

Hans-Ulrich Meier (Hrsg.)

Die Pfeiflügelentwicklung in Deutschland bis 1945

Die Geschichte einer Entdeckung bis zu ihren
ersten Anwendungen

Mit Beiträgen von
Burghard Ciesla, Hans Försching, Hans Galleithner,
Werner Heinzerling, Bernd Krag, Helmut Schubert



Bernard & Graefe Verlag

Inhalt

Geleitwort	5	AVA (Kanal I und IV), der LFA (Kanal A1), DVL (2,5-m-Kanal)	61
Vorwort	6		
Danksagung	10	2.1.2 Hochgeschwindigkeitswindkanäle	61
1 Historischer Rückblick zur Entwicklung der Hochgeschwindigkeitsaerodynamik	11	– Der 11 cm x 13 cm-Hochgeschwindigkeits- windkanal der Aerodynamischen Versuchs- anstalt (AVA), Göttingen	61
Hans-Ulrich Meier		– Der 21,5 cm-Ø-Windkanal für hohen Unterschall der Aerodynamischen Versuchs- anstalt (AVA), Göttingen	63
1.1 Grundlagenentwicklung in der Hochgeschwindig- keitsaerodynamik bis Ludwig Prandtl	11	– Der 25 cm x 25 cm-Hochgeschwindigkeits- windkanal der Aerodynamischen Versuchs- anstalt (AVA), Göttingen	64
1.2 Ludwig Prandtls Mitarbeiter in Göttingen	12	– Der Hochgeschwindigkeitswindkanal der AVA mit Dampfstrahlantrieb, 0,765 m Ø	65
1.3 Der 5. VOLTA-Kongress 1935 in Rom, ein Durchbruch in der Hochgeschwindig- keitsaerodynamik	16	– Der Hochgeschwindigkeitswindkanal (2,7 m Ø) der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) Berlin	66
Anhang A: Luftfahrtforschung Bd. 12, Nr. 6/1935, S. 210	33	– Der Hochgeschwindigkeitswindkanal A 2 (2,8 m Ø) der Luftfahrtforschungsanstalt (LFA) Braunschweig	70
Anhang B: Eingeladene Teilnehmer des 5. VOLTA-Kongresses	36	– Die Hochgeschwindigkeitswindkanäle A 6 und A 7 der Luftfahrtforschungsanstalt (LFA) Braunschweig	72
1.4 Der experimentelle Nachweis der Busemann- schen Pfeilflügeltheorie durch Hubert Ludwieg in der AVA, Göttingen	37	– Hochgeschwindigkeitswindkanäle A 9a und A 9b der Luftfahrtforschungsanstalt (LFA) Braunschweig	75
Literatur	48	– Der Peenemünder 40 cm x 40 cm-Über- schallkanal	77
2 Der Hochgeschwindigkeitsflug und seine aero- und gasdynamischen Herausforderungen	49	2.1.3 Beispiele projektierter Versuchsanlagen, die nicht mehr zum Einsatz kamen	81
Hans-Ulrich Meier		– Der große turbulenzarme Kanal der Aero- dynamischen Versuchsanstalt (AVA), Göttingen	81
Vorbemerkungen	49	– Magnetische Schwebeführung für Flugmessbahnen	81
2.1 Versuchsanlagen für die experimentelle Untersuchung von Hochgeschwindigkeits- flugzeugen	49	– Der Hochgeschwindigkeitswindkanal (3 m Ø) der Luftfahrtforschungsanstalt München (LFM)	83
Anmerkungen zu den politischen Rand- bedingungen	49		
2.1.1 Niedergeschwindigkeitswindkanäle	57		
– Der 5 m x 7 m-Windkanal der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL), Berlin	58		
– Der 8-m-Windkanal A 3 der Luftfahrt- forschungsanstalt (LFA), Braunschweig	60		
– Die kleinen Unterschallwindkanäle der			

– Der Hochgeschwindigkeitswindkanal (8 m Ø) der Luftfahrtforschungsanstalt München (LFM) in Ötztal	85	2.2.3 Realisierung des Pfeilflügelkonzeptes	126
2.1.4 Windkanalkorrekturen bei dreidimensionalen Modellen	87	– Konfigurationsstudien im Niedergeschwindigkeitsbereich	126
– Einfluss der Windkanalturbulenz auf die Messergebnisse in Niedergeschwindigkeitswindkanälen	87	– Berechnungsverfahren für die Ermittlung der Auftriebsverteilungen an Pfeilflügeln	128
– Windkanalwandkorrekturen bei kompressibler Strömung	89	– Überprüfung der Konfigurationsstudien von Pfeilflügeln bei großen <i>Reynolds</i> -Zahlen	129
2.1.5 Kondensationseffekte in Hochgeschwindigkeitswindkanälen	94	– Untersuchungen zur Längsstabilität	131
2.1.6 Schlussfolgerungen	96	– Druckverteilungsmessungen am Pfeilflügel im Kanal VI der AVA	131
2.2 Fortschritte in der Entwurfsaerodynamik	96	– Der schiebende Pfeilflügel	134
2.2.1 Organisation der Forschung und Stand des Wissens zum Kriegsbeginn 1939	96	– Flügel-Rumpf-Anordnungen	136
2.2.2 Hochgeschwindigkeitsprofile	99	– Auftriebshilfen für den Pfeilflügel	140
– Einfluss des Profildickenverhältnisses	100	– Der Einsatz von »Krüger-Klappen« bei Verkehrsflugzeugen nach 1945	144
– Berechnung von Hochgeschwindigkeitsprofilen nach <i>K. H. Kawalki</i>	105	– Konfigurationsuntersuchungen an Pfeilflügeln bei hohen Unterschallgeschwindigkeiten	147
– Einspruch (1984) gegen US-Patentschrift NASA über »superkritische Profile«, basierend auf den Berechnungsmethoden von <i>K. H. Kawalki</i> (1940)	107	– Untersuchungen an einem Pfeilflügel in den Hochgeschwindigkeitswindkanälen der DVL (2,7 m Ø) und der LFA (2,8 m Ø)	150
– Weitere Beispiele von Profiluntersuchungen anlässlich der LGL-Tagung 1940 in Göttingen	108	– Flügel kleiner Streckung	156
– Vergleich von Hochgeschwindigkeitsmessungen von <i>B. Göthert</i> , DVL Berlin-Adlershof	111	– Der Grenzschichtzaun, eine Barriere gegen den Abreißvorgang	158
– Entwicklung besonderer Profile zur Erreichung hoher kritischer <i>Machscher</i> Zahlen in der DVL	114	– Untersuchung von Rotationskörpern und Rümpfen	161
– Verbesserung der Profileigenschaften im überkritischen Gebiet durch besondere Formgebung und Grenzschichtbeeinflussung	117	2.2.4 Die transsonische Querschnittsflächenregel, ein übergeordnetes aerodynamisches Entwurfsprinzip (Werner Heinzerling)	166
– Laminarprofile	119	– Einführung	166
– Grenzschichtbeeinflussung zur Verringerung des Profilwiderstandes	120	– Das Konzept der Flächenregel	167
– Lande- und Starthilfen im vorderen und hinteren Bereich von Hochgeschwindigkeitsprofilen	121	– <i>Otto Frenzl</i> entdeckt 1943 die transsonische Flächenregel	168
– Einfluss von Oberflächenrauigkeiten auf den Profilwiderstand	124	– Das deutsche Junkers-Patent für die transsonische Flächenregel von <i>Otto Frenzl</i> aus dem Jahr 1944	170
		– Die praktische Anwendung der Flächenregel in den 1940er Jahren	172
		– Der Aerodynamiker <i>Otto Frenzl</i>	177
		– Die zweite Entdeckung der Flächenregel in den USA	180

- Die Flächenregel für Überschallgeschwindigkeit	184	4 Aeroelastische Probleme in kompressibler Unterschall- und transsonischer Strömung	233
- Flächenregel und Pfeilflügel	185	Hans Försting	
- Zusammenfassende Anmerkungen zur Flächenregel	190	4.1 <i>Einleitende Bemerkungen</i>	233
2.2.5 Untersuchungen an Luftschrauben mit pfeilförmig gekrümmten Blattachsen	190	4.2 <i>Konstruktionsmerkmale und elastomechanisches Verhalten von Pfeilflügeln</i>	234
Literatur	193	4.2.1 Pfeilflügel großer Streckung	234
3 Entwicklung der deutschen Turbostrahltriebwerke zur Serienreife	198	4.2.2 Gepfeilte Auftriebsflächen kleiner Streckung	236
Helmut Schubert		4.3 <i>Einfluss der Flügelpfeilung auf das statische aeroelastische Verhalten</i>	237
3.1 <i>Luftschraube und Kolbenflugmotor erreichen ihre Leistungsgrenze</i>	198	4.3.1 Tragflügel-torsionsdivergenz	237
3.2 <i>Überlegungen und Erprobungen neuer Antriebskonzepte</i>	200	4.3.2 Ruderwirksamkeit	239
3.2.1 Raketentriebwerke als Flugzeugantrieb	200	4.3.3 Stationäre Auftriebsverteilung am elastischen Pfeilflügel	241
3.2.2 Flugantriebe mit intermittierender Verbrennung	203	4.3.4 Analytische Untersuchungen	242
3.2.3 Evolution des Staustrahltriebwerks	203	4.4 <i>Einfluss der Kompressibilität und der Flügelpfeilung auf das dynamische aeroelastische Verhalten</i>	242
3.2.4 Das Motor-Luftstrahltriebwerk	203	4.4.1 Vorabbemerkungen	242
3.3 <i>Die Technologie für das Turboflugtriebwerk wird gebündelt</i>	207	4.4.2 Eigenschwingungsparameter und schwingungs-induzierte instationäre Luftkräfte	243
3.4 <i>Die ersten TL-Triebwerke werden gebaut und erprobt</i>	209	4.4.3 Flatterstabilität in kompressibler Unterschallströmung	246
3.4.1 <i>Hans von Ohain</i> bei der Firma E. Heinkel	209	4.4.4 Flattermodelluntersuchungen	247
3.4.2 Das Team um <i>Herbert Wagner</i> entwickelt Turboflugtriebwerke bei Junkers in Magdeburg	213	4.4.5 Flatterstabilität des Pfeilflügels in subsonischer und supersonischer Strömung	250
3.4.3 <i>Hellmut Weinrich</i> beginnt seine TL-Entwicklungen mit einer Schiffsgasturbine	214	4.4.6 Dynamisches aeroelastisches Verhalten in transsonischer Strömung	254
3.4.4 BMW und BRAMO nutzen ihre Turbolader-Erfahrungen für das BMW 109-003	215	4.5 <i>Abschließende Bemerkungen</i>	259
3.4.5 <i>Anselm Franz</i> bringt das Jumo 004 am schnellsten zur Serienreife	219	Literatur	260
3.4.6 Daimler-Benz entwickelt ein Zweistromtriebwerk	222	5 Effekte hoher Machscher Zahlen bei Hochgeschwindigkeitsflugzeugen	261
3.5 <i>Die Errichtung geeigneter Großprüfanlagen für Turbotriebwerke</i>	224	Hans Galleithner	
3.6 <i>Einbauuntersuchungen mit Turboflugtriebwerken</i>	227	5.1 <i>Einleitung, Problematik</i>	261
3.7 <i>Erprobung der TL-Triebwerke bei der E-Stelle Rechlin</i>	228	5.1.1 Aerodynamische Forschung	261
3.8 <i>Stand der Technik zu Kriegsende 1945</i>	230	5.1.2 Macheffekte	262
Literatur	231	5.1.3 Pitot-statische Anlage	263
		5.1.4 Kritische Machsche Zahl	266
		5.1.5 Projekte	268
		5.2 <i>Propellerflugzeuge</i>	269
		5.2.1 Deutschland	270
		5.2.2 Großbritannien	273
		5.2.3 Vereinigte Staaten von Amerika (USA)	275

5.3	<i>Strahlflugzeuge</i>	276	7.4	<i>Flakrakete »Wasserfall« der HVA Peenemünde</i>	393
5.3.1	Deutschland	276		Literatur	408
5.3.2	Großbritannien	287			
5.3.3	Vereinigte Staaten von Amerika (USA)	289			
5.4	<i>Raketenflugzeuge</i>	293	8	Der Transfer der deutschen Hochgeschwindigkeitsaerodynamik nach 1945: USA, Sowjetunion und andere Staaten	411
	<i>Technischer Anhang</i>	295		Burghard Ciesla/Bernd Krag	
	Anhang 1: Definitionen der kritischen Machschen Zahl	295	8.1	<i>Einleitung</i>	411
	Anhang 2: Bauvorschriften für Flugzeuge (BVF)	296	8.2	<i>Grundlinien des Wissenschaftler- und Technologietransfers nach 1945</i>	411
	Anhang 3: Fahrt- und Geschwindigkeitsmessung	298	8.3	<i>Die Hochgeschwindigkeitsaerodynamik in den USA</i>	416
	Anhang 4: Profilbezeichnungen	299	8.3.1	Die amerikanische Luftfahrtforschung vor 1945	416
	Literatur	301	8.3.2	Aufklärungsmissionen, eine Waffenschau und das »Projekt Paperclip«	419
			8.3.3	Der Ausbau der Forschungsstrukturen	423
6	Erfahrungen bei der Entwicklung und Erprobung der ersten Strahlflugzeuge mit Pfeilflügeln	303	8.4	<i>Amerikanische Fallbeispiele</i>	424
	Bernd Krag		8.4.1	Die XP-47 von Boeing	424
6.1	<i>Einleitung</i>	303	8.4.2	North American Aviation XP-86	433
6.2	<i>Strahlflugzeuge von Messerschmitt</i>	304	8.5	<i>Die Hochgeschwindigkeitsaerodynamik in der UdSSR</i>	439
6.2.1	Messerschmitt Me 262	304	8.5.1	Die sowjetische Luftfahrtforschung vor 1945	439
6.2.2	Das Experimentalflugzeug Messerschmitt P 1101	309	8.5.2	Der sowjetische Technologietransfer (1945/46)	441
6.2.3	Messerschmitt Me 163, erstes Einsatzraketenflugzeug	315	8.5.3	Wirkungen des Technologietransfers	442
6.3	<i>Strahlbomber Junkers Ju 287</i>	325	8.5.4	Die deutsche Flugzeug- und Triebwerksentwicklung in der Sowjetunion	444
6.4	<i>Nurflügelflugzeug Horten Ho IX</i>	333	8.6	<i>Einflüsse deutscher Luftfahrtforschung in anderen Ländern</i>	446
6.5	<i>Forschungsflugzeug DFS 346</i>	337	8.6.1	In den ersten Nachkriegsjahren	446
6.6	<i>Deltaflugzeuge von Alexander Lippisch</i>	341	8.6.2	Die Entwicklung in Großbritannien	450
6.6.1	Deltaflugzeug Lippisch P 13 und der Gleiter DM-1	347	8.6.3	Die Entwicklung in Frankreich	451
6.6.2	Deltaflugzeug Lippisch P 11 Delta VI	355		<i>Technischer Anhang:</i>	
6.7	<i>Schnellaufklärer Arado Ar 234 mit Pfeilflügeln</i>	362		Flugmechanische Probleme des Pfeilflügels	451
	Literatur	364		Literatur	455
7	Besonderheiten bei Flugabwehrraketen: Pfeilflügel oder Flügel mit kleiner Streckung	367	Anhang		
	Bernd Krag			Abkürzungsverzeichnis	458
7.1	<i>Einleitung</i>	367		Namensregister	460
7.2	<i>Die Flakraketen »Feuertilie« F-25 und F-55 der LFA Braunschweig</i>	371		Sachregister	463
7.3	<i>Flakraketenentwicklungen der Industrie</i>	377	Die Autoren		
7.3.1	Rheinmetall-Borsig »Rheintochter«	377		Kurzlebensläufe	472
7.3.2	Henschel Hs 117 »Schmetterling«	382			
7.3.3	Flakrakete Messerschmitt »Enzian«	389			