzept wird bestimmt durch das Streben nach Genauigkeit. Der aerodynamisch bedingte, mechanische Aufbau mit den extremen freitragenden Abmessungen stellt höchste Anforderungen an die Stabilität und das Führungsverhalten des Regelsystems. Die unterste Schublade der Trickkiste des Regeltechnikers reichte knapp, um diesen Anforderungen zu genügen. Das Regelungskonzept für die Achsbewegungen wird im folgenden nur für die Z-Achse beschrieben; für die Winkelverstellung ist es weitgehend identisch.

Die Forderung nach hoher Geschwindigkeit der Z-Bewegung mit den grossen Öldurchflussmengen und die Positioniergenauigkeit auf einen Zehntausendstel des Weges verlangen ein aufwendiges Regelungssystem. In Bild 7 ist das «Normal Use»-Konzept schematisch dargestellt. Die Positionserfassung übernimmt ein Inkrementalweggeber mit einer Auflösung von 0,1 m für Z und $0,001^\circ$ für die Winkelbewegungen. Die neue Zielposition kann mit der gewünschten Geschwindigkeit und Beschleunigung entweder von Hand oder direkt durch den zentralen Computer vorgegeben werden. Diese Sollwertvorgabe wird mit dem von der Struktur zurückgemeldeten Ist-Wert (1) verglichen und diese variable Differenz digital/analog gewandelt (2). Über den Trennverstärker (3) gelangt dieser sog.

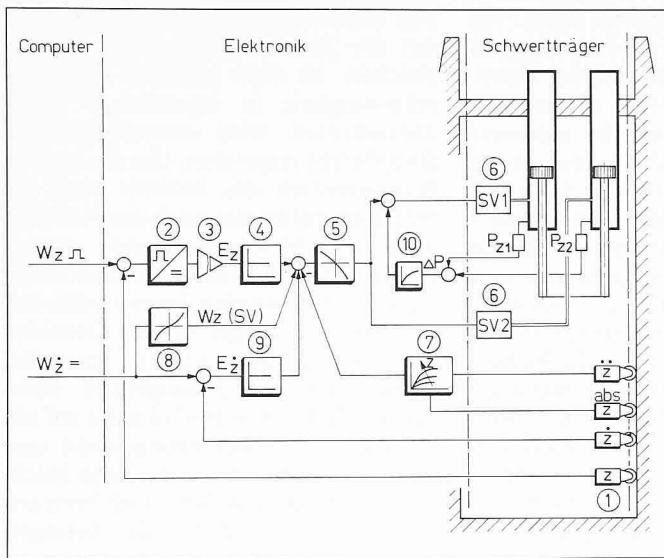


Bild 7. «Normal Use»-Regelungssystem

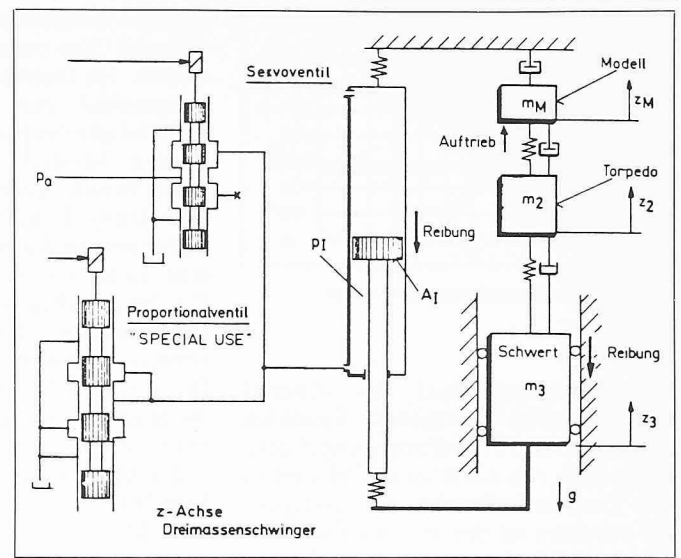


Bild 8. Prinzipschema des 3-Massen-Systems als Modell für die Rechnersimulation

Schleppfehler über den PID-Verstärker (4) und den Endverstärker (5) an die beiden Servoventile (6), welche die Ölzufuhr zu den Z-Zylindern steuern. Für die Vertikalbewegung stellt sich ein zusätzliches Problem. Abhängig von der Z-Position ändert sich die Öl-Steifigkeit und damit auch die Eigenfrequenz des gesamten vertikalen Bewegungssystems um einen Faktor 3. Dies ruft theoretisch nach einer höhenabhängigen Reglereinstellung. Mit einem Kompromiss konnte jedoch mit einer konstanten Positions- und Geschwindigkeitsverstärkung über den gesamten Hub die vorgeschriebene Genauigkeit erreicht werden. Um aber über den ganzen Höhenbereich auch eine genügende Dämpfung im Regelsystem zu erhalten, muss nach dem PID-Verstärker eine höhenabhängige Beschleunigungsrückführung (7) summiert werden. Nur so ist ein konstantes Führungsverhalten über den gesamten Hubbereich von 8 m erreichbar.

Ein geregelter Druckausgleich (10) zwischen den zwei hydraulisch gesteuerten Zylindern erwies sich aus zwei Gründen als notwendig. Es wird damit eine gleichmässige Lastverteilung erreicht, und zugleich ist der Verschlechterung des Auflösungsvermögens durch ungleiche Nulllage der Servoventile entgegengewirkt. Das eine Servoventil bekommt das Druckdifferenzproportionalnalsignal zugeführt und sorgt dafür, dass eine allfällig unterschiedliche Nulllage ausgeglichen wird. Diese Zusatzregelung ist bewusst langsam, ihr Einfluss absichtlich begrenzt, und sie stört deshalb den normalen Verlauf nicht.

Das vorerwähnte Regelsystem wurde zwecks Optimierung in der Entwurfsphase einer Rechnersimulation unterworfen und auf sein dynamisches Ver-

halten hin untersucht. Diese Analogrechnung wurde für alle vier Bewegungen durchgeführt. Bild 8 zeigt das Prinzipschema des 3-Massen-Systems für die Vertikalbewegung mit den elastischen und dämpfenden Zwischengliedern.

Diese ausgiebigen Simulationsrechnungen haben zwar quantitativ die maximal möglichen Verstärkungen überschätzt, andererseits aber wichtige Massnahmen zum Erreichen der geforderten Genauigkeit wie Verkleinerung des Schleppfehlers und Verbesserung des Regelverhaltens gegeben. Das letzte wurde durch Überlagerung eines Geschwindigkeitsregelkreises zur Sollwertvorgabe der Lagerregelung erreicht. Der zu verstärkende Wert ist der Geschwindigkeitsfehler, gebildet durch die Differenz des Tachogeneratorsignals und der vorgegebenen Sollgeschwindigkeit. Über einen P-Regler (9) verstärkt, wird es zur Lagerregelung addiert. Der Verringerung des Schleppfehlers dient eine geschwindigkeitsproportionale Ansteuerung der Servoventile. Dies ist eine Hilfssteuerung, welche die Ventile unabhängig vom PID-Regler annähernd richtig ansteuert. Erwünscht wäre, dass dieses Signal den Bewegungsablauf alleine bewältigt. Dies wird aber mit einem proportionalen Signal niemals gelingen, da die Charakteristik von Servoventilansteuerung zur Durchflussmenge nicht linear ist. Grosse Anstrengungen waren notwendig, das Signal mittels geeignetem Anpassverstärker (8) den Nichtlinearitäten des Servoventils anzupassen. Der Lagerreglerkeis hat mit dieser Massnahme nur noch die Aufgabe, den Heckstiel genau ins Ziel zu führen.

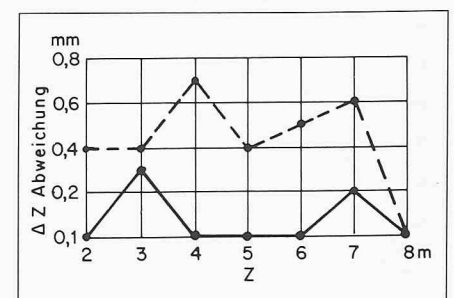
Es ist gelungen, für die Z-Bewegung die geforderten Genauigkeiten zu unterschreiten. Bild 9 zeigt, dass die Hystere-

se im Durchschnitt 0,5 mm ausmacht. Bei der vorliegenden Messung gelang es, den Heckstiel über den gesamten Hub von 8 m in Schritten von 1 m bis zu einem Fehler von 0,4 mm in die Ausgangslage zurückzuführen.

Für die Winkelverstellung sieht die Regelung annähernd identisch aus. Die Hauptelemente sind: Inkrementale Digitalwinkelerfassung, Errechnung der Soll/Ist-Differenz, Analogwandlung, PID-Verstärkung. Die Aufschaltung der Hilfssteuerung erfolgt in gleicher Weise. Auch hier wird dieses Signal an die nichtlineare Servoventil-Kennlinie durch einen separaten Verstärker angepasst. Für die Verbesserung der Dämpfung dient die Summierung einer Δ -Rückführung. Bei allen Winkelbewegungen konnte eine Genauigkeit von $\pm 0,015^\circ$ erreicht werden.

Eine Spezialität dieser Heckstielhalterung besonderer Art stellt wohl die *aktive Dämpfung der α -Achse* dar. Ausführliche Schwingungsuntersuchungen haben ergeben, dass die Eigendämpfung des Heckstiels bei bestimmten Frequenzen unzureichend ist. Durch eine negative Rückführung der Modellbeschleunigung wird aktiv in den Regelkreis der α -Achse eingegriffen und damit die Eigendämpfung des Stings erhöht.

Bild 9. Abweichungen infolge der Hysterese



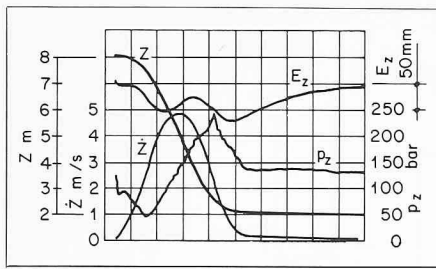
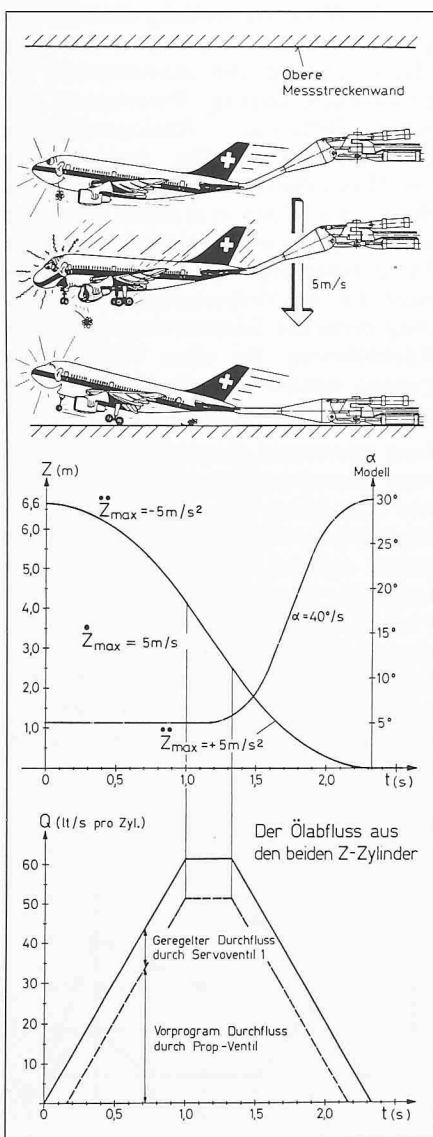


Bild 10. Bewegungsablauf «Special Use»

«Special Use»

Der Bewegungsablauf des «Special Use» ist in Bild 10 dargestellt. Synchron zur negativen Vertikalbewegung Z über einen Hub von 6,6 m ist das Modell in den Landeanstellwinkel zu verstellen. Zu beachten ist der enorme Ölabbfluss von total 120 Litern/s aus den beiden Z-Zylindern in den Tank. Zwei Proportionalventile, parallel zu den Servoventilen geschaltet, müssen diesen Durchfluss bewältigen. Die Verwendung beider Steuerkanten zum Tankabfluss verdoppelt ihre Kapazität. Die im «Normal Use» beschriebene Hilfssteuerung

Bild 11. Oszillogramm «Special Use» bei 5 m/s Maximalgeschwindigkeit



(Geschwindigkeitsvorgabe) wirkt im «Special Use» nur auf die Proportionalventile. Im Idealfall könnte der Bewegungsablauf nur durch dieses Geschwindigkeitssignal alleine gesteuert werden. Idealfall deshalb, weil auch diese Ventile keine lineare Ansteuercharakteristik aufweisen. Durch den nichtlinearen Anpassverstärker konnte eine Linearität von Steuersignal und Geschwindigkeit bis zu ± 5 Prozent erreicht werden. Die Korrektur dieses Fehlers übernimmt ein PID-Regler. Das von ihm zu verstärkende Signal ist die Summe aus dem im «Normal Use» behandelten Geschwindigkeitsfehler und einem für die Proportionalventile ausgelegten Korrektursignal. Eine weitere Massnahme für die Erreichung der Genauigkeit ist die 10-Prozent-Totzone der Proportionalventile. In diesem Bereich müssen die Servokreise die Ansteuerung der Zylinder allein übernehmen. Ihnen wird also die Aufgabe zugeteilt, den Heckstiel in den letzten 10 Prozent mit dem Lagerregelkreis wie im «Normal Use» ins Ziel zu führen. Um zu verhindern, dass sich zwischen den beiden Zylinder trotz Δp -Ausgleichsregler ein unzulässiger Druckunterschied aufbauen kann, werden sie automatisch bei einer bestimmten Geschwindigkeit hydraulisch verbunden.

Das Oszillogrammenbild in Bild 11 zeigt den «Special Use» mit der max. Geschwindigkeit von 5 m/s. Zu beachten ist, dass der Schleppfehler EZ über den ganzen Weg nie grösser wird als 70 mm! Im weiteren wurde demonstriert, dass die Reproduzierbarkeit dieses Schleppfehlers als direktes Kriterium für die Bewegung kleiner war als 6 mm!

Soll ein Flugzeugmodell im Wert von einer Million Mark an einer Heckstielhalterung von 30 Tonnen Gewicht mit einer Geschwindigkeit von 5 m/s durch die Messstrecke geführt werden, dann kommt der Sicherheit zentrale Bedeutung zu. Der Ablauf dieser Absicherung zerfällt in die Phasen frühzeitigen Erkennens der Gefahr, der Auswahl der geeigneten Gegenmassnahmen und der dosierten Bremsung der Bewegung. Die für die Sicherheit verantwortlichen Sensoren werden auf einem Blindschaltbild übersichtlich angezeigt und deren Signale einem fest programmierten, separaten System zugeführt. Dieses entscheidet selektiv über Gegenmassnahmen von der harmlosen Vorwarnung einer Filterverschmutzung bis zum höchsten Alarm bei Modellkollisionsgefahr mit der Messstreckenwand.

Besonders schwierig stellte sich das Sicherheitsproblem im «Special Use». Die Heckstielhalterung erhält in ihrer rasenden Abwärtsfahrt stufenweise Grenzwerte, die in den einzelnen Hö-

hen die momentane Geschwindigkeit mit der jeweils höchstzulässigen vergleichen. Ist diese erlaubte Höchstgeschwindigkeit in irgendeiner Phase überschritten, wird unverzüglich der Stoppbefehl eingeleitet. Um das interne Waagensystem des Modells nicht zu zerstören, bleibt nun noch das Problem, die kinetische Energie dosiert zu vernichten. Die sofort schliessenden Rückschlagventile werden hierzu während des Bremsvorganges mittels Druckbegrenzungsventilen vorerst zur Beschränkung der Verzögerung überbrückt. Zeitverzögert wird dann auf ein weiteres Druckbegrenzungsventil umgeschaltet, welches die gesamte Heckstielhalterung auch dann noch bremsen kann, wenn ein Z-Zylinder versagen sollte.

Ausblick im Windkanalbau

Die Luftfahrtforschung und Flugzeugentwicklung verlangt heute vermehrt exakte Messungen im mathematisch schlecht erfassbaren Unterschallbereich. Um eine Modellmessung möglichst genau in die Wirklichkeit übertragen zu können, muss die dimensionslose Reynoldszahl als massgebende Kennzahl möglichst gross sein. Erreicht wird dies durch folgende drei Möglichkeiten:

- Grosse Dimension der Versuchsanordnung (DNW),
- Erhöhung der Dichte des umströmenden Mediums durch Erhöhung des Druckes (Hochdruck-Kanal),
- Erniedrigung der Zähigkeit des umströmenden Mediums durch Absenken der Temperatur (Kryo-Kanal).

Alle drei Wege zur Erreichung hoher Reynoldszahlen werden zurzeit weiterverfolgt.

Im März 1981 wurde in der DFVLR Göttingen der erste 100-bar-Hochdruckkanal in Betrieb genommen und erschliesst damit der aerodynamischen und aeroelastischen Grundlagenforschung bei Reynoldszahlen bis zu $1,2 \cdot 10^7$ neue Möglichkeiten.

Im Absenken der Kreislaufemperatur des Windkanals sehen heute die Experten die beste Aussicht, noch aussagekräftigere Messresultate zu erhalten. Zurzeit wird in der DFVLR, wiederum unter schweizerischer Mitarbeit, ein bestehender Unterschallkanal für den Betrieb mit Tiefstemperaturen bis zu -200°C umgerüstet. Es sollen damit Erfahrungen für den geplanten europäischen transonischen Kryo-Windkanal gesammelt werden. An diesem Grossprojekt sind die Länder Deutschland, Frankreich, England und Holland beteiligt.

Der gute Abschluss des DNW-Projektes ist ein Beispiel einer erfolgreichen Zusammenarbeit zweier Länder, und die Erfahrungen daraus geben dem neuen europäischen Grossprojekt gute Startbedingungen. Diesem transnischen Kryo-Windkanal ist Erfolg zu wünschen, denn nur in der Gemeinschaft wird es der europäischen Luftfahrtindustrie auch künftig gelingen, in der Forschung und damit mit ihren Produkten an vorderster Front zu bleiben.

Adresse der Verfasser: R. und U. Isler, dipl. Ing. ETH, Ingenieurbüro Isler, Dahliastr. 16, 8034 Zürich.

An der Konstruktion des Simulators beteiligte Firmen

Turbo-Lufttechnik GmbH, Zweibrücken D
Konstruktion und Statik, Schwertführung, Schwertträger + Schwert

Moog GmbH, Böblingen D
Analoge Elektronik
Servoventile

Herion-Werke KG, Fellbach D
Hydraulik-Versorgung
Steuerblöcke

Herbert Hänchen KG, Stuttgart-Ruit D
Hydraulik-Zylinder

Elesta AG, Bad-Ragaz CH
Digitale Elektronik
Safe-Guarding-System

Epro AG, Zürich CH
Elektrik

Von Roll AG, Bern CH
Fabrikation des sog. Torpedos

Demag AG, Zweibrücken D
Fabrikation und Montage von Schwertträger und Schwert

Schertenleib, Zumikon/Zürich CH
Fabrikation der Präzisionsteile

Ingenieurbüro Farnier, Wald CH
Berechnung der mechanischen Grundwerte für die Simulation

Ingenieurbüro Isler, Zürich CH
Koordination des Teams
Konstruktion Torpedo
Entwicklung des Sicherheitssystems
Simulation und Montageleitung
Inbetriebnahme

Eine Anlage zum Pressen faseriger Wellplatten

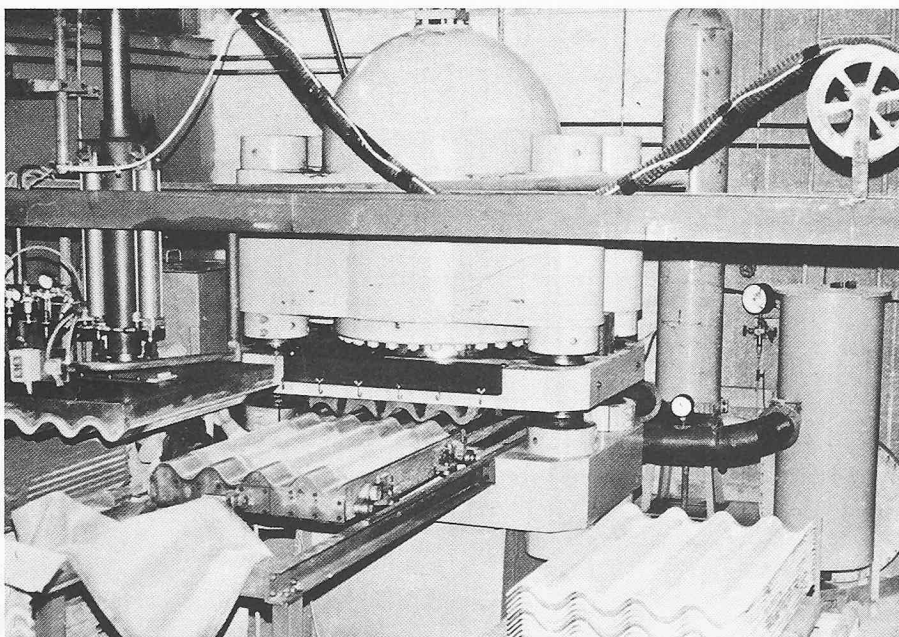
Das Konzept zum Pressen von Flachplatten im Stapel ist allgemein bekannt. Es ist jedoch nicht für gewellte Platten anwendbar. Deshalb hat sich Bell seit 1968 intensiv bemüht, ein Konzept zu entwickeln, das die Herstellung gepresster Wellplatten ermöglicht. Die mit der Bell-Pressen gefertigten Wellplatten zeichnen sich durch Frostbeständigkeit, hohe Festigkeit, Dauerhaftigkeit und Witterungsbeständigkeit aus. Das neue Verfahren verbessert zudem die Armierungsfähigkeit der Fasern und gestattet deshalb auch die Verwendung kürzerer und folglich billigerer Fasern. Wird Asbest durch andere Fasern ersetzt, so kann das Pressen zur Erlangung einer genügenden Witterungsbeständigkeit sogar unumgänglich werden.

Entwicklungsgeschichte

Wellplatten aus *Asbestzement* haben sich seit über 45 Jahren für Fassaden- und Bedachungsmaterial bewährt. Die beschränkte Frostbeständigkeit setzte

ihrer Anwendung jedoch Grenzen. Gefärbte Wellplatten konnten beispielsweise in der Schweiz nur auf Höhen bis 800 m ü. M. verlegt werden. Gepresster Dachschiefer hingegen (ebenfalls aus Asbestzement hergestellt) wird in jeder Höhenlage angewendet.

Versuchspresse aus dem Jahr 1968. Die max. Presskraft beträgt 800 Mp. Die Dimension der Probeplatten misst im Maximum 970×1100 mm, und der spezifische Pressdruck beträgt je nach Format der Platten bis 3000 N/cm²



Von der Firma Bell in Kriens bei Luzern ist im Jahre 1968 eine Pilotpresse gebaut worden mit dem Ziel, die notwendigen Parameter für eine Industrie-Wellplattenpresse zu ermitteln. Zwei Jahre später wurden die ersten Versuche in einem Asbestzementwerk durchgeführt. 1973/1974 wird eine weitere Testserie abgeschlossen und dabei die Parameter für den Bau einer Industrie-Anlage festgelegt. Gemäss den Versuchen ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens gewährleistet, ausserdem erweist sich die Plattenqualität als vielversprechend. Im Jahre 1975 wird eine Anlage zur industriellen Produktion gepresster Wellplatten fertigerstellt. Erreichte Taktzeit: 14 Sekunden für eine Plattenlänge von 2,5 m. Im laufenden Jahr wird eine zweite Anlage gebaut und geliefert. Länge der Wellplatten: 4,5 m. Diese Presse wird im folgenden beschrieben. In ihr sind alle Verbesserungen und Erfahrungen aus der ersten Anlage mitberücksichtigt.

Beschreibung der Anlage

Der technisch wichtigste Bestandteil der Presse ist die *untere Pressform*. Sie ist so gestaltet, dass das ausgepresste Wasser weggeführt und nach der Aufhebung des Pressdruckes ein Rücksaugen des ausgepressten Wassers in die Platte möglichst verhindert wird. Für den Wegtransport des ausgepressten Wassers wird Luft verwendet, die mit hoher Geschwindigkeit in einem geschlossenen Kreislauf zirkuliert. Das Wasser wird in einem Wasserabscheider ausgeschieden.

Das Gegenstück der unteren Pressform bildet die glatte, obere Pressform. Um zu verhindern, dass die feuchte Asbestzementplatte nach dem Pressvorgang