

**Windkanaluntersuchungen an drei Blattspitzen
für Windturbinen mit horizontaler Achse**

D. Althaus und W. Würz

November 1994

Windkanaluntersuchungen an drei Blattspitzen für Windturbinen mit horizontaler Achse

D.Althaus und W.Würz

Im Rahmen des Projekts JOUR-CT90-0111 wird am Institut für Computeranwendungen (ICA) der Einfluß von Blattspitzen auf die Lärmemission und den Wirkungsgrad von Windturbinen mit horizontaler Achse untersucht.

Für die Untersuchungen im Laminarwindkanal des Instituts für Aerodynamik und Gasdynamik wurden vom ICA drei Blattspitzen mit 1.2 m Spannweite und einer Profiltiefe von $t=0.2$ m zur Verfügung gestellt. Die Modelle mit dem Profil FX 79-W-151 A sind in GFK-Bauweise hergestellt und wurden als Halbmodelle an der Windkanalwaage aufgehängt. Die Konturen der Blattspitzen mit den Bezeichnungen "Standard", "Shark" und "Ogee" und die Kontur des Profils FX 79-W-151 A sind in der Abbildung 1 dargestellt.

Die Reynoldszahlen beziehungsweise Kanalgeschwindigkeiten betragen:

Re	V [m/s]
$0.4 \cdot 10^6$	32
$0.5 \cdot 10^6$	40

Polarenmessungen mit der Windkanalwaage:

In den Diagrammen 1 bis 8 sind die mit der Waage gemessenen $c_a(c_w)$ und $c_a(\alpha)$ -Polaren dargestellt. Die Beiwerte sind auf die jeweilige Flügelfläche bezogen.

	F [m ²]	ΔF %
Standard	0.2368	0 %
Ogee	0.2206	-6.8%
Shark	0.2377	+0.4%

Dies muß beim Vergleich berücksichtigt werden.

Es wurden keine Windkanalkorrekturen vorgenommen. Die Polaren können daher nur zum Vergleich untereinander dienen. Die angegebene Streckung gilt für das Halbmodell ohne Spiegelung. Der Einfluß der Reynoldszahl bei glatter Oberfläche ist aus den Diagrammen 1, 3 und 6 ersichtlich. Bei der Vermessung der

Schallemission im Oldenburger Windkanal wurden an den Modellen Zick-Zack-Bänder bei 33% der Profiltiefe an der Profi_lober und -unterseite verwendet. Entsprechend wurden bei den hier durchgeführten Versuchen Noppenbänder als Turbulatoren angebracht. Die Vergleiche mit den glatten Oberflächen in den Diagrammen 2, 4 und 8 zeigen eine deutliche Widerstandserhöhung durch diese relativ weit stromauf liegenden Störungen. Das Diagramm 5 zeigt am Ogee-Randbogen einen Vergleich mit Noppen nur an der Unterseite bei 85% der Profiltiefe, wie sie bei der 2-d-Messung zur Beseitigung des Pfeiftons verwendet wurden. In diesem Fall ist wegen der Beseitigung der laminaren Ablöseblase der Profilwiderstand kleiner als beim glatten Profil. Im Diagramm 8 sind die Ergebnisse für alle drei Randbögen mit glatter Oberfläche zum Vergleich aufgetragen.

In den Diagrammen 9 bis 16 sind die aus den Diagrammen 1 bis 8 ermittelten Gleitzahlen und Steigzahlen aufgetragen. Im Hinblick auf die Anwendung bei Windturbinen sind diese Diagramme aussagekräftiger.

Messung der Geschwindigkeitsvektoren mit der 5-Lochsonde:

Mit einer 5-Lochsonde wurden Richtungsmessungen im Abstand $0.5 \cdot t$ hinter der Flügelhinterkante durchgeführt. (Beim Shark-Randbogen war die Messebene dann $0.25 \cdot t$ hinter der Spitze). Auf den Diagrammen 17 bis 19 sind die Geschwindigkeiten in der y-z-Ebene nach Größe und Richtung eingezeichnet. Zur Verdeutlichung sind die Flügelgrundrisse mit eingezeichnet. Dabei ist anzumerken, daß die Flügel mit der Profilunterseite nach oben (zu positivem z hin) eingebaut waren. Alle Messungen erfolgten beim Anstellwinkel $\alpha = 8^\circ$ und $Re = 0.4 \cdot 10^6$. Die y-Achse entspricht der Modellachse bei $x/t = 0.315$. Die Lage des Wirbelkerns ist in den Diagrammen eingezeichnet:

	dz [mm]	dy [mm] (ab Blattspitze)
Standard	-14	-37
Shark	-3.5	-17.5
Ogee	-17.5	-35

Beim Standard und beim Ogee-Randbogen ist die Wirbellage in Spannweitenrichtung gleich, beim Shark-Randbogen liegt der Wirbel um $dy/2$ weiter außen, bezüglich der Flügeloberseite liegt er höher.

Anstrichbilder:

An allen drei Flügelspitzen wurden beim Anstellwinkel $\alpha=8^\circ$ und $Re=0.5 \cdot 10^6$ Petroleum-Russ Anstriche durchgeführt. Die Abbildung 2 zeigt die Flügeloberseiten (Anströmung von rechts), auf der Abbildung 3 sind die Flügelunterseiten (Anströmung von links) zu sehen. Die Streifen in Spannweitenrichtung bei $x/t=0.35$ sind Spuren des Klebefilms der jetzt abgezogenen Noppenbänder, die als Turbulator verwendet worden waren. Beim Ogee-Randbogen ist an der Unterseite noch die Spur bei $x/t=0.85$ sichtbar. Auf allen Flügelspitzen ist auf der Profiloberseite zwischen 31% und 43 % eine laminare Ablöseblase sichtbar, die in Richtung Flügelspitze etwa der maximalen örtlichen Profildicke folgt. Auf der Standard-Spitze sind die Wandstromlinien stromab der Blase in Richtung Flügelwurzel (nach innen) gerichtet. Auf der zurückgebogenen Nase der Shark-Spitze sind die Stromlinien nach innen, stromab der Blase nach außen gerichtet. Bei der Ogee-Spitze laufen die Wandstromlinien stromab der Blase beinahe unter 45 Grad nach innen. An der Hinterkante sind nach innen gerichtete Stromlinien zu sehen, die eine Umströmung der Hinterkante andeuten. Sie biegen dann in eine zur Hinterkante parallele Richtung um.

Auf den Unterseiten der Flügelspitzen (Abb. 3) sind die Wandstromlinien bei allen Konfigurationen nach außen gerichtet.

Schallemission eines 2d-Modells:

Bei Polarenmessungen an einem zweidimensionalen Profilmodell, welches in derselben Negativform hergestellt wurde, trat im Anstellwinkelbereich zwischen 1.5° und 3.8° ($c_a=0.4$ bis 0.7) ein starker Pfeifton auf, der seinen Ursprung an der Hinterkante der Profilunterseite hatte. Als Ursache dafür wurde eine laminare Ablöseblase zwischen 85% und 95% der Profiltiefe ermittelt. Nach Beseitigung dieser Ablöseblase durch einen Turbulator (Noppen) bei 85% war auch der Pfeifton weg.

Schallmessungen an den Halbmodellen mit verschiedenen Blattspitzen:

Durch Schallmessungen mit einem Miniaturmikrofon und anschließender Frequenzanalyse des Signals sollte der am 2d-Modell beobachtete Sachverhalt genauer untersucht werden. Gleichzeitig sollte der Einfluß der unterschiedlichen Randbogenformen auf das abgestrahlte Schallspektrum untersucht werden. Aufgrund des begrenzten zeitlichen Rahmens konnte nur eine provisorische Messung durchgeführt werden.

Schallmessungen wurden für die Anstellwinkel $\alpha=2^\circ$ und $\alpha=4^\circ$ durchgeführt. Die Schallmessungen erfolgten im Nachlauf des Profils, in Spannweitenrichtung etwa am Übergang vom rechteckigen Flügelteil auf den Randbogen. Verwendet wurde ein Mikrofon der Firma Knowles mit der Bezeichnung EM3046. Das Mikrofon ist in eine kurze Hülse mit Silikon eingebettet, die über eine Verlängerung mit einem Halterohr verbunden ist. Den vorderen Abschluß der Hülse und somit die Schalleintrittsöffnung bildet ein 20mm langes Messingröhrchen mit 1mm Innendurchmesser. Die Signalaufnahme erfolgte über einen Mikrofonverstärker mit regelbarem Lautsprecherausgang. Die Positionierung des Mikrofons erfolgte manuell anhand des subjektiven Höreindrucks. Waren Einzeltöne zu hören, wurde das Mikrofon so plaziert, daß diese Töne am deutlichsten hörbar waren. Das Signal wurde über einen 20Hz Hochpassfilter einem AD-Wandler zugeführt. Die Verstärkung im Signalweg wurde für alle Messungen gleich belassen.

Die Abtastung des Mikrofonsignals erfolgte mit 10kHz. Somit ergibt sich ein darstellbarer Frequenzbereich bis 5kHz. Aufgenommen wurden 4096 Messpunkte die in vier Signale zu je 1024 Punkten aufgeteilt wurden. Nach der Fourier-Analyse erfolgte eine quadratische Mittelung der Fourier-Koeffizienten. Die resultierende Auflösung im Frequenzbereich beträgt somit ca. 10Hz. Um die Unterschiede in den Frequenzspektren deutlicher hervortreten zu lassen, wurde eine leistungsmäßige Auftragung (Amplitude²) gewählt. Der Frequenzgang des Mikrofons ist im Diagramm 2.0 dargestellt. Eine Messung des Frequenzgangs im eingebauten Zustand wurde nicht durchgeführt.

Durch das 20mm lange Verlängerungsröhrchen kann der Frequenzgang durch die Ausbildung stehender Wellen beeinflusst werden. Für einseitig offene Rohre gilt:

$$f = (2n-1) \cdot c / (4 \cdot l)$$

n: Vielfaches der Grundfrequenz c: Schallgeschwindigkeit

Im untersuchten Bereich ergeben sich damit stehende Wellen für 4125Hz (n=1). Bei dieser Frequenz ist im Amplitudenverlauf keine Erhöhung zu erkennen.

Ergebnisse:

Aufgrund des Versuchsaufbaus sind die Messungen als qualitative Messungen zu bewerten. Für die Auswertung sind die Frequenzanalysen nach folgendem Schema geordnet:

Diagramm 2.1: Standard-Randbogen	v=32m/s	$\alpha=2^\circ, 4^\circ$	glatt
Diagramm 2.2: Shark -Randbogen	v=32m/s	$\alpha=2^\circ, 4^\circ$	glatt
Diagramm 2.3: Ogee -Randbogen	v=32m/s	$\alpha=2^\circ, 4^\circ$	glatt
Diagramm 3.1: Standard-Randbogen	v=40m/s	$\alpha=2^\circ, 4^\circ$	glatt
Diagramm 3.2: Shark -Randbogen	v=40m/s	$\alpha=2^\circ, 4^\circ$	glatt
Diagramm 3.3: Ogee -Randbogen	v=40m/s	$\alpha=2^\circ, 4^\circ$	glatt
Diagramm 4.1: Standard-Randbogen	v=40m/s	$\alpha=2^\circ, 4^\circ$	Noppen 33%UO
Diagramm 4.2: Shark -Randbogen	v=32m/s	$\alpha=2^\circ, 4^\circ$	Noppen 33%UO
Diagramm 4.3: Shark -Randbogen	v=40m/s	$\alpha=2^\circ, 4^\circ$	Noppen 33%UO
Diagramm 4.4: Ogee -Randbogen	v=32/40m/s	$\alpha=2^\circ$	Noppen 85%U

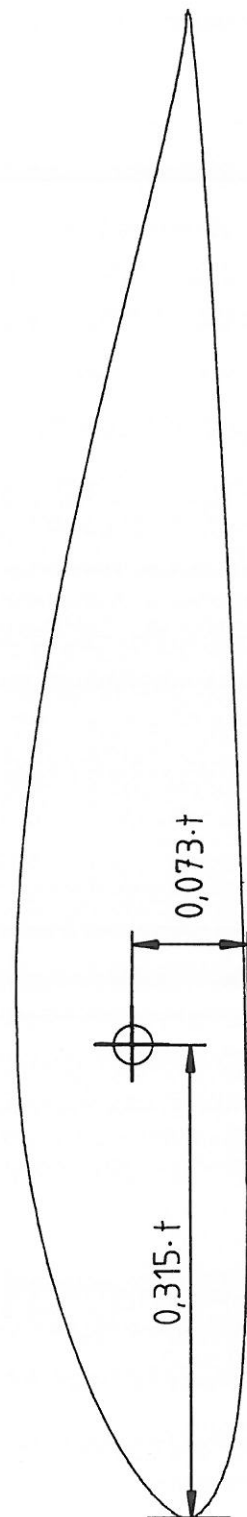
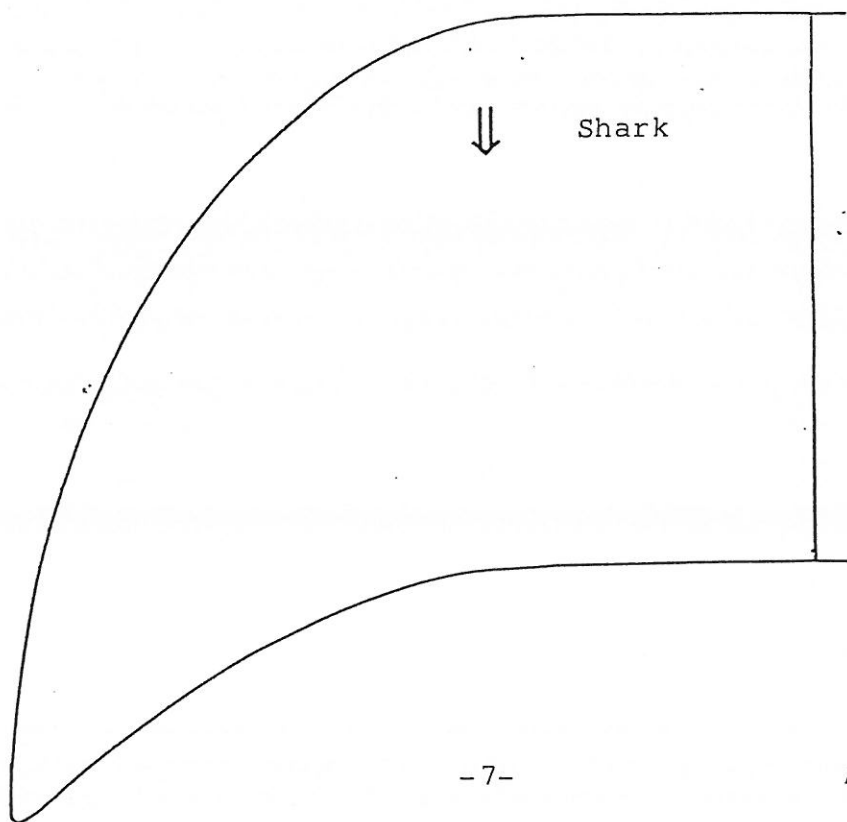
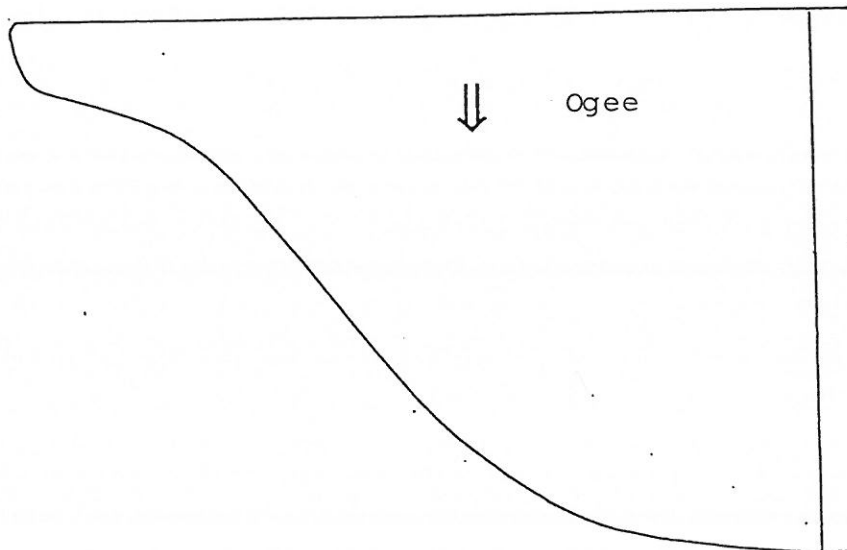
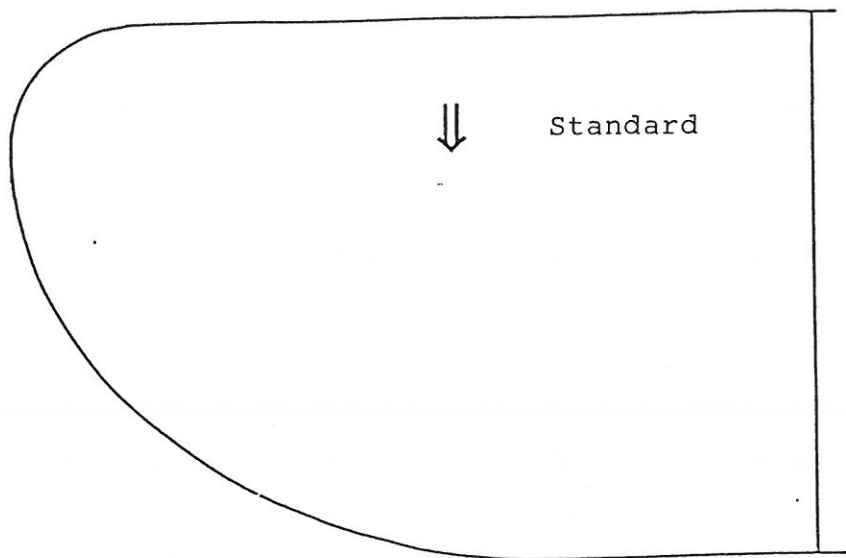
Für die Messungen ohne Noppen zeigt sich folgendes Verhalten:

Bei einer Anströmgeschwindigkeit von 32m/s werden für $\alpha=2^\circ$ bei allen Varianten Einzeltöne im Bereich 1200-1300Hz registriert. Für $\alpha=4^\circ$ sind keine Einzeltöne festzustellen (Diagramm 2.1-2.3). Bei einer Anströmgeschwindigkeit von 40m/s sind für $\alpha=2^\circ$ bei allen Varianten Einzeltöne im Bereich 1300-1500Hz zu erkennen. Für $\alpha=4^\circ$ ergeben sich ebenfalls für alle Varianten signifikante Einzeltöne, allerdings bei unterschiedlichen Frequenzen (Diagramm 3.1-3.3).

Durch das Aufbringen von Noppen werden diese Einzeltöne bei allen untersuchten Anstellwinkeln und Anströmgeschwindigkeiten beseitigt. Für die Version mit Noppen bei 33% auf der Profilober-

und Unterseite ist dies am Shark-Randbogen (Diagramm 4.2 und 4.3) demonstriert. Eine Messung mit diesen Noppen am Standard-Randbogen (Diagramm 4.1) zeigt, im Vergleich mit dem Shark-Randbogen (Diagramm 4.3), daß bei Verwendung von Noppen kein Unterschied zwischen den Randbogenformen festgestellt werden kann. Der ursächliche Zusammenhang zwischen der Ablöseblase auf der Profilunterseite und den festgestellten Einzeltönen ist an der Messung am Ogee-Randbogen (Diagramm 4.4, Noppen bei 85% Unterseite) sichtbar. Ein Noppenband an dieser Position ist ausreichend, um die Entstehung von Einzeltönen zu unterbinden.

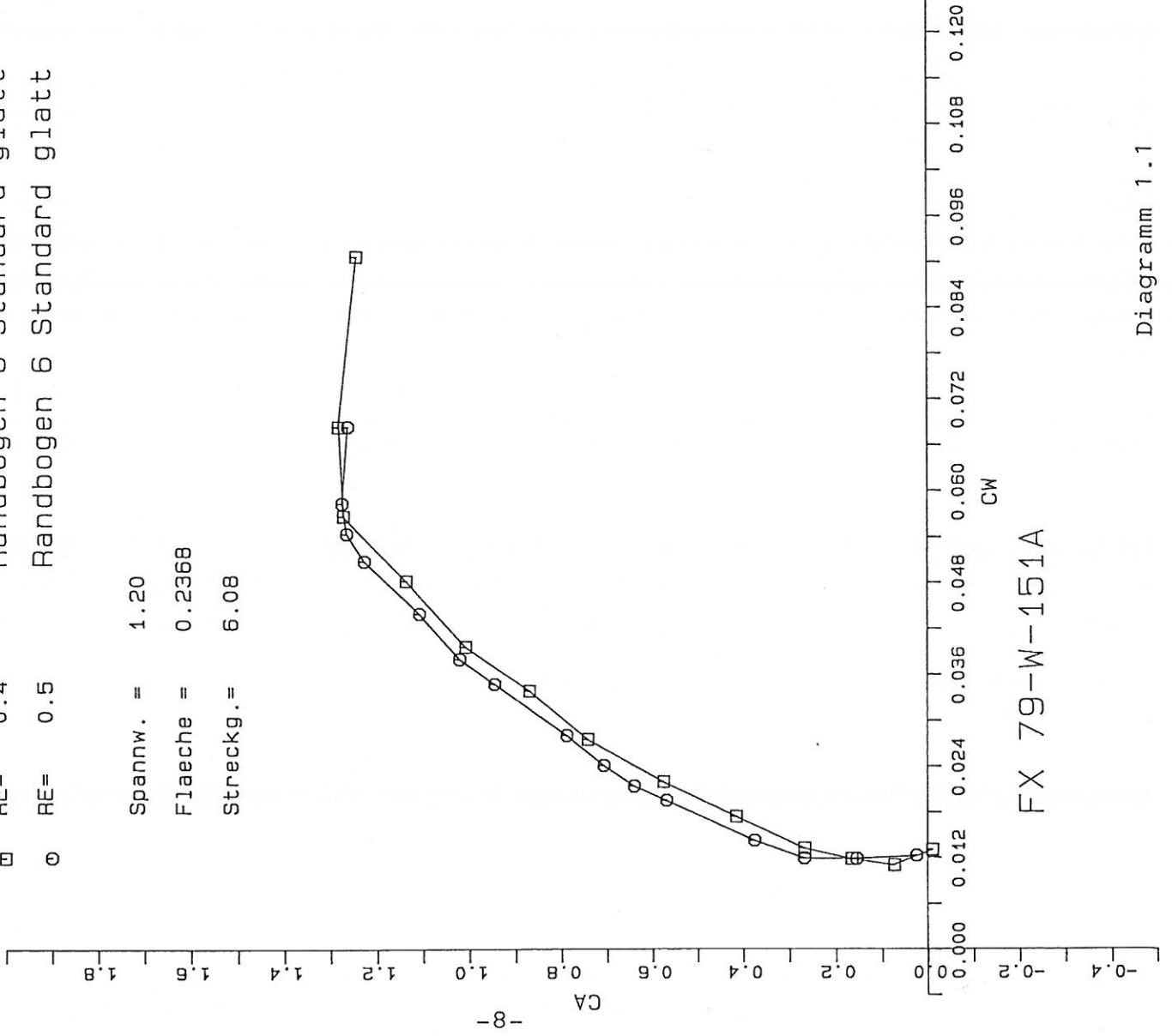
Stuttgart Nov.1994



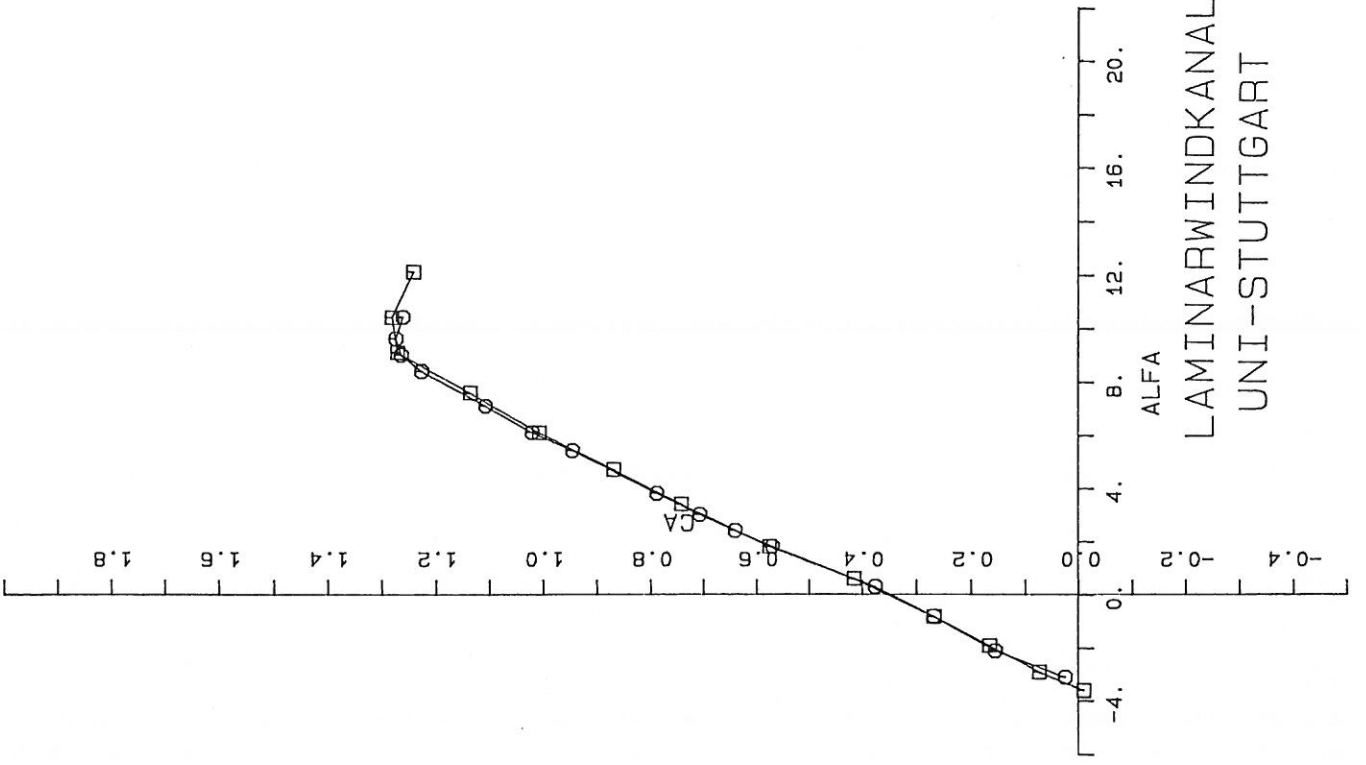
FX 79-W-151 A.

□ RE= 0.4 Randbogen 6 Standard glatt
 ○ RE= 0.5 Randbogen 6 Standard glatt

Spannw. = 1.20
 Flaeche = 0.2368
 Streckg. = 6.08



FX 79-W-151A



ALFA
 LAMINARWINDKANAL
 UNI-STUTT GART

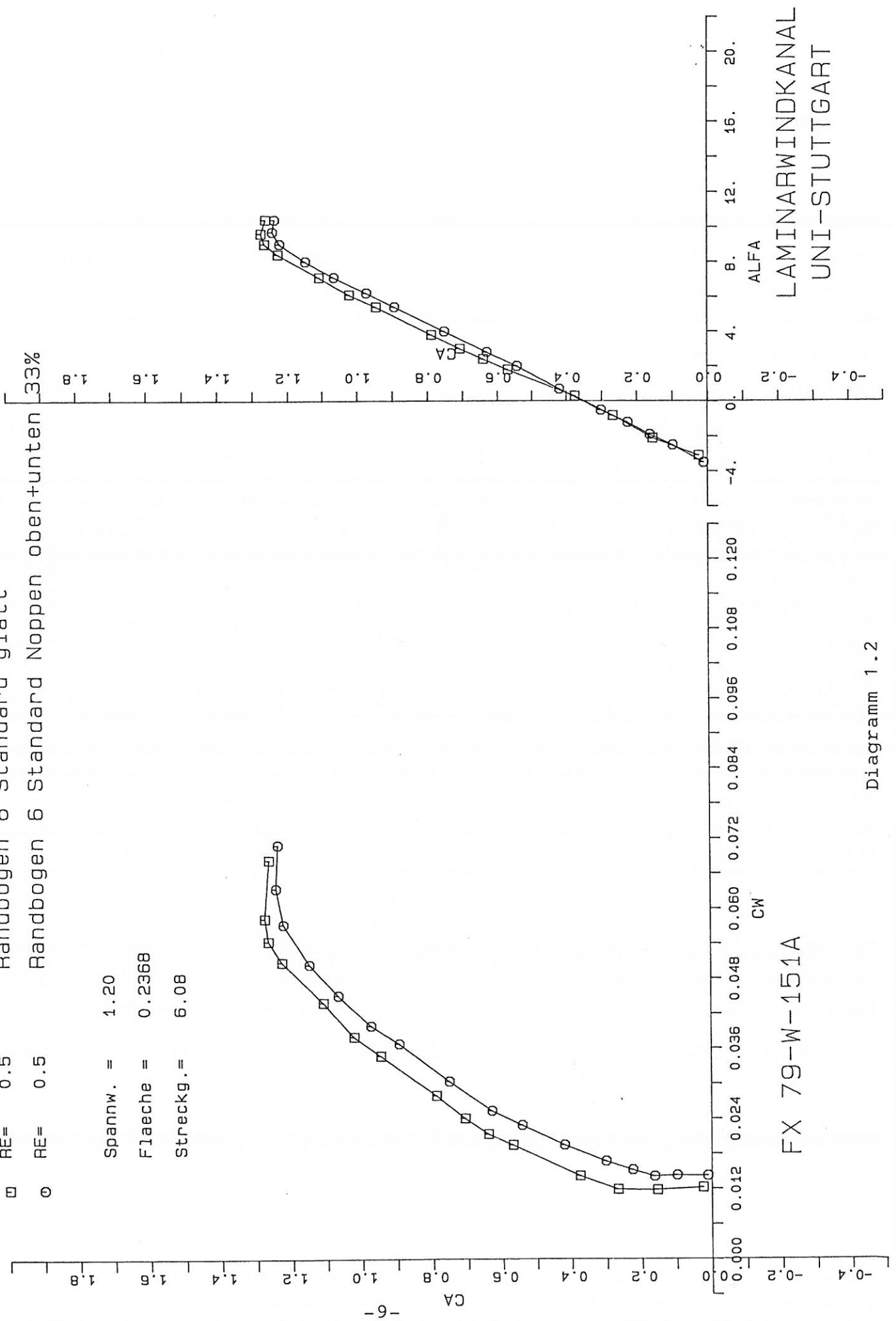
Diagramm 1.1

□ RE= 0.5 Randbogen 6 Standard glatt
 ○ RE= 0.5 Randbogen 6 Standard Noppen oben+unten

Spannw. = 1.20

Fläche = 0.2368

Streckg. = 6.08



FX 79-W-151A

CW

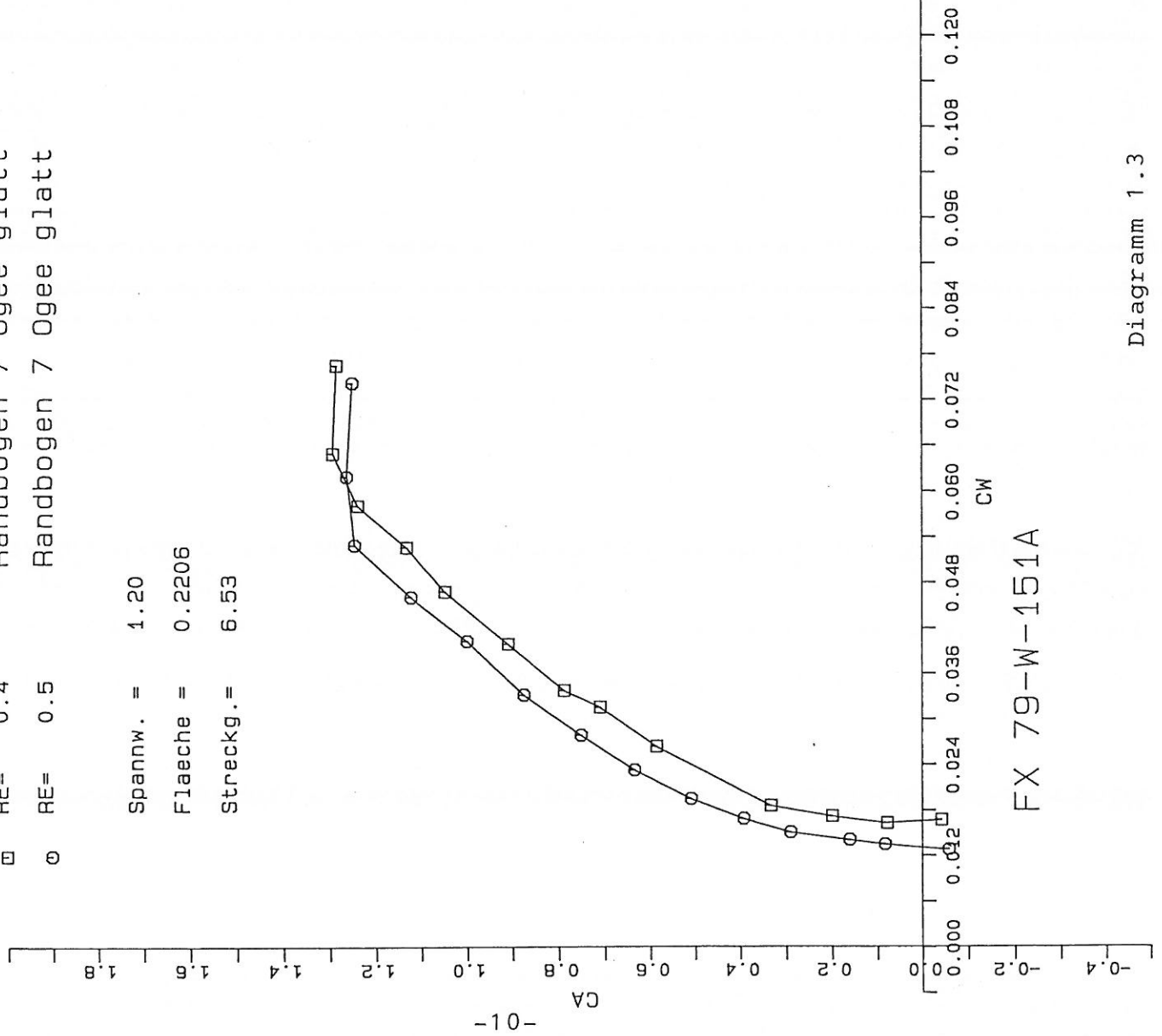
ALFA

LAMINARWINDKANAL
UNI-STUTT GART

Diagramm 1.2

□ RE= 0.4 Randbogen 7 Ogee glatt
 ○ RE= 0.5 Randbogen 7 Ogee glatt

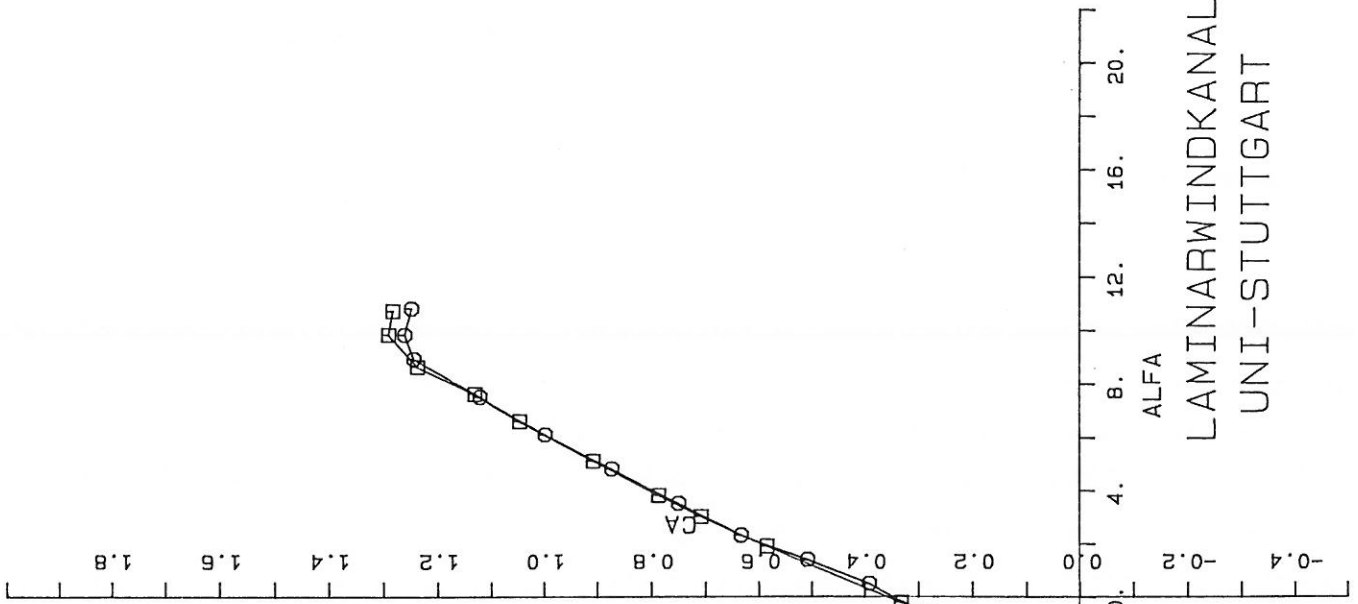
Spann. = 1.20
 Flaeche = 0.2206
 Streckg. = 6.53



FX 79-W-151A

CW

-10-



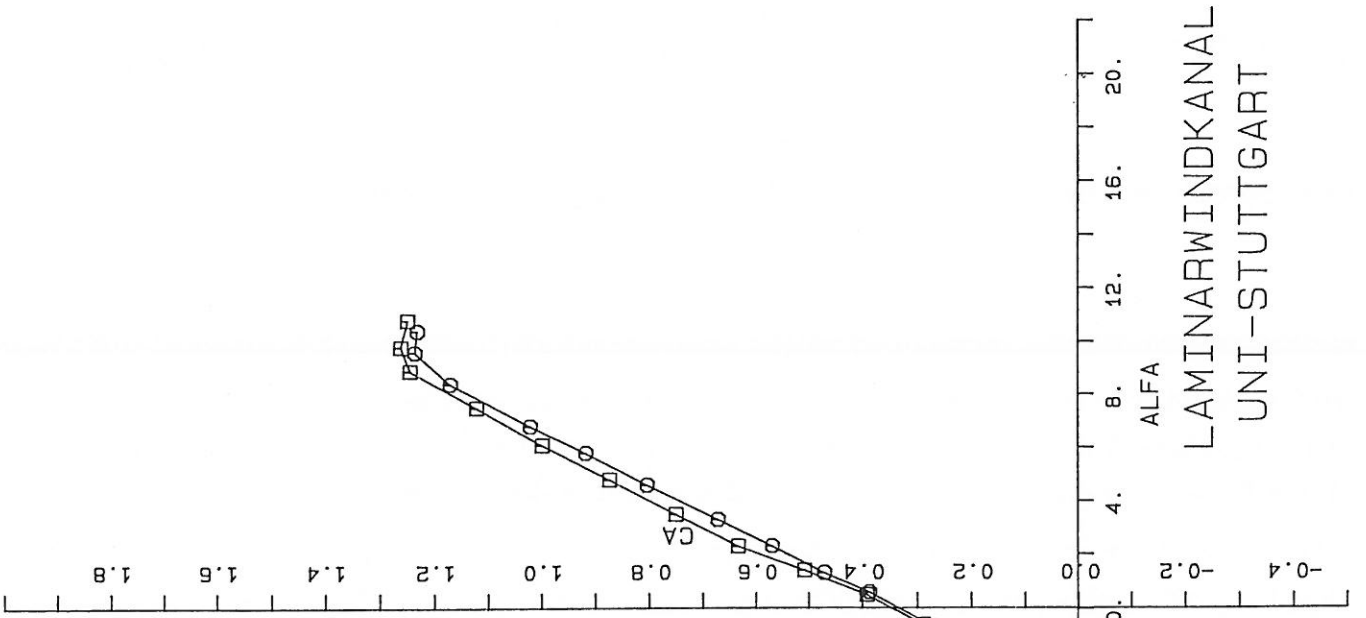
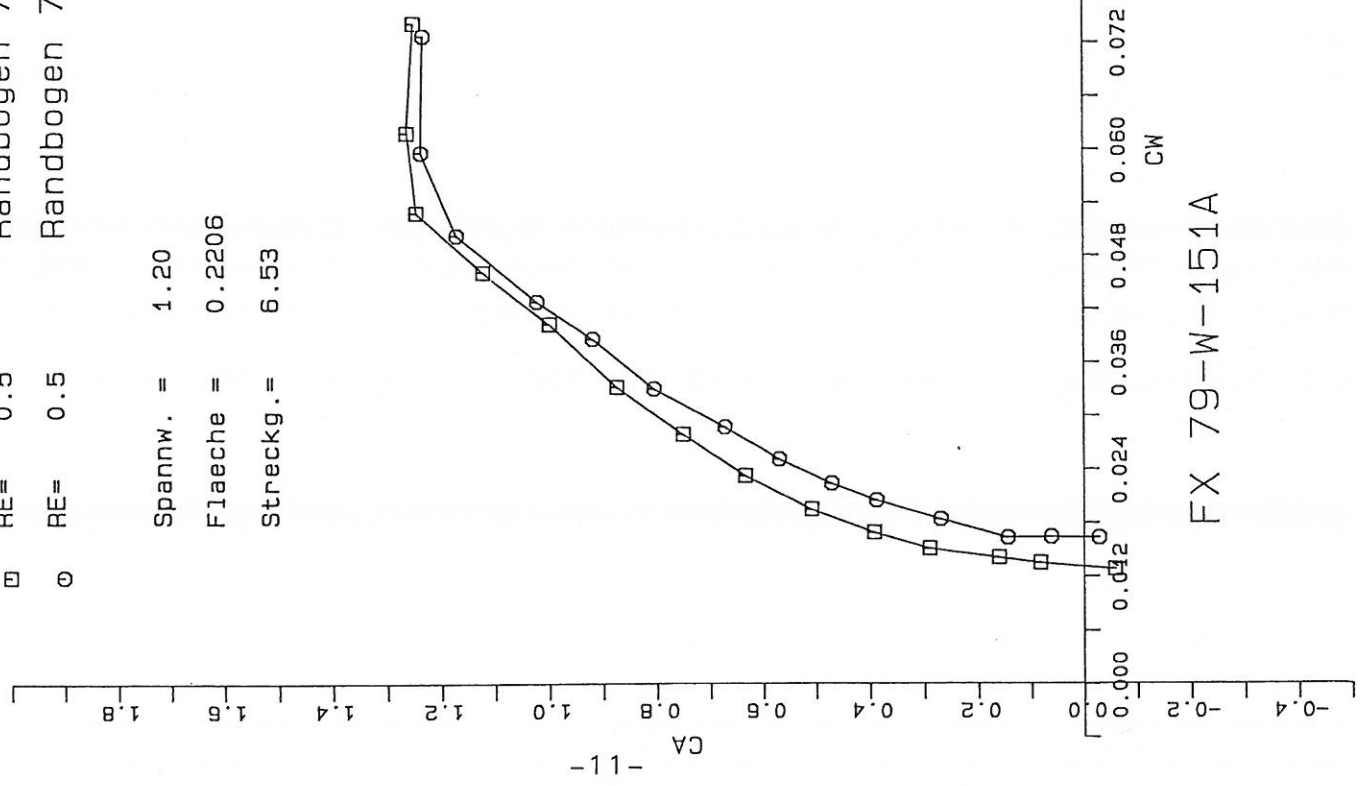
ALFA

LAMINARWINDKANAL
UNI-STUTT GART

Diagramm 1.3

□ RE= 0.5 Randbogen 7 Ogee glatt
 ○ RE= 0.5 Randbogen 7 Ogee Noppen oben+unten 33%

Spannw. = 1.20
 Flaeche = 0.2206
 Streckg. = 6.53



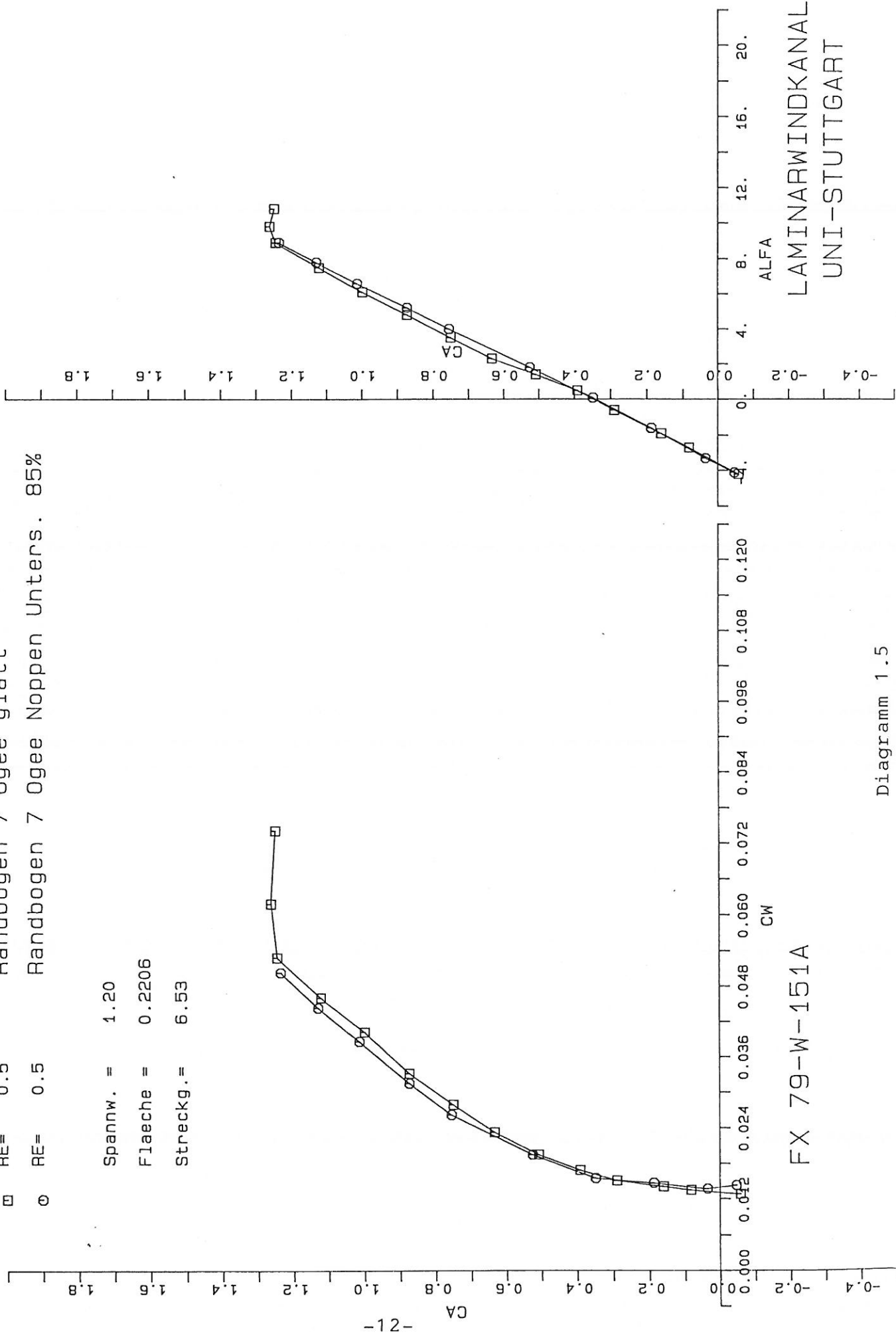
FX 79-W-151A

ALFA
 LAMINARWINDKANAL
 UNI-STUTT GART

Diagramm 1.4

□ RE= 0.5 Randbogen 7 Ogee glatt
 ○ RE= 0.5 Randbogen 7 Ogee Noppen Unters. 85%

Spannw. = 1.20
 Flaeche = 0.2206
 Streckg. = 6.53



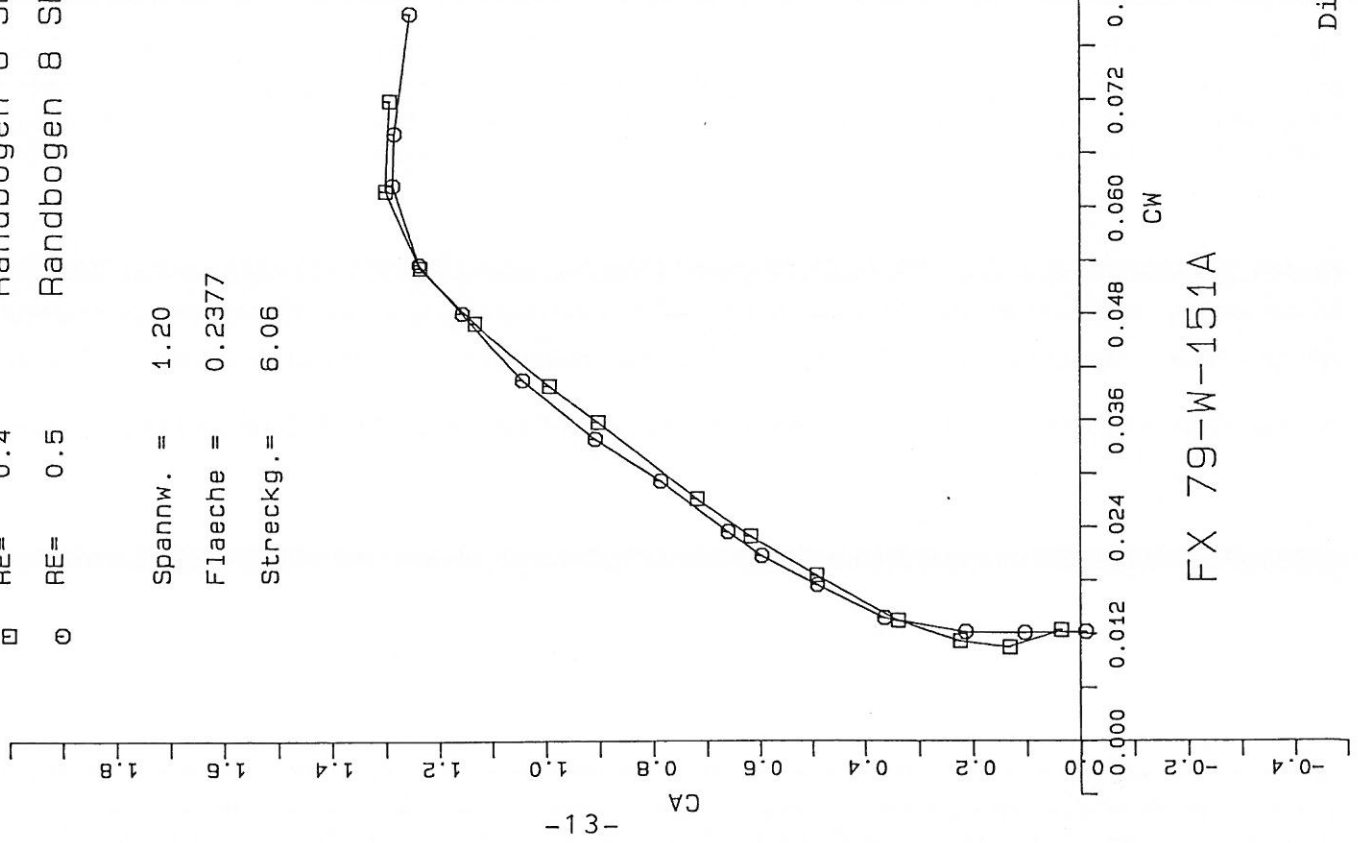
FX 79-W-151A

ALFA
LAMINARWINDKANAL
UNI-STUTT GART

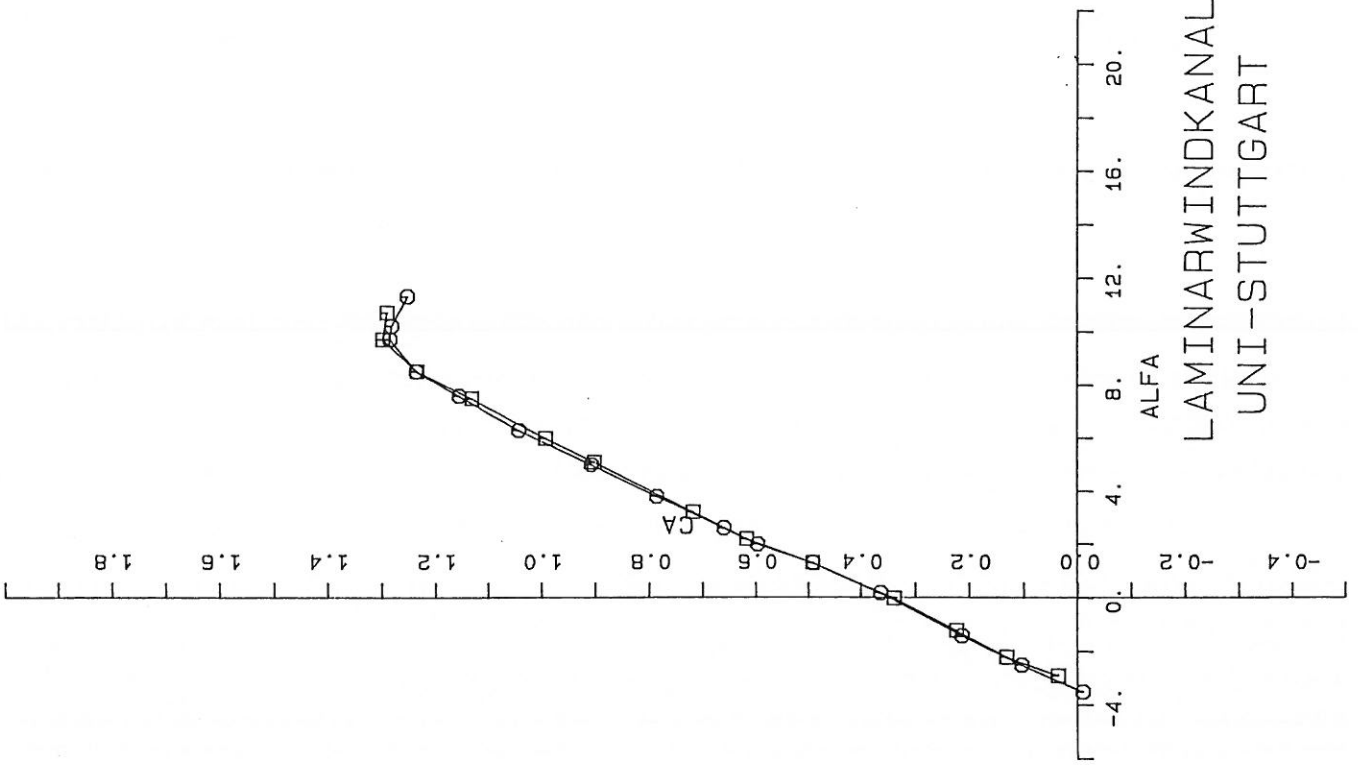
Diagramm 1.5

□ RE= 0.4 Randbogen 8 Shark glatt
 ○ RE= 0.5 Randbogen 8 Shark glatt

Spannw. = 1.20
 Flaeche = 0.2377
 Streckg. = 6.06



FX 79-W-151A



LAMINARWINDKANAL
 UNI-STUTT GART

Diagramm 1.6

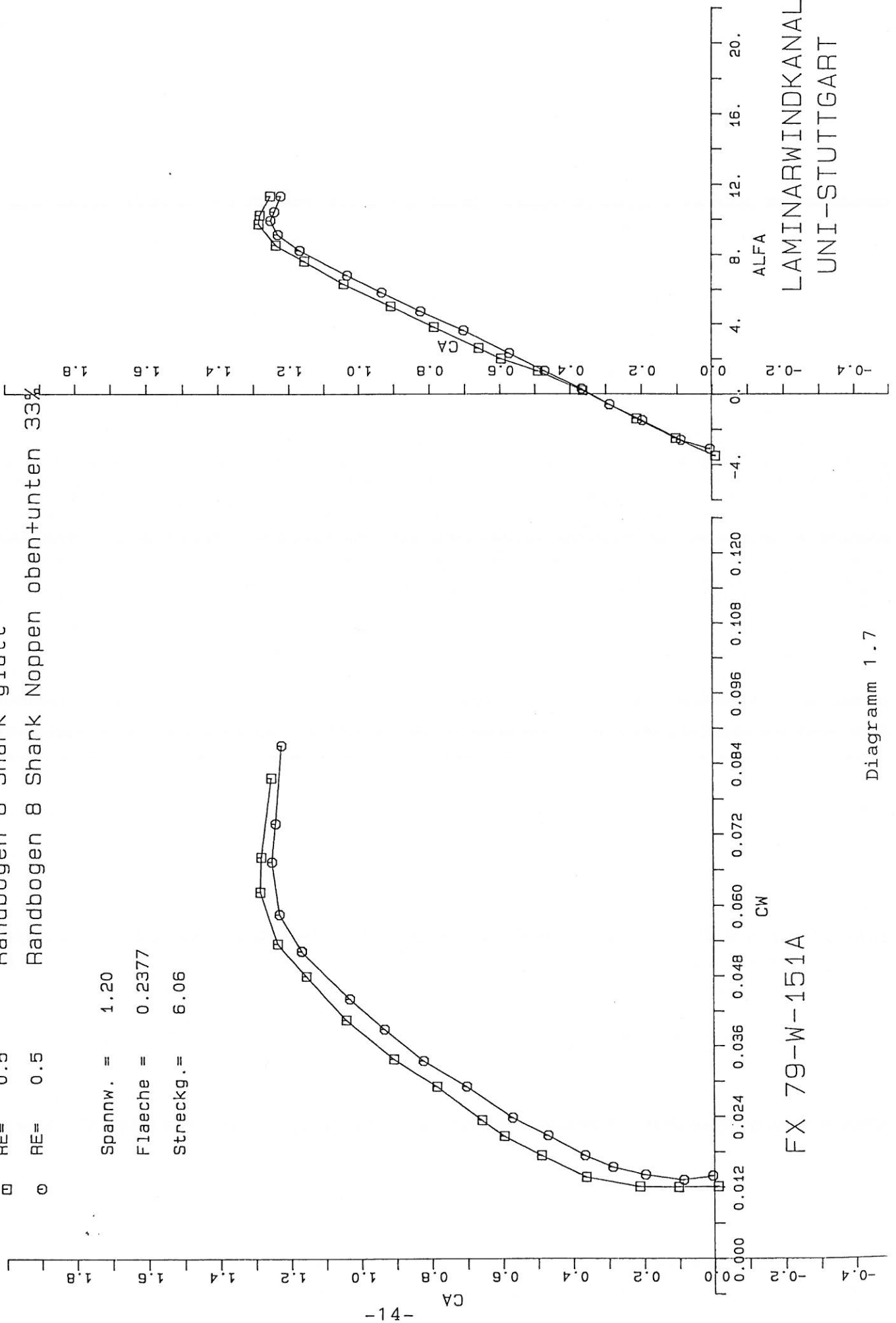
□ RE= 0.5
 ○ RE= 0.5

Randbogen 8 Shark glatt
 Randbogen 8 Shark Noppen oben+unten 33%

Spannw. = 1.20

Flaeche = 0.2377

Streckg. = 6.06



FX 79-W-151A

Diagramm 1.7

□ RE= 0.5 Randbogen 6 Standard glatt
 ○ RE= 0.5 Randbogen 7 Ogee glatt
 △ RE= 0.5 Randbogen 8 Shark glatt

Spannw. = 1.20

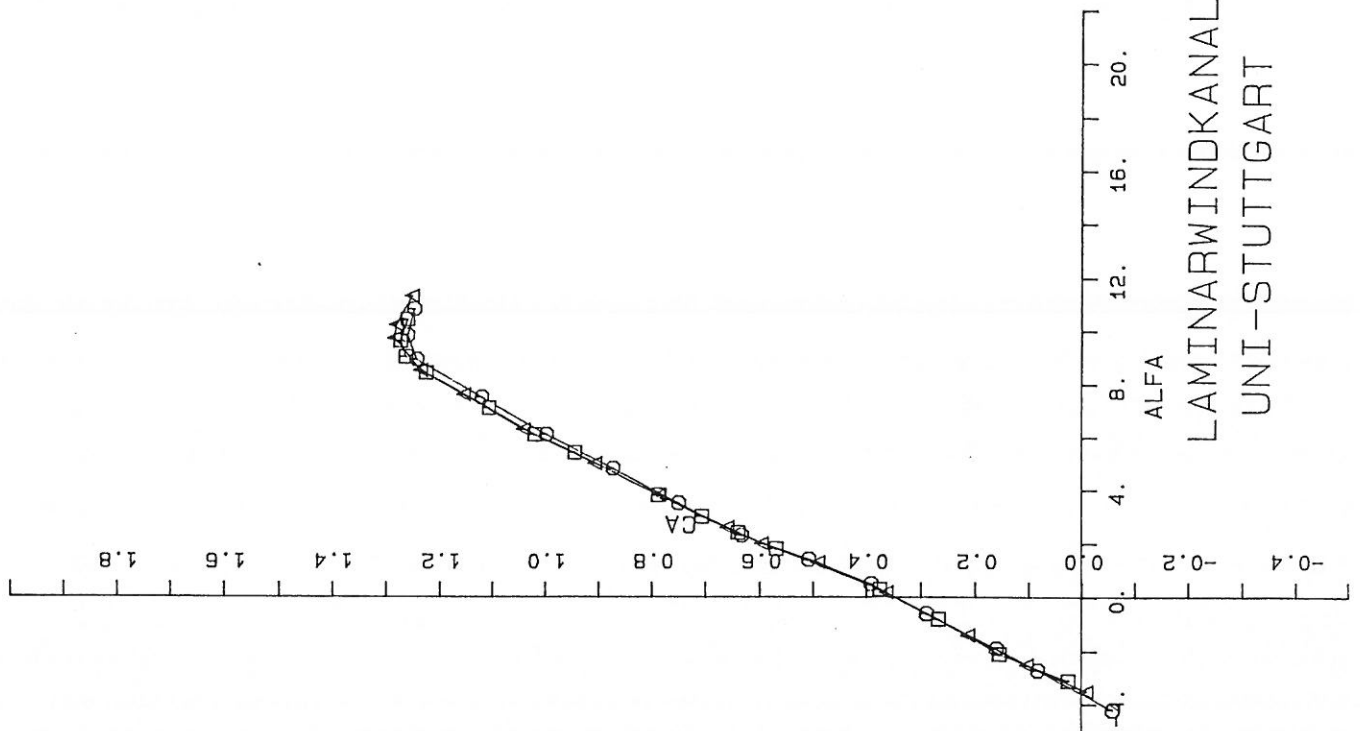
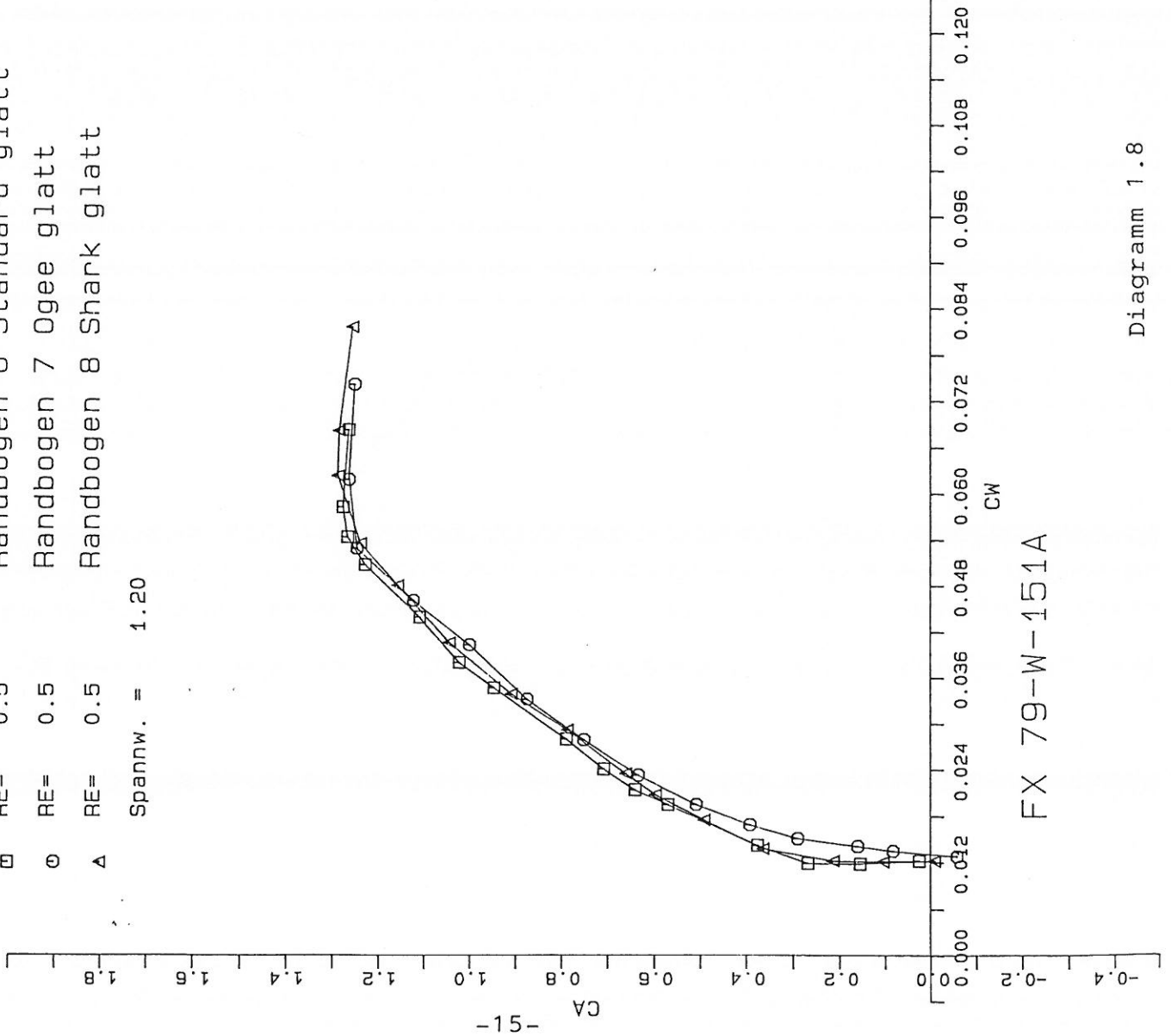
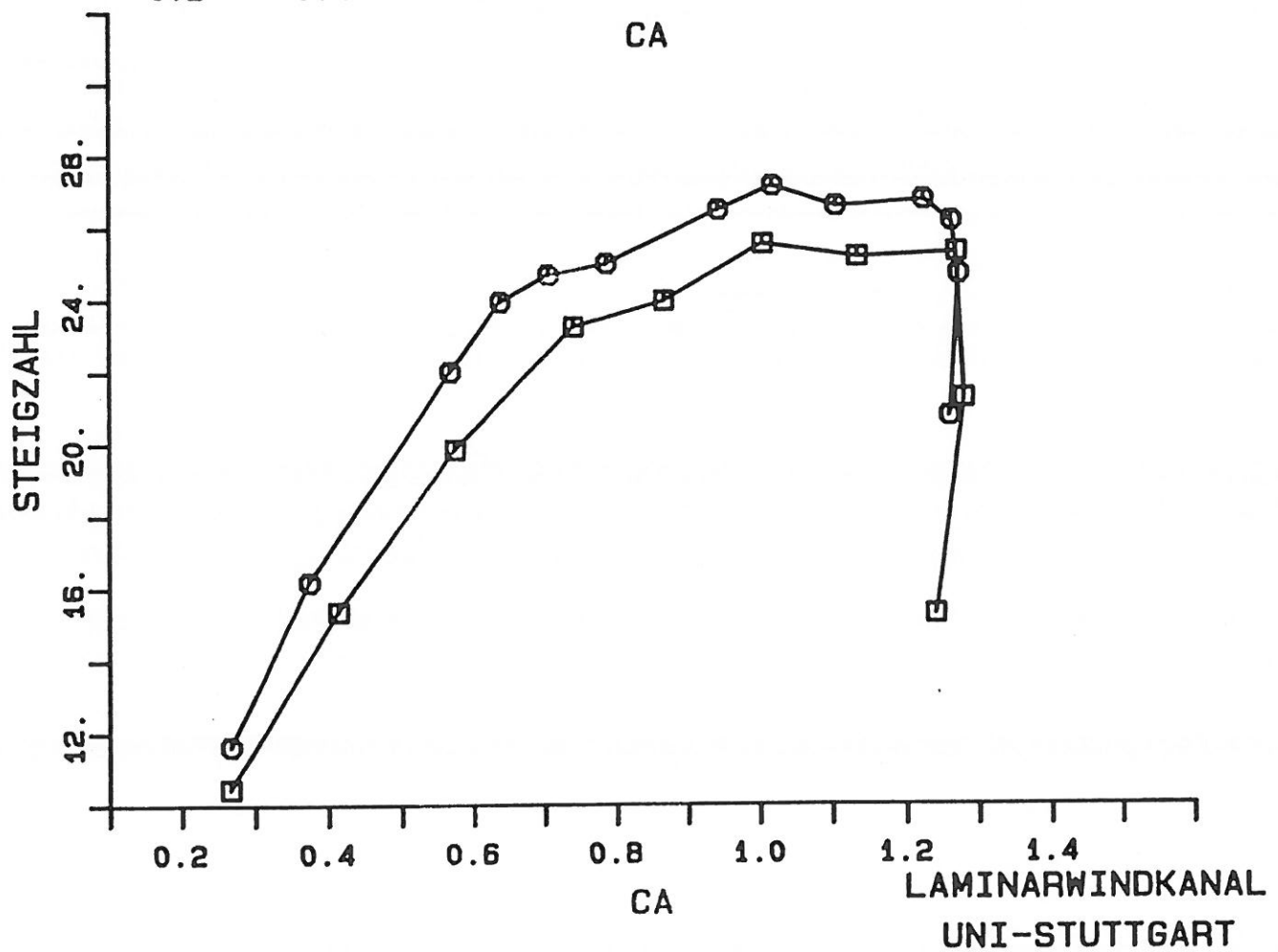
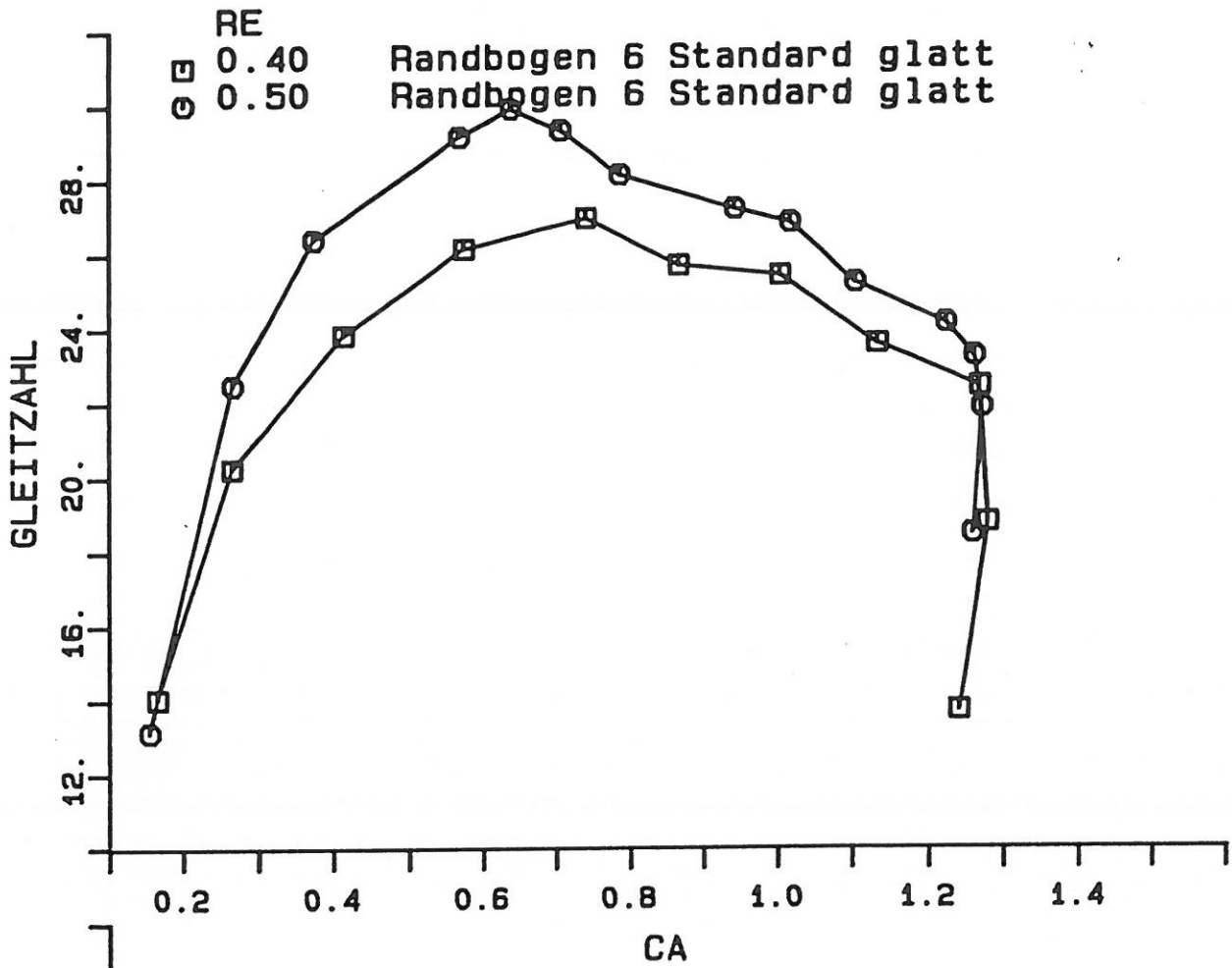
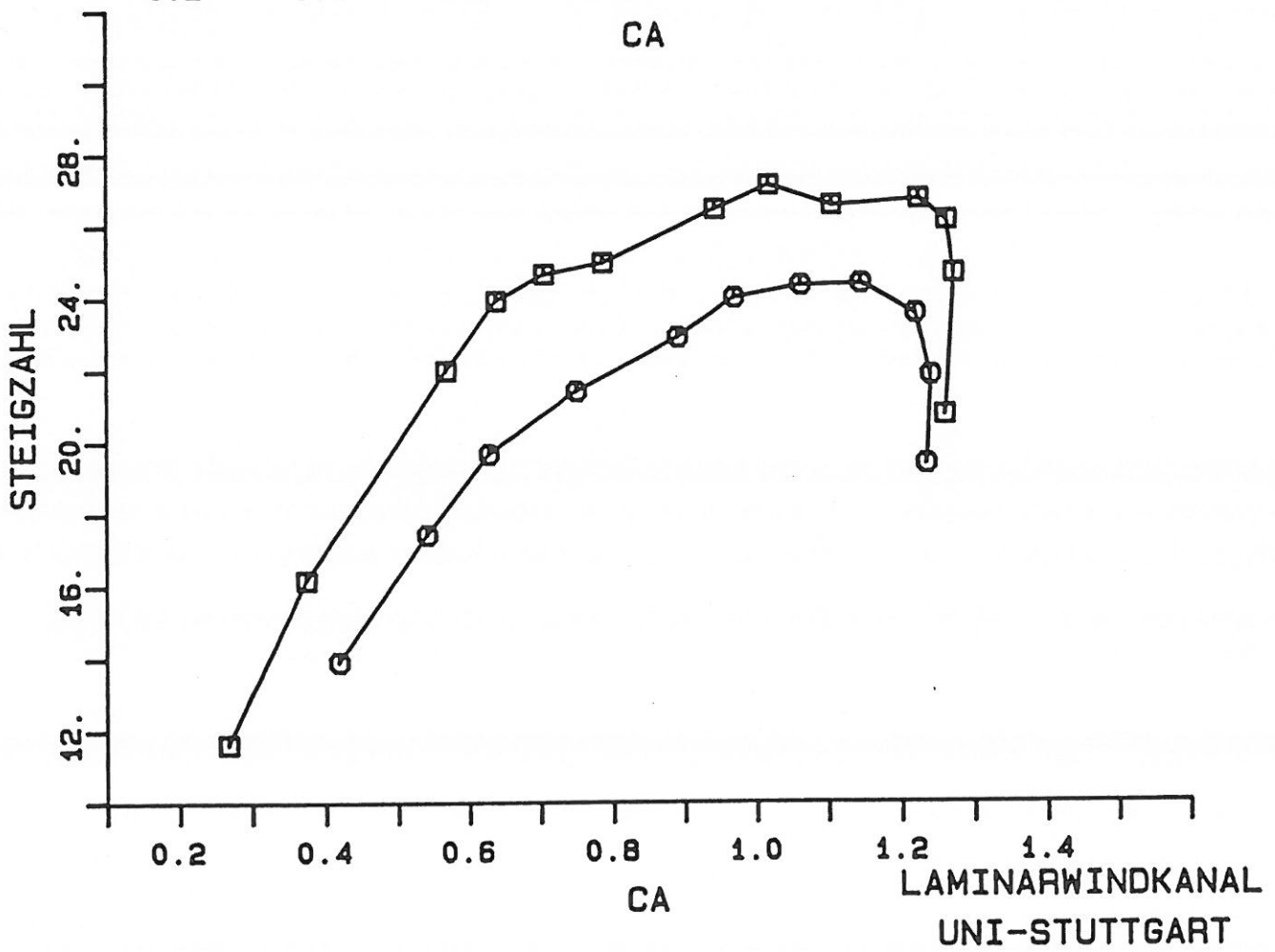
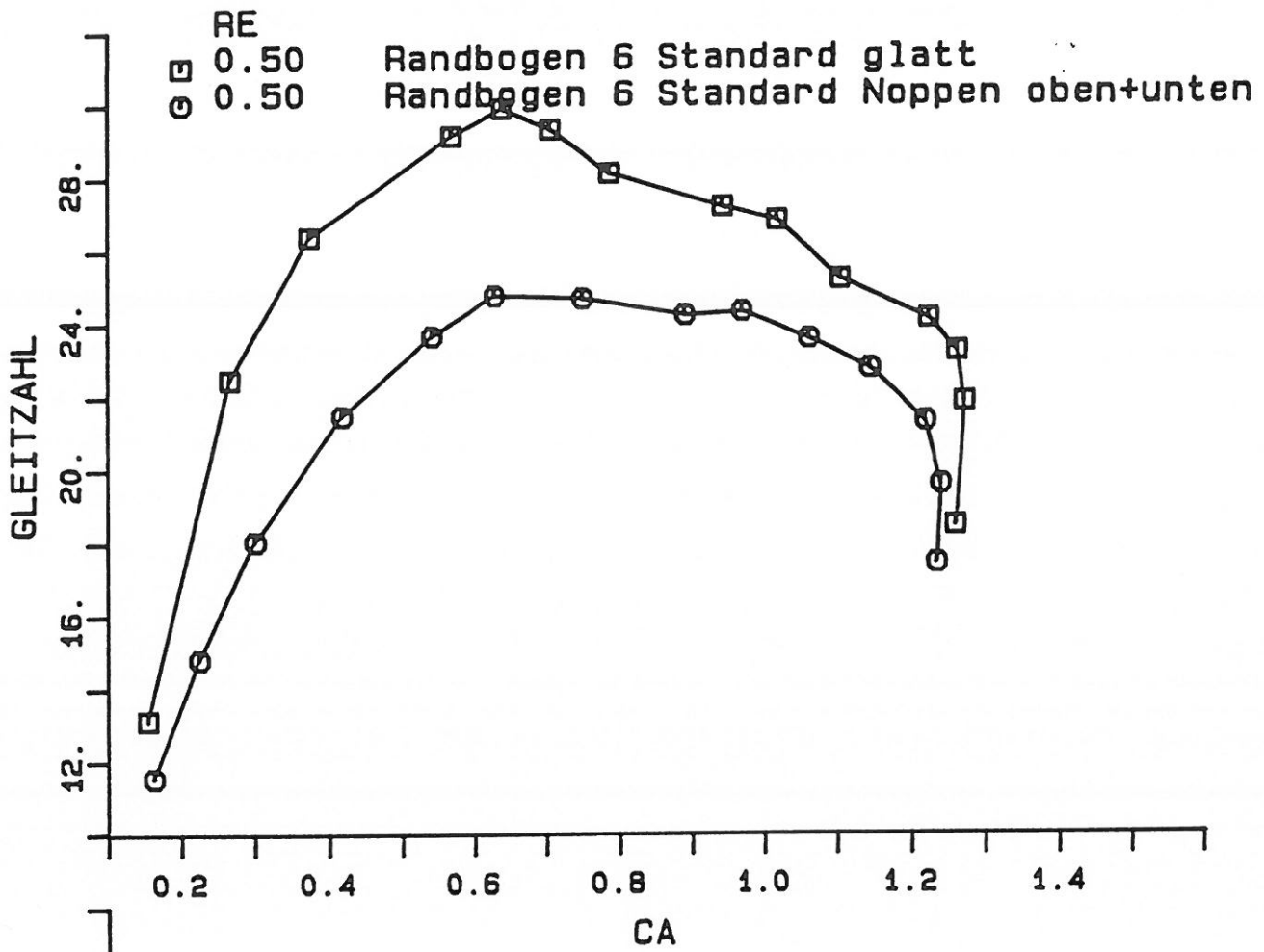
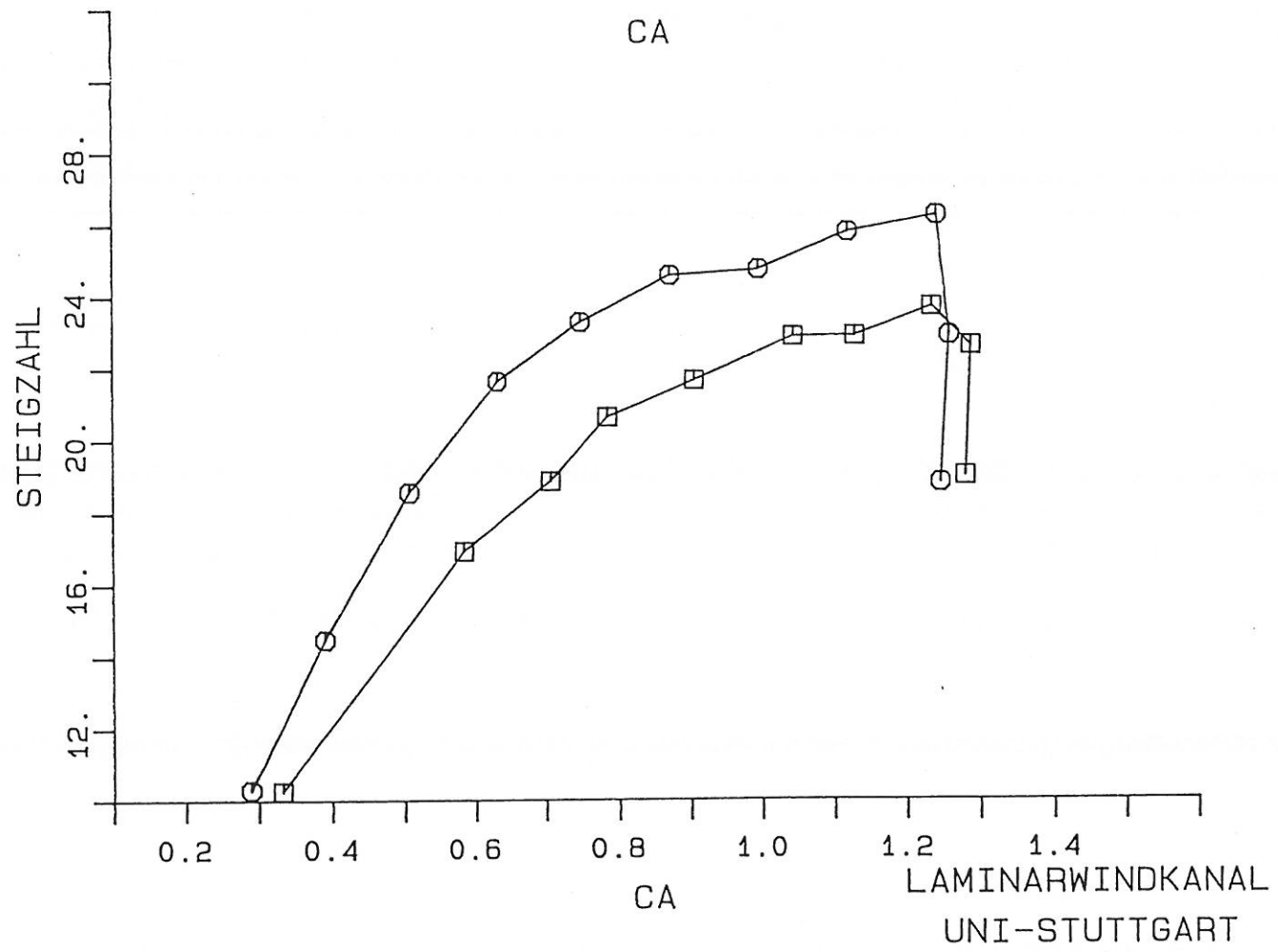
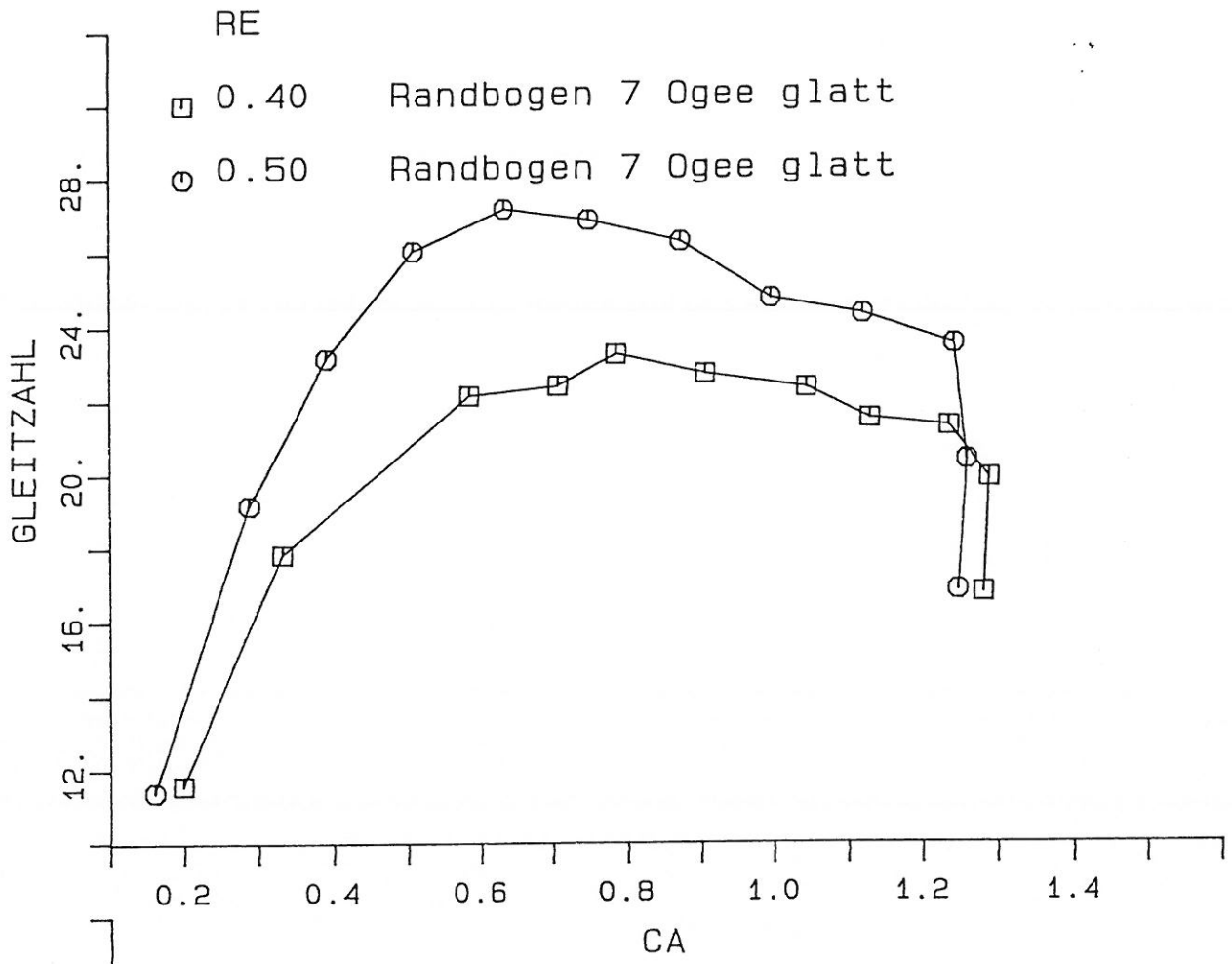
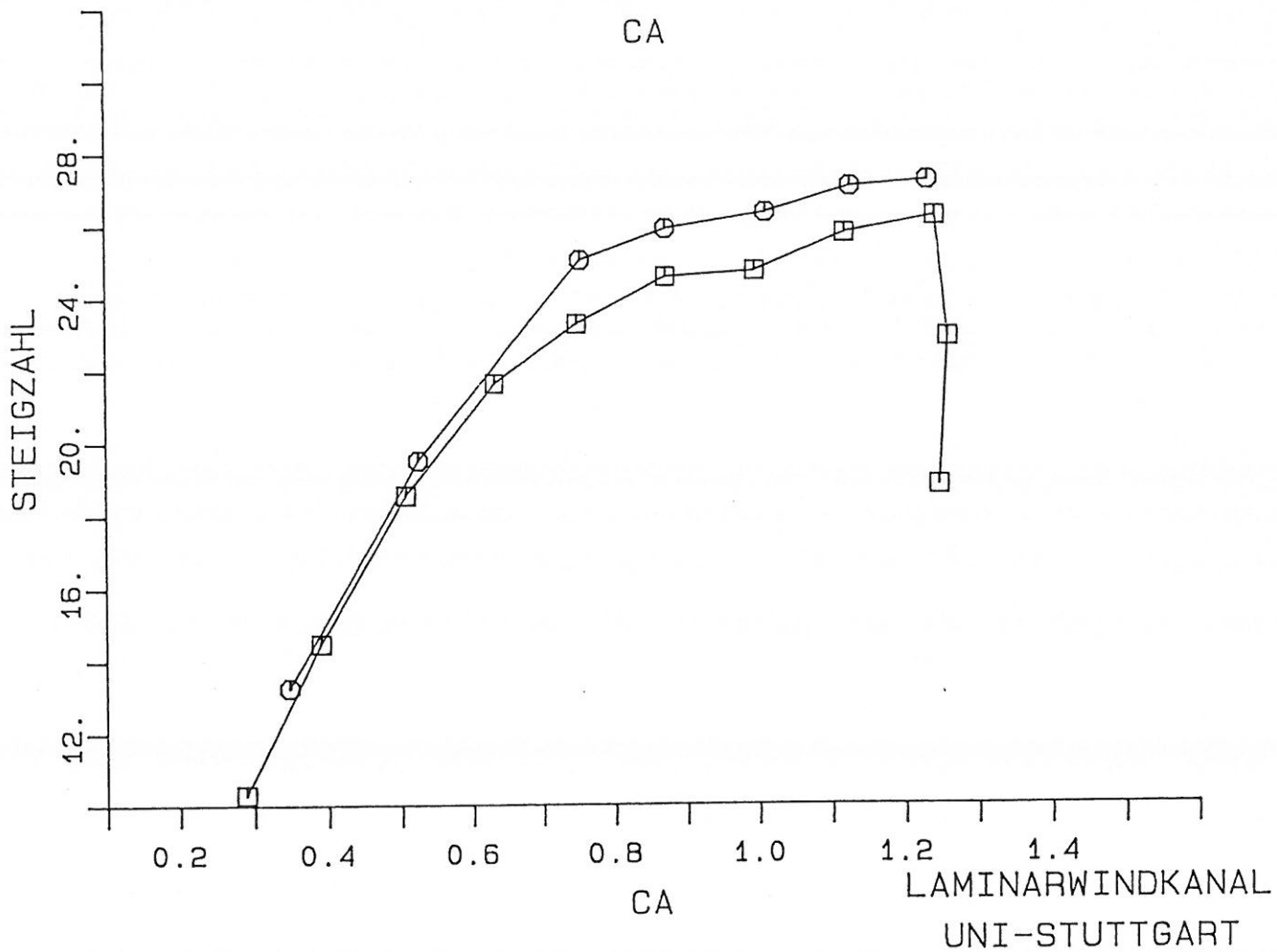
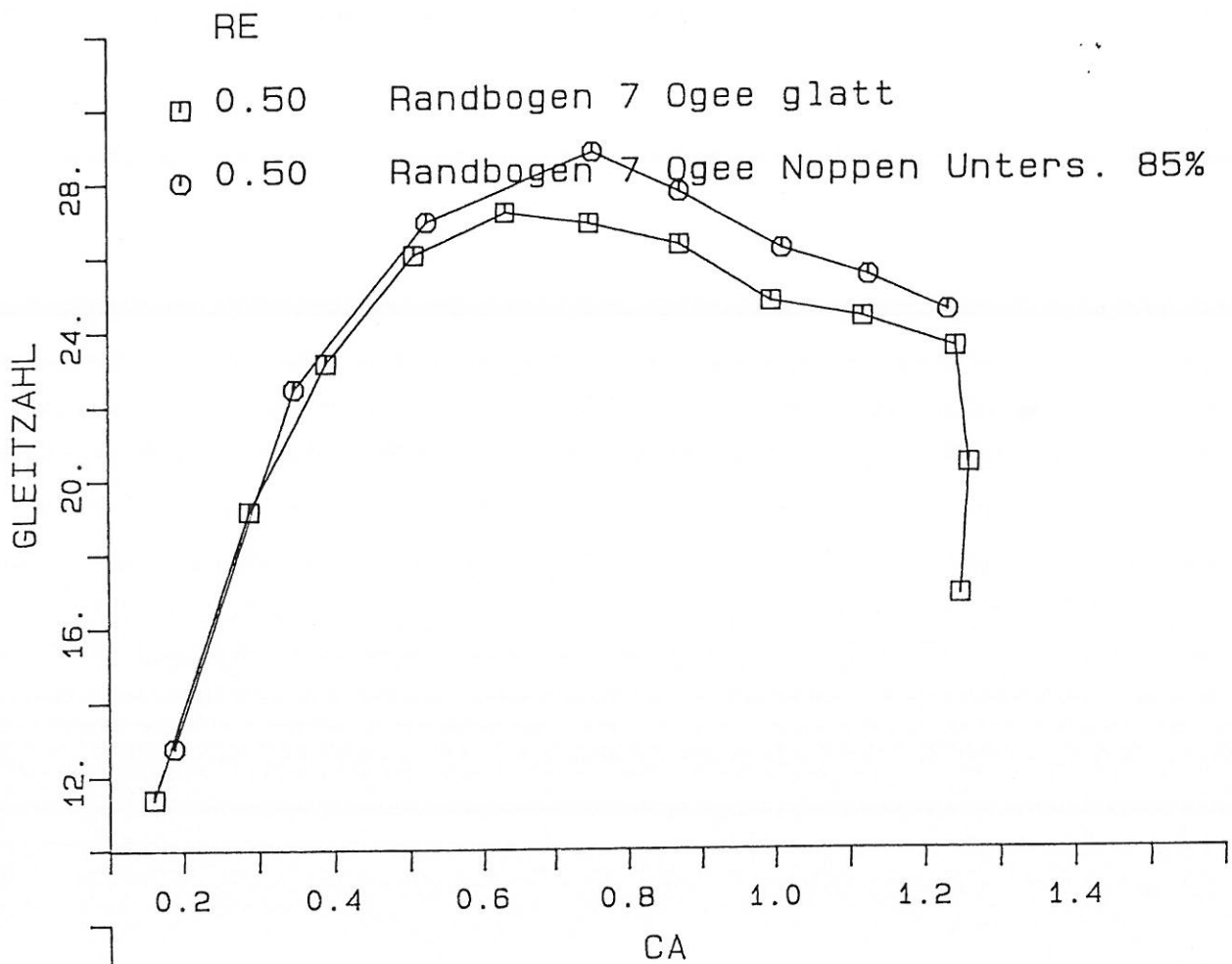


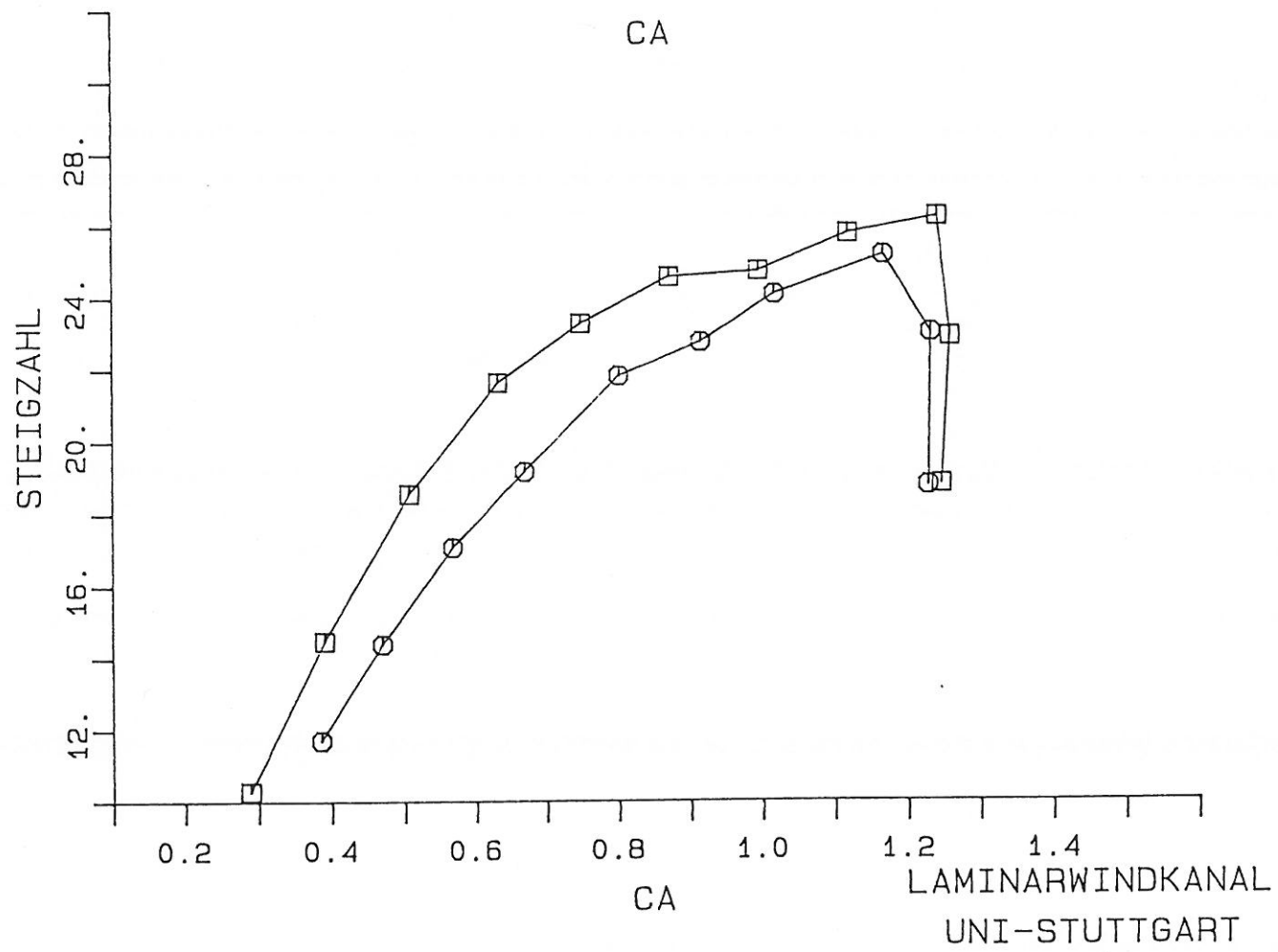
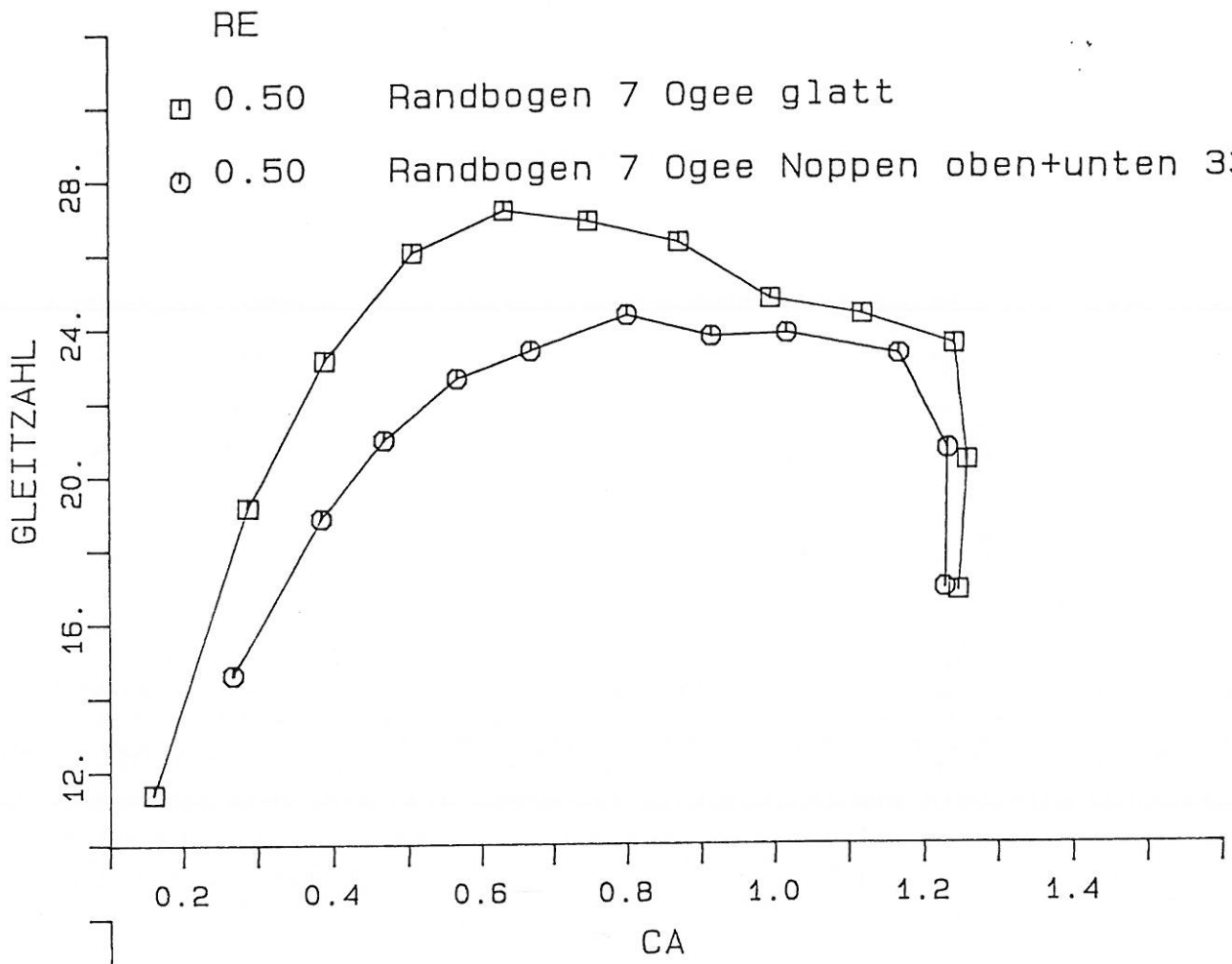
Diagramm 1.8



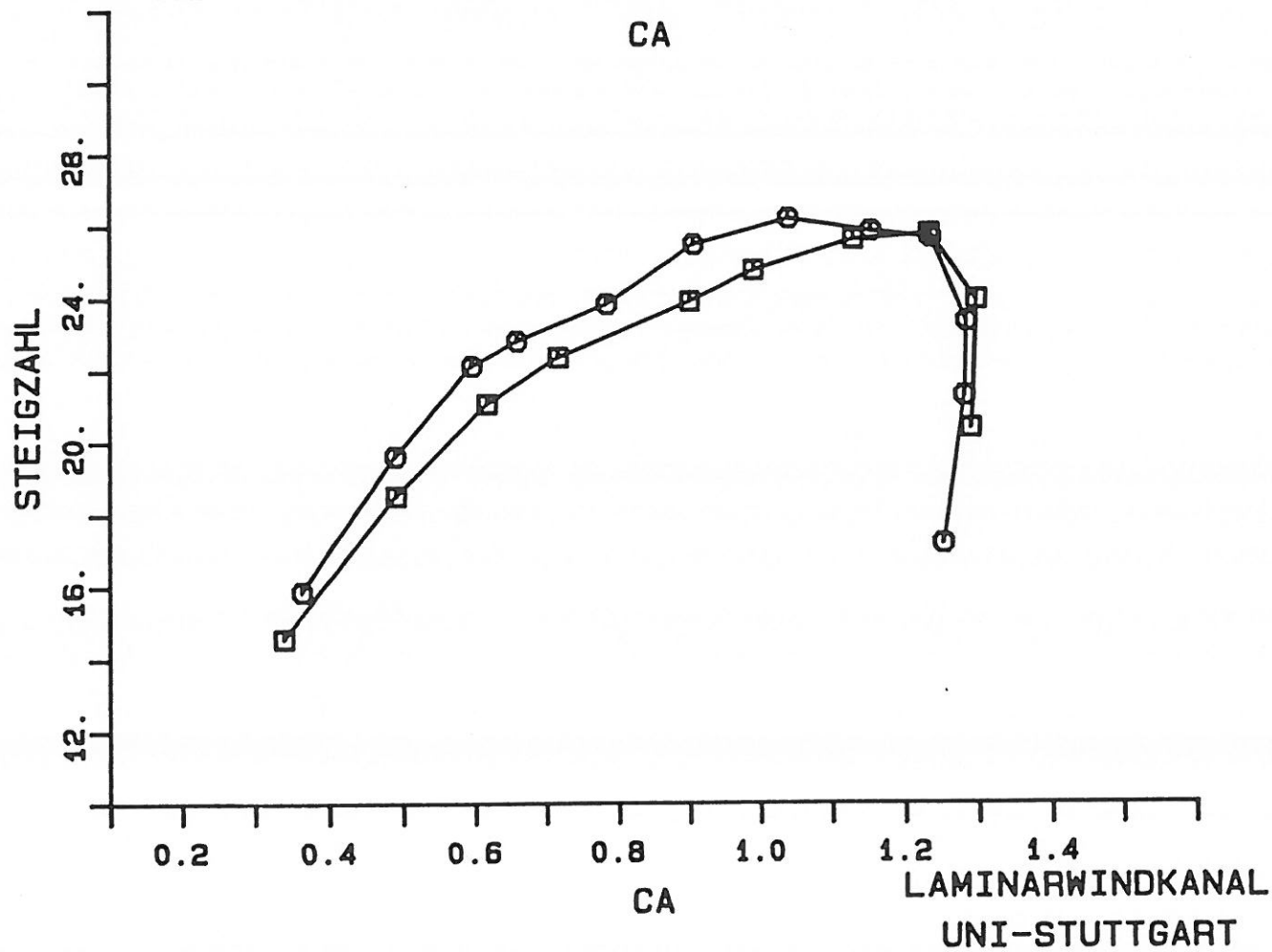
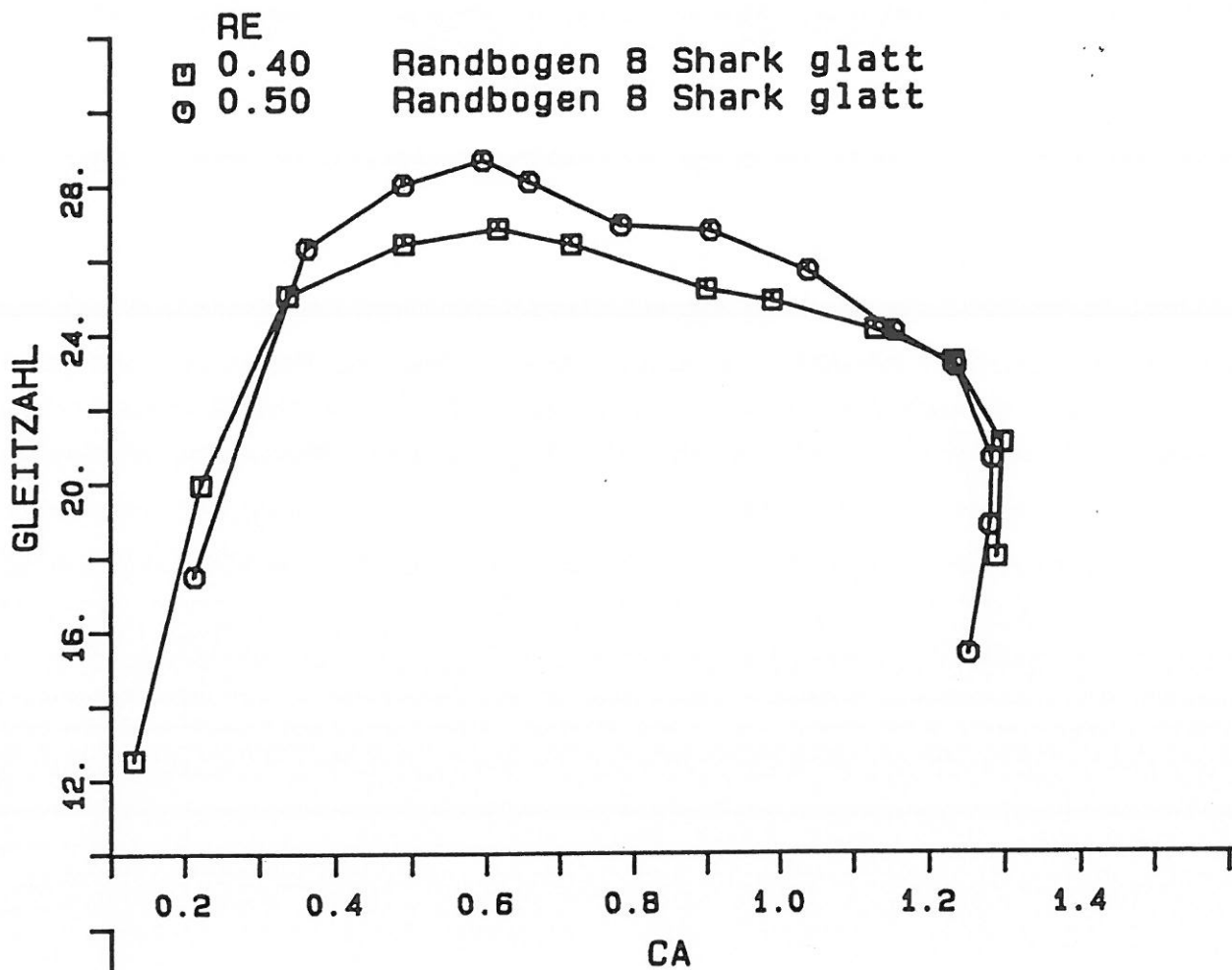


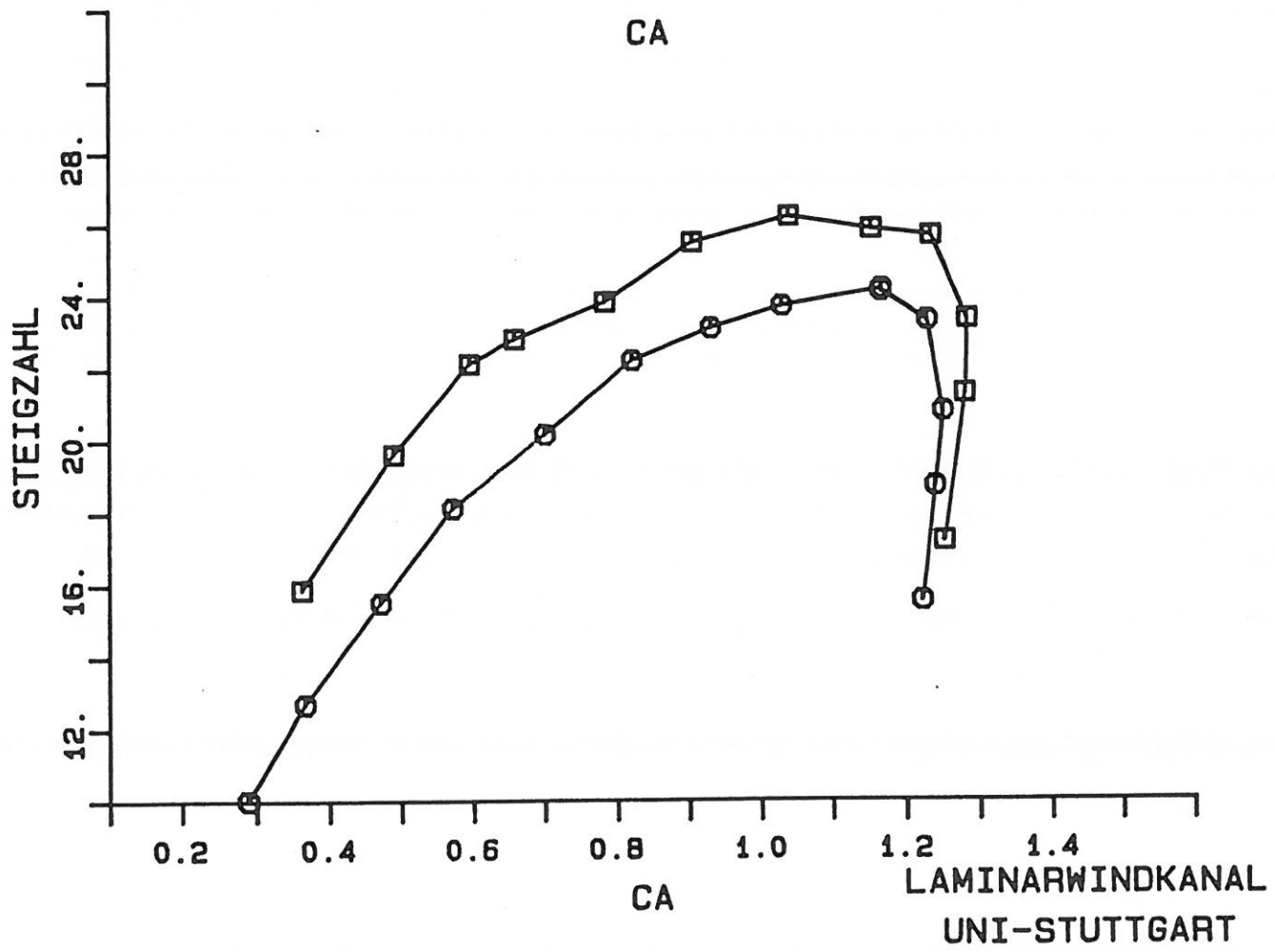
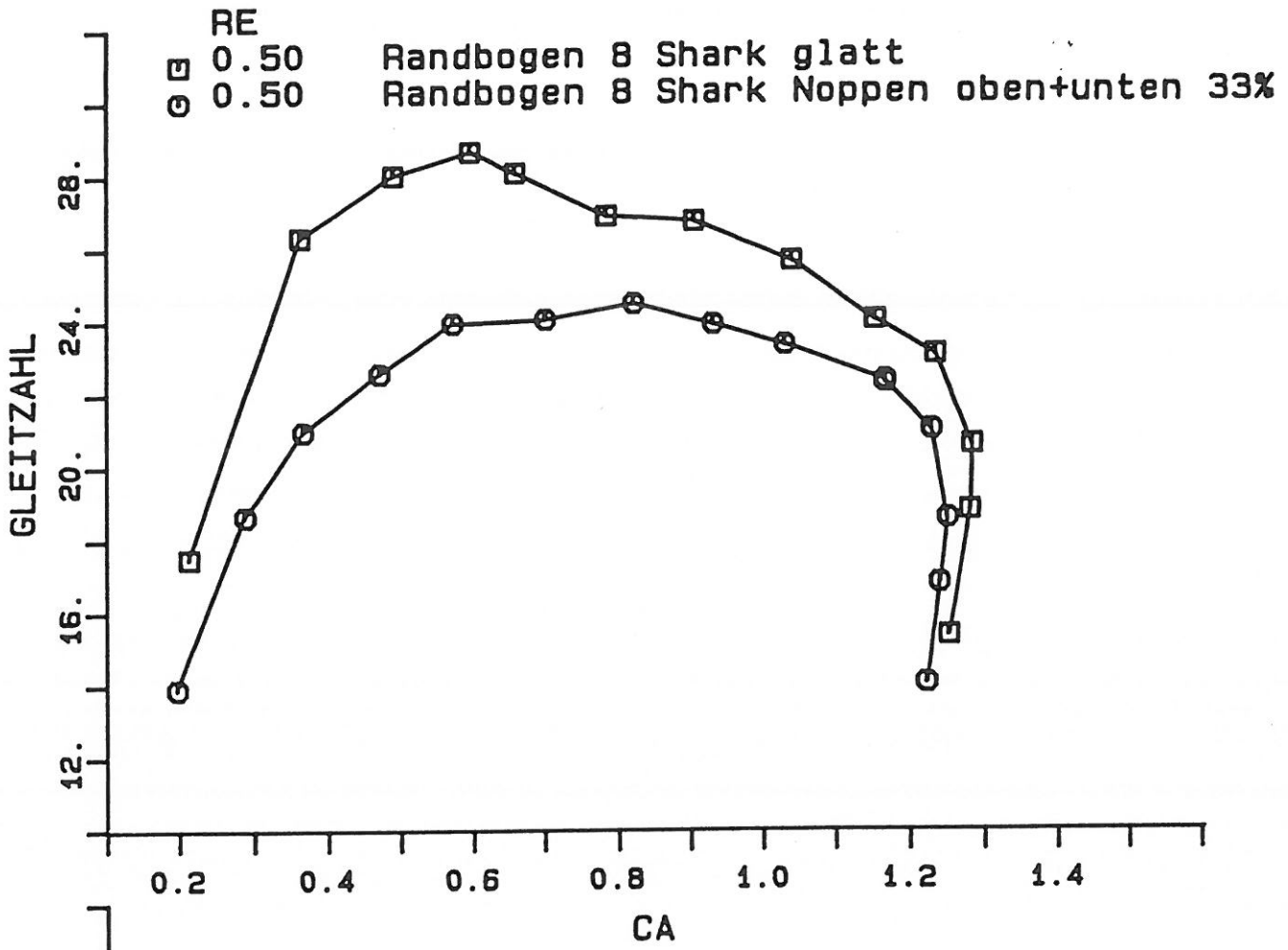




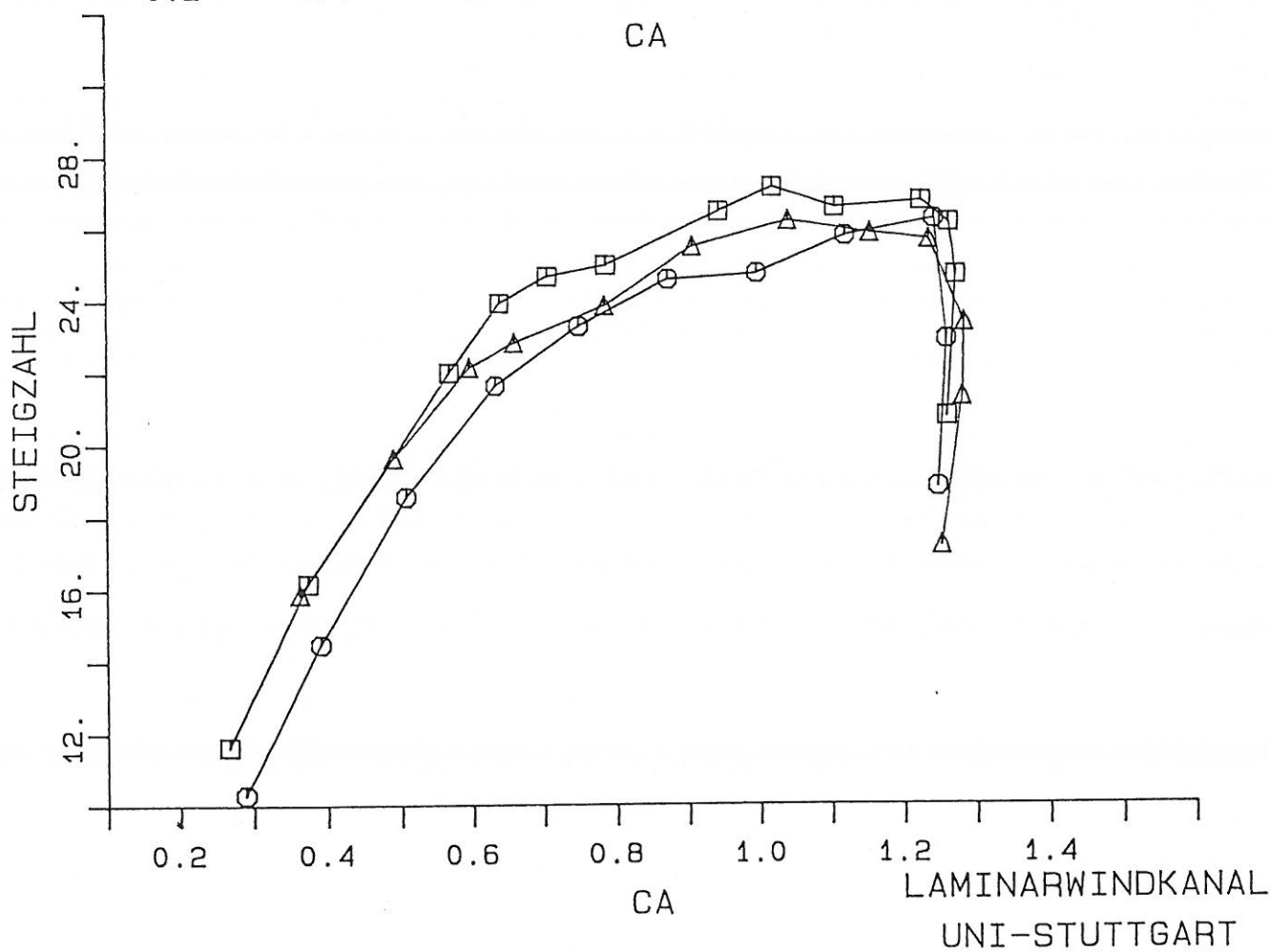
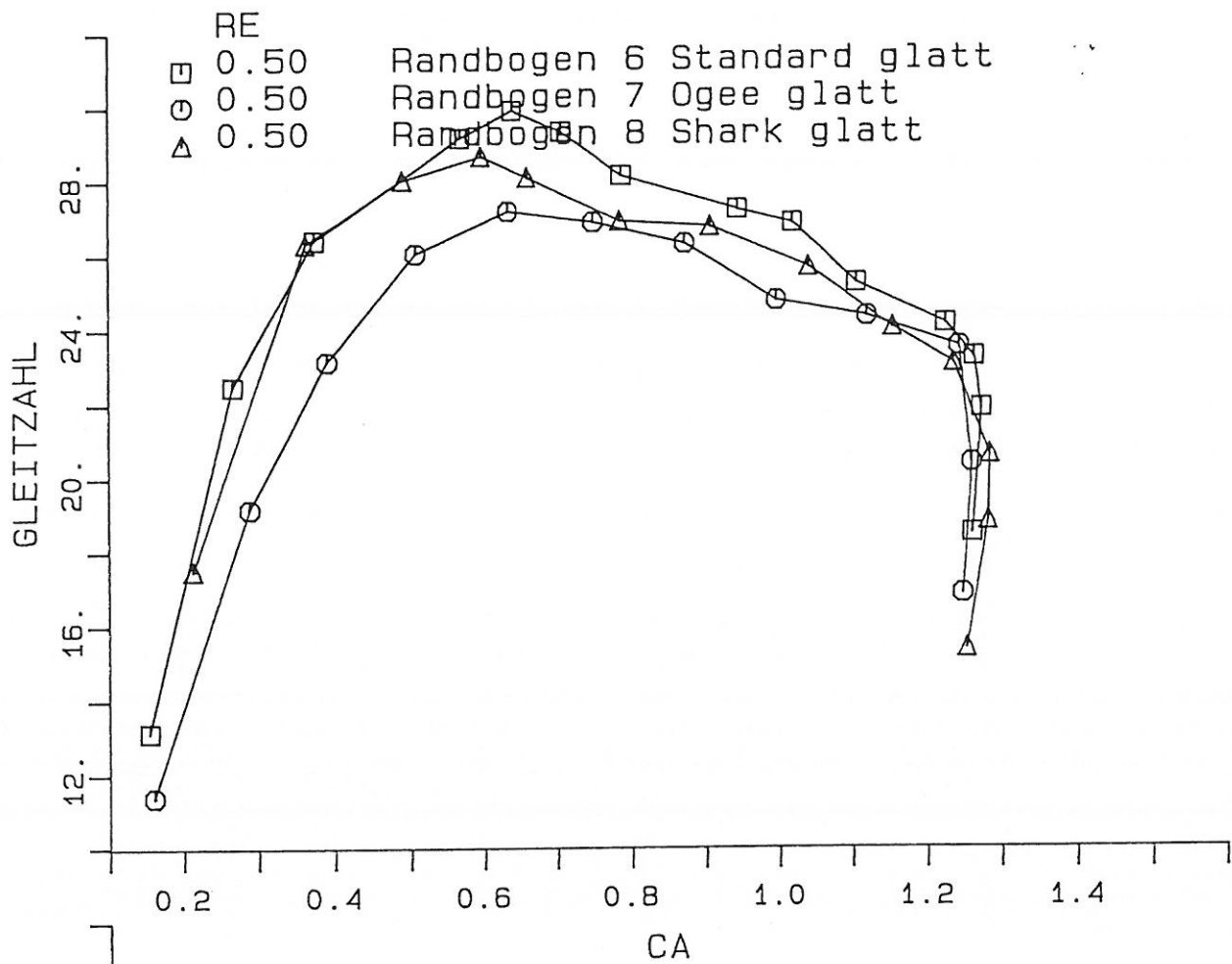


LAMINARWINDKANAL
UNI-STUTT GART





LAMINARWINDKANAL
 UNI-STUTT GART



LAMINARWINDKANAL
UNI-STUTTGART

standard
alfa= 8.0 Re= .4

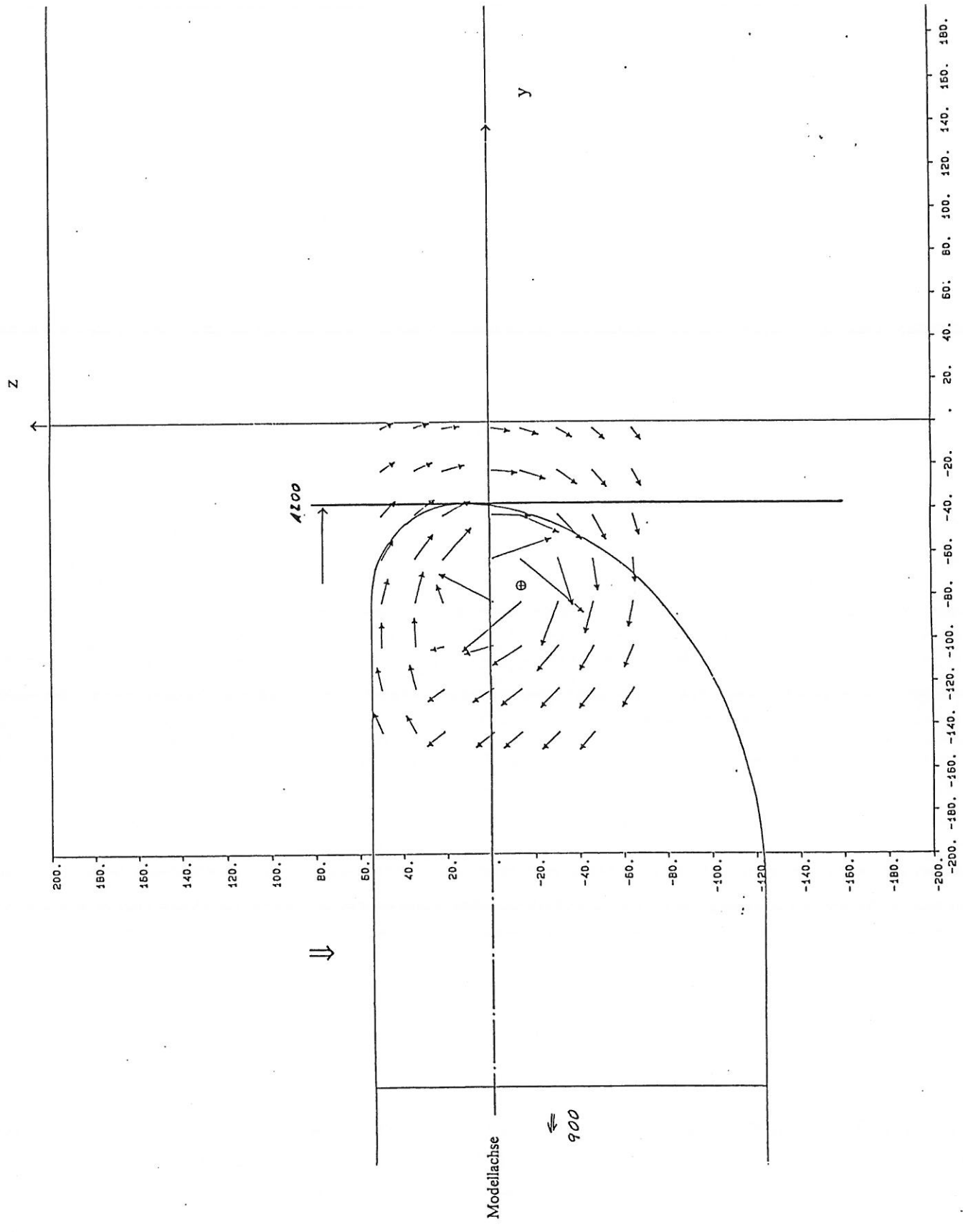


Diagramm 1.17

Laminarwindkanal
Uni-Stuttgart
20.10.94

shark
alpha = 8.0 Re = .4

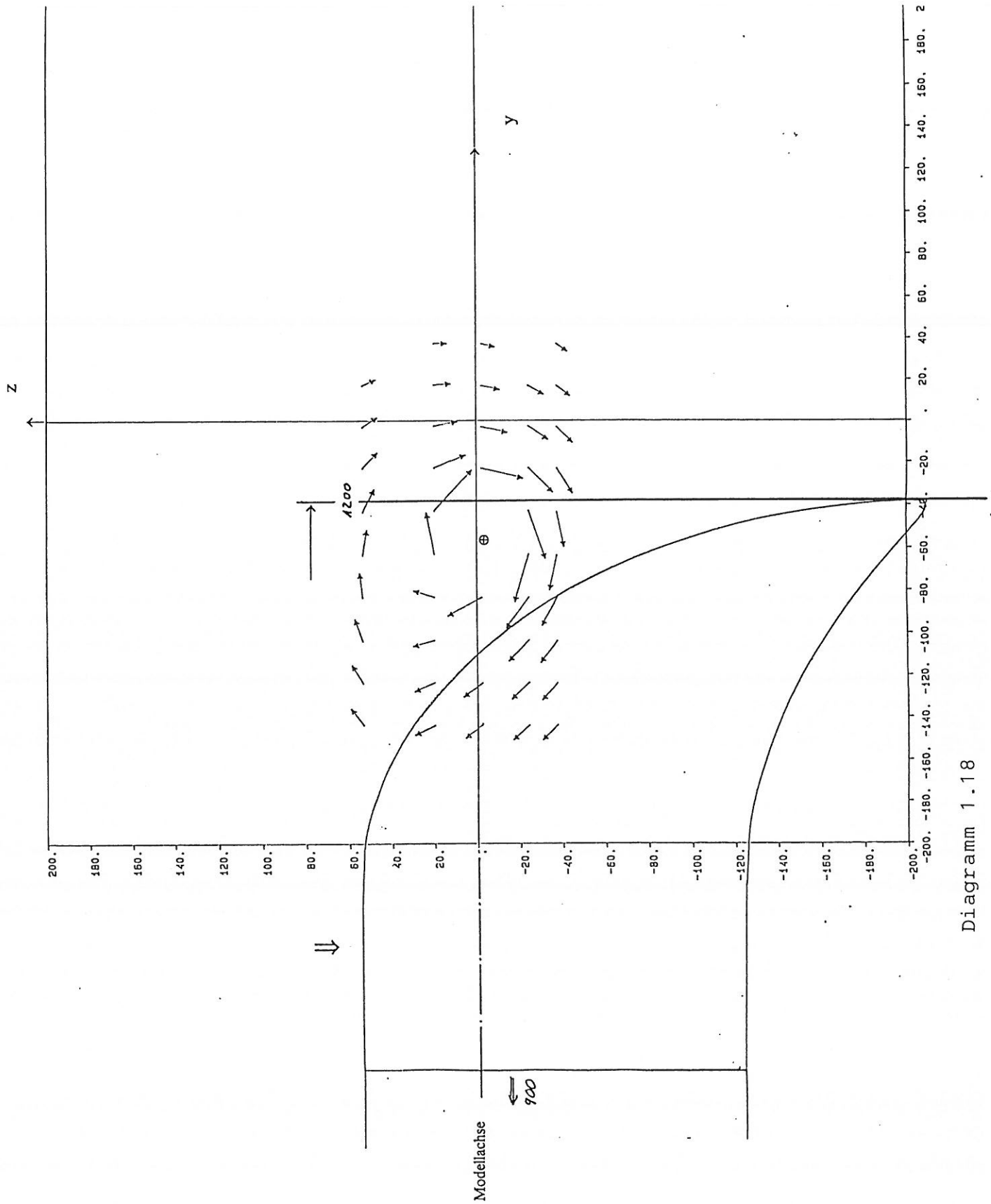
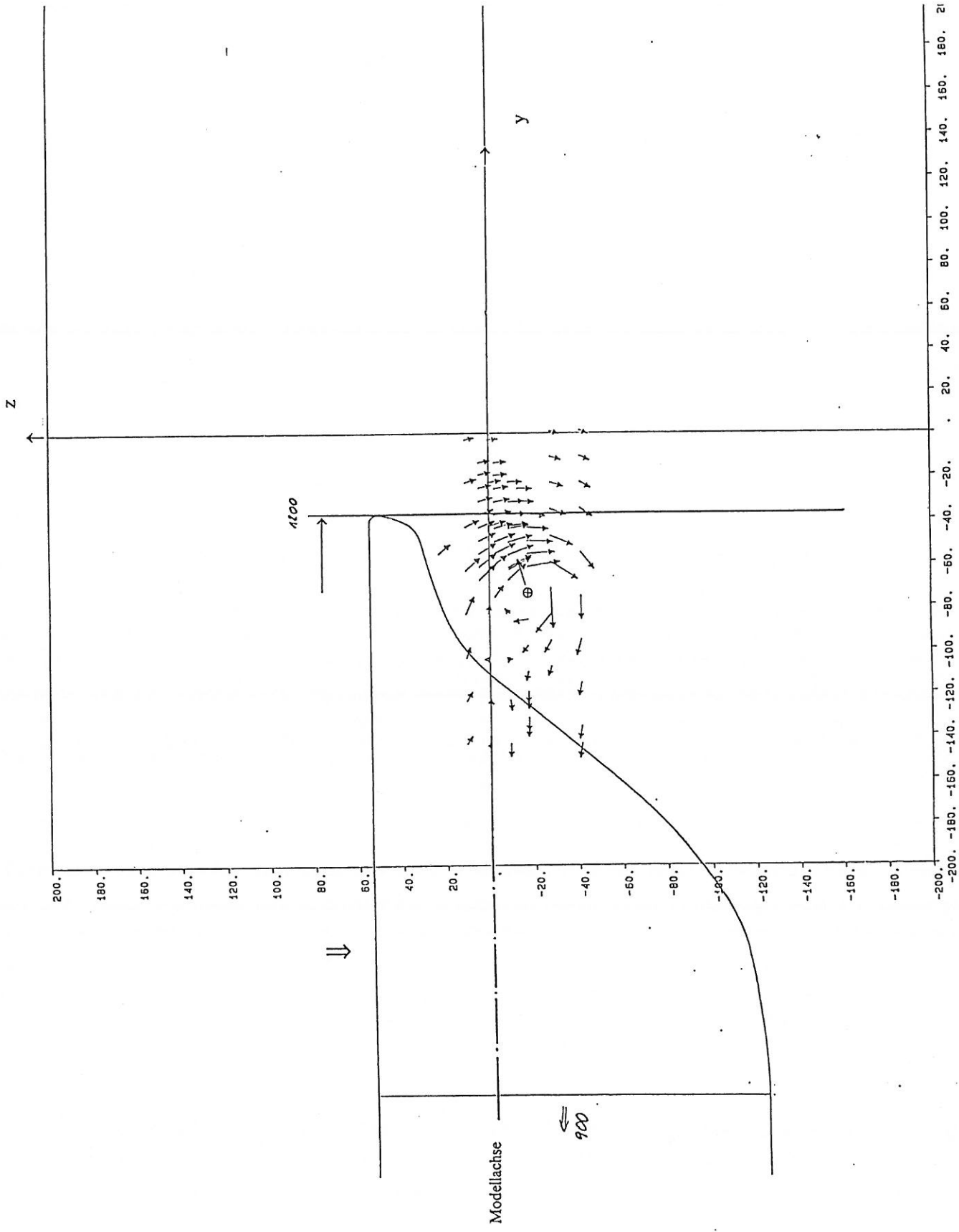


Diagramm 1.18

Laminarwindkanal
Uni-Stuttgart
19.10.94

ogee

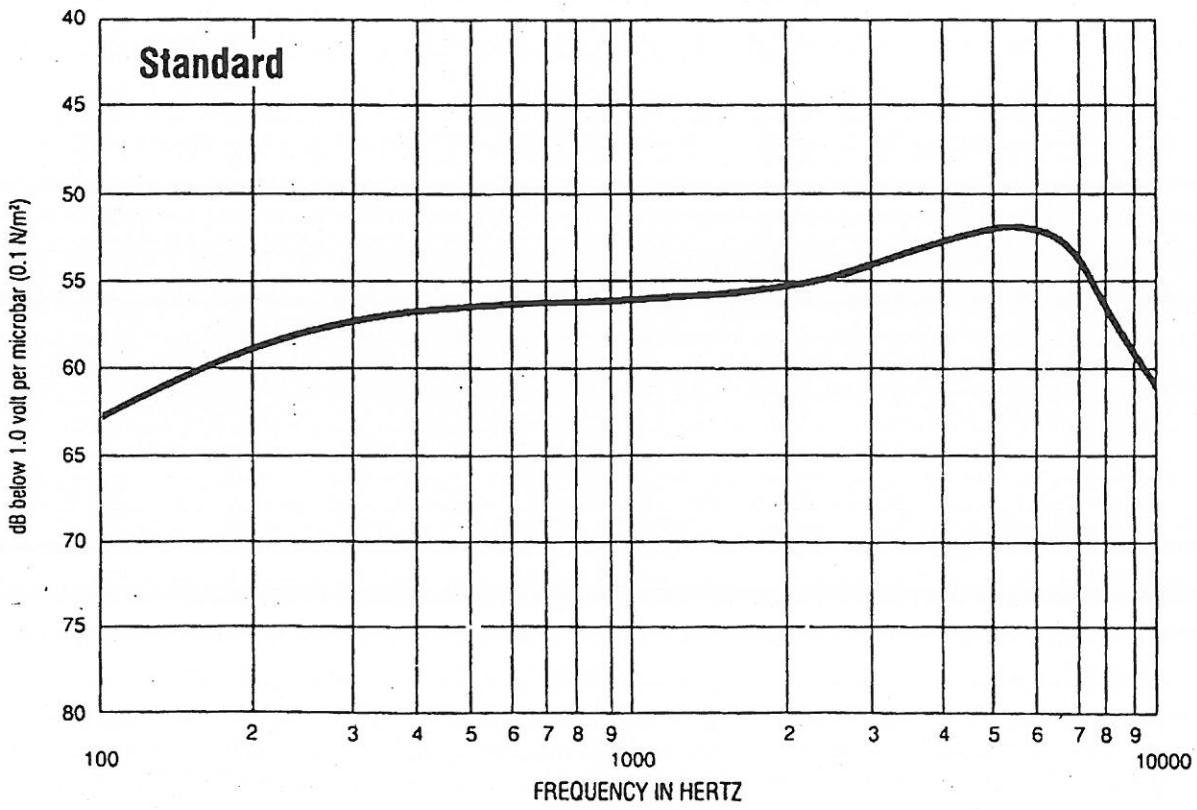
$\alpha = 8.0$ $Re = .4$

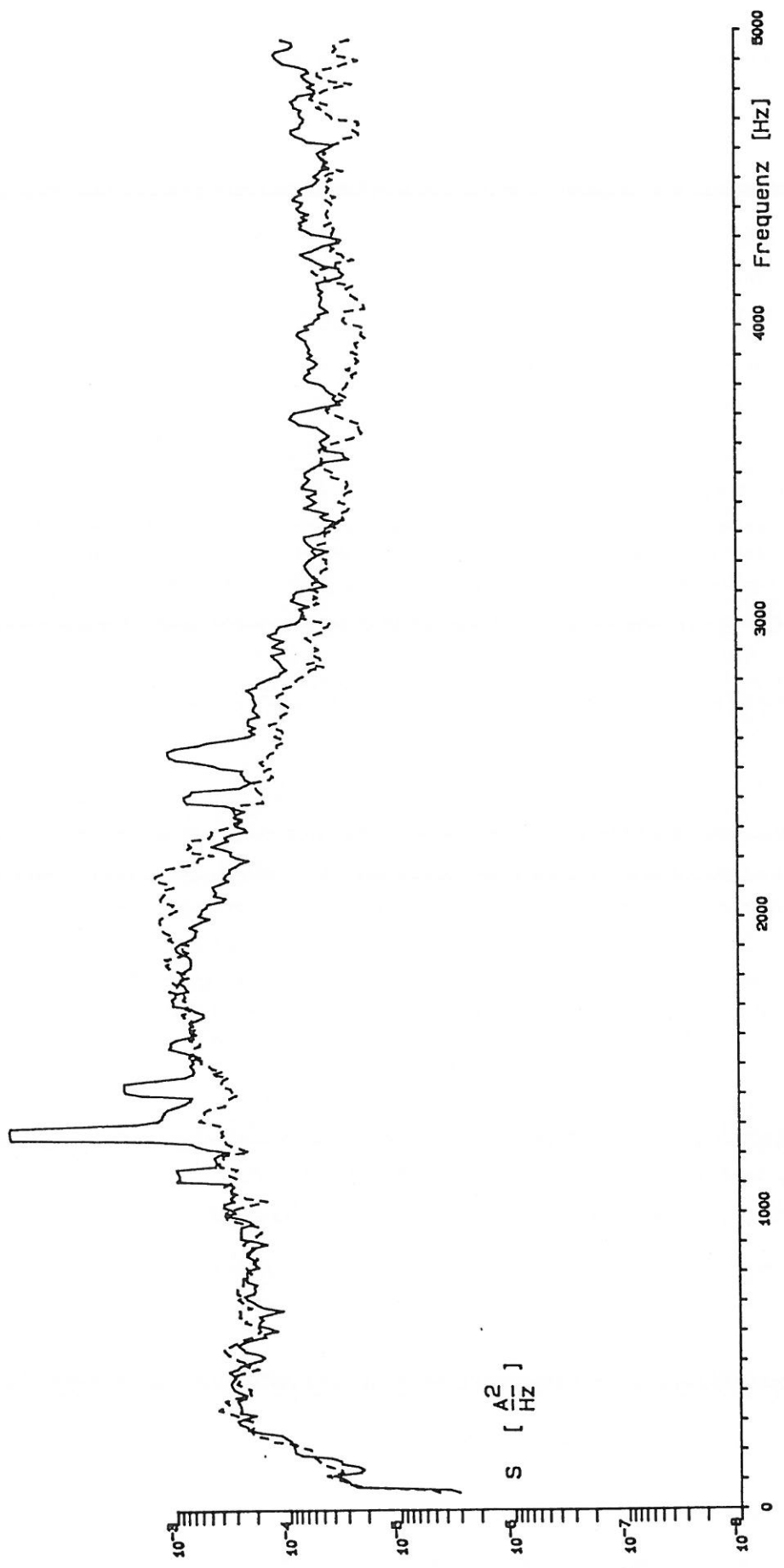


Laminarwindkanal
Uni-Stuttgart
19.10.94

Diagramm 1.19

Typical Response Curve





standard q=60 glatt alfa: -----2 - - -4 Diagramm 2.1

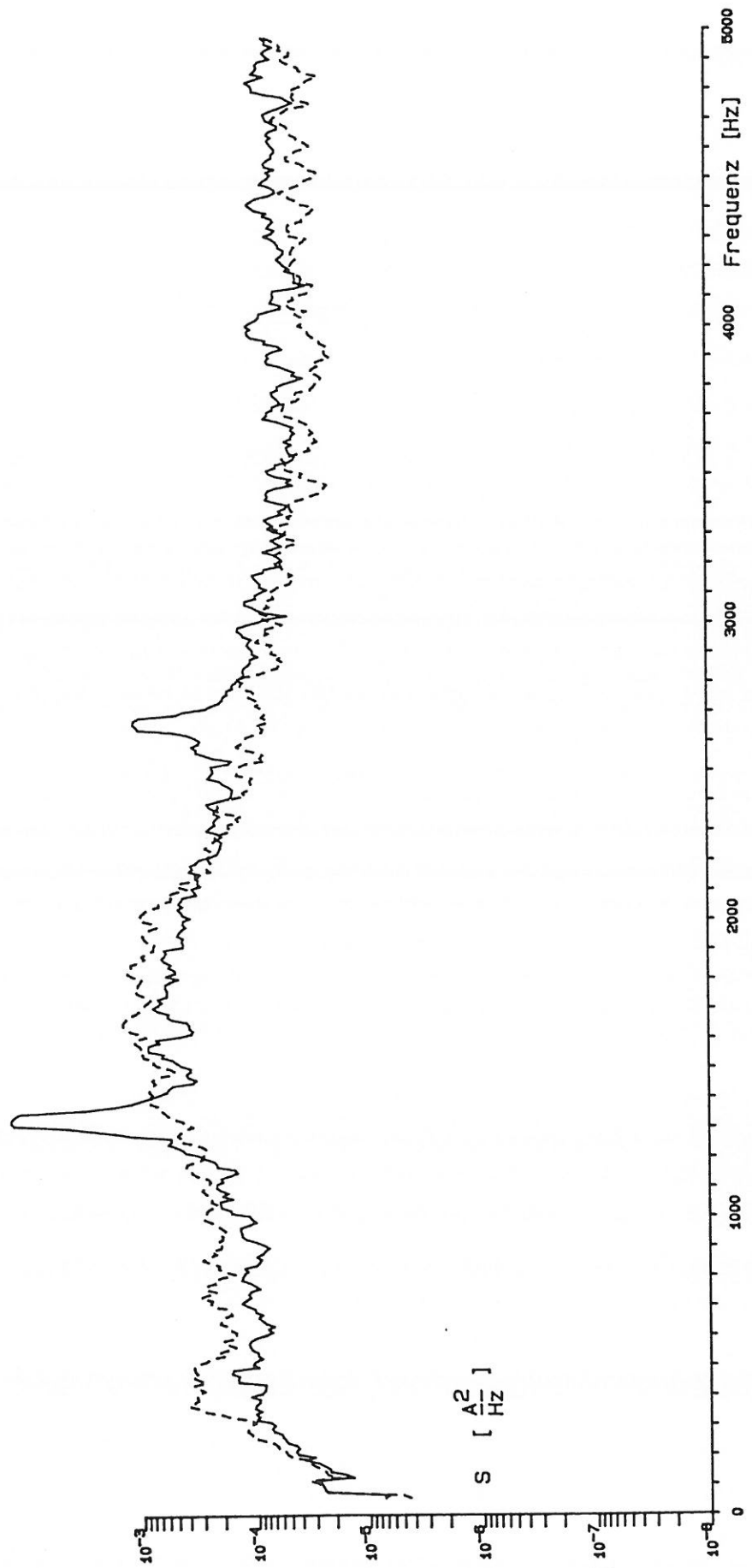


Diagramm 2.2

shark q=60 glatt alfa: -----2 - - -4

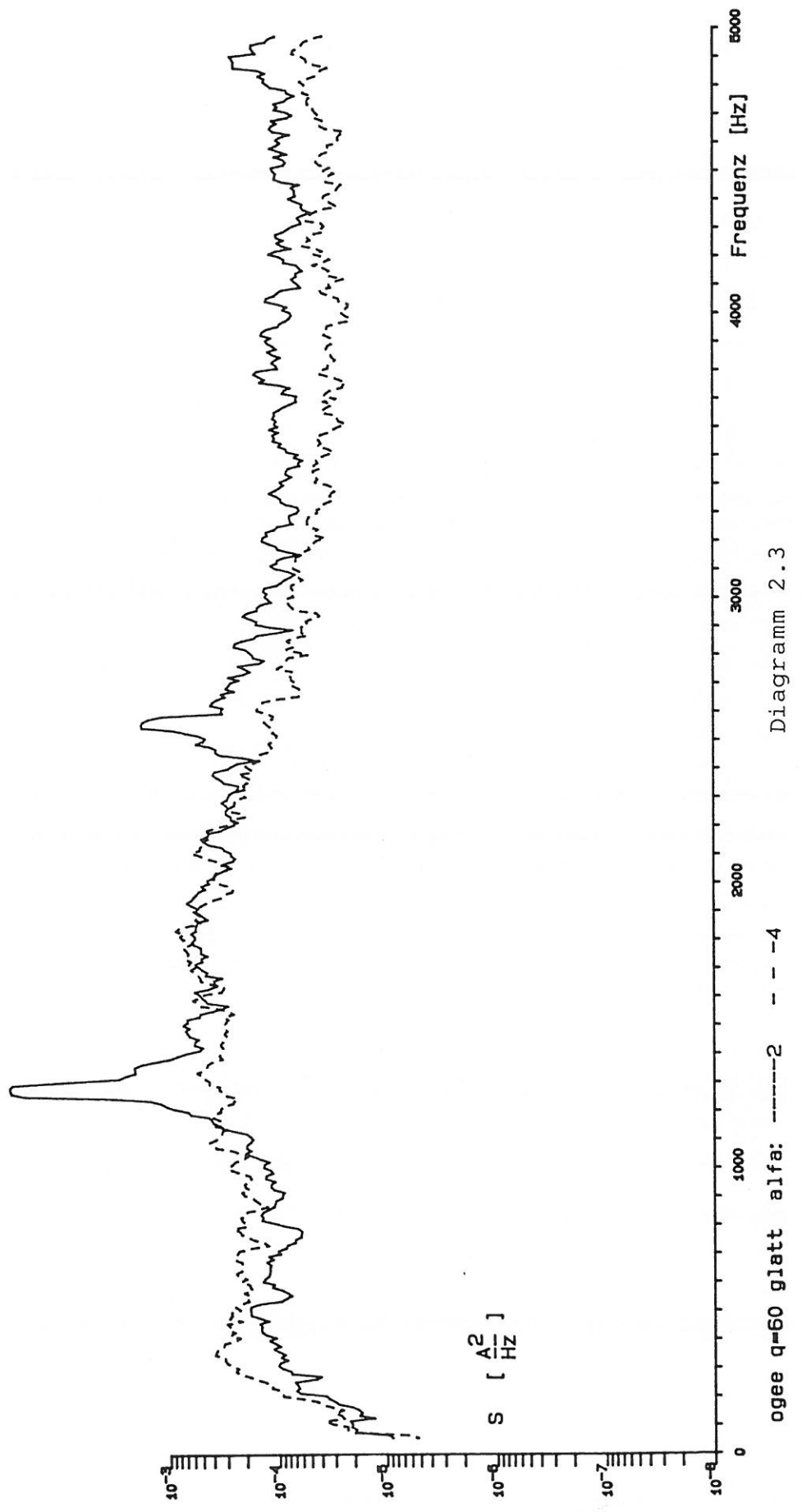


Diagramm 2.3

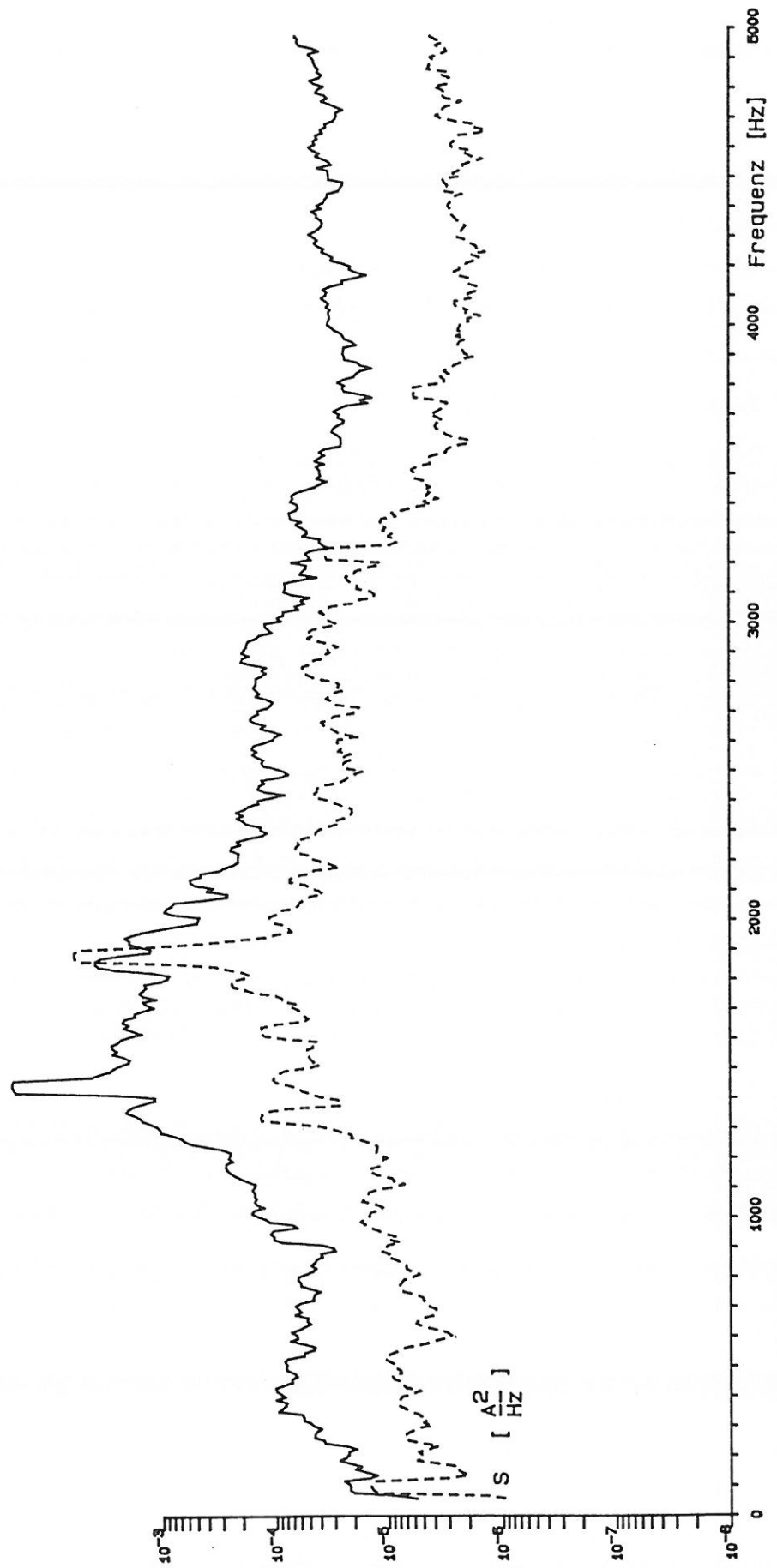


Diagramm 3.1

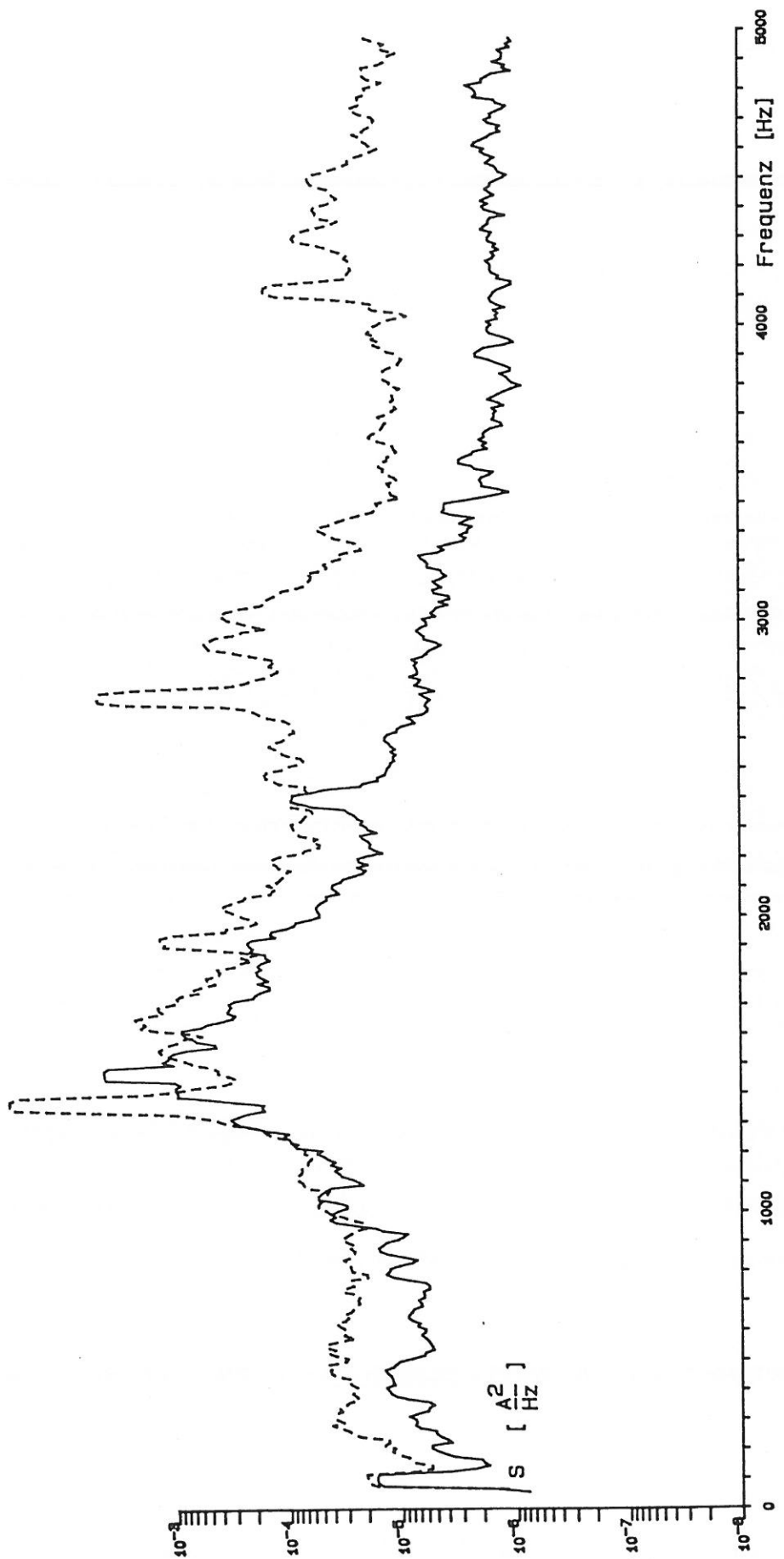


Diagramm 3.2

shark q=100 glatt alpha: -----2 - - -4

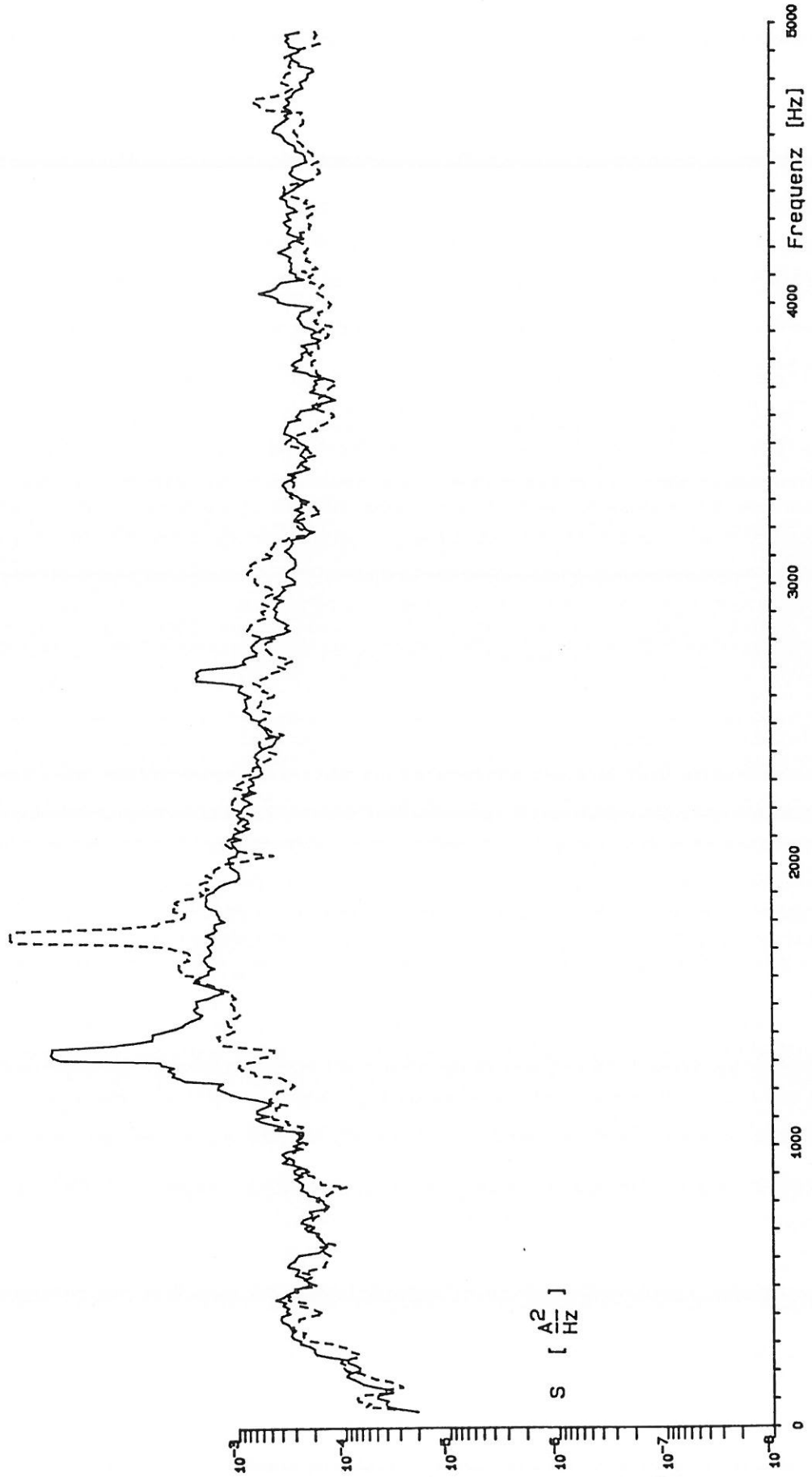
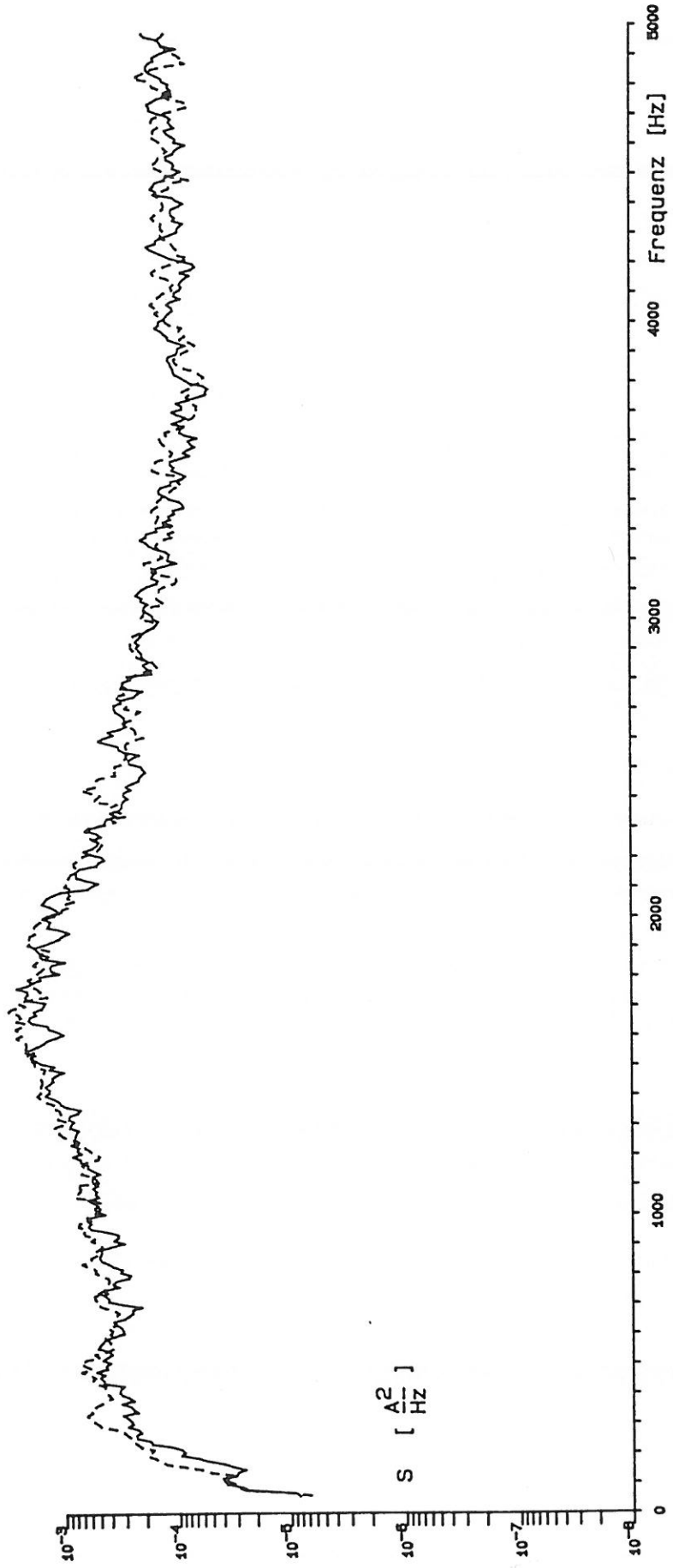


Diagramm 3.3

ogee $q=100$ glatt alfa: -----2 - - -4



S [$\frac{A^2}{Hz}$]

standard q=100 noppen 33% alfa: -----2 - - - -4 Diagramm 4.1

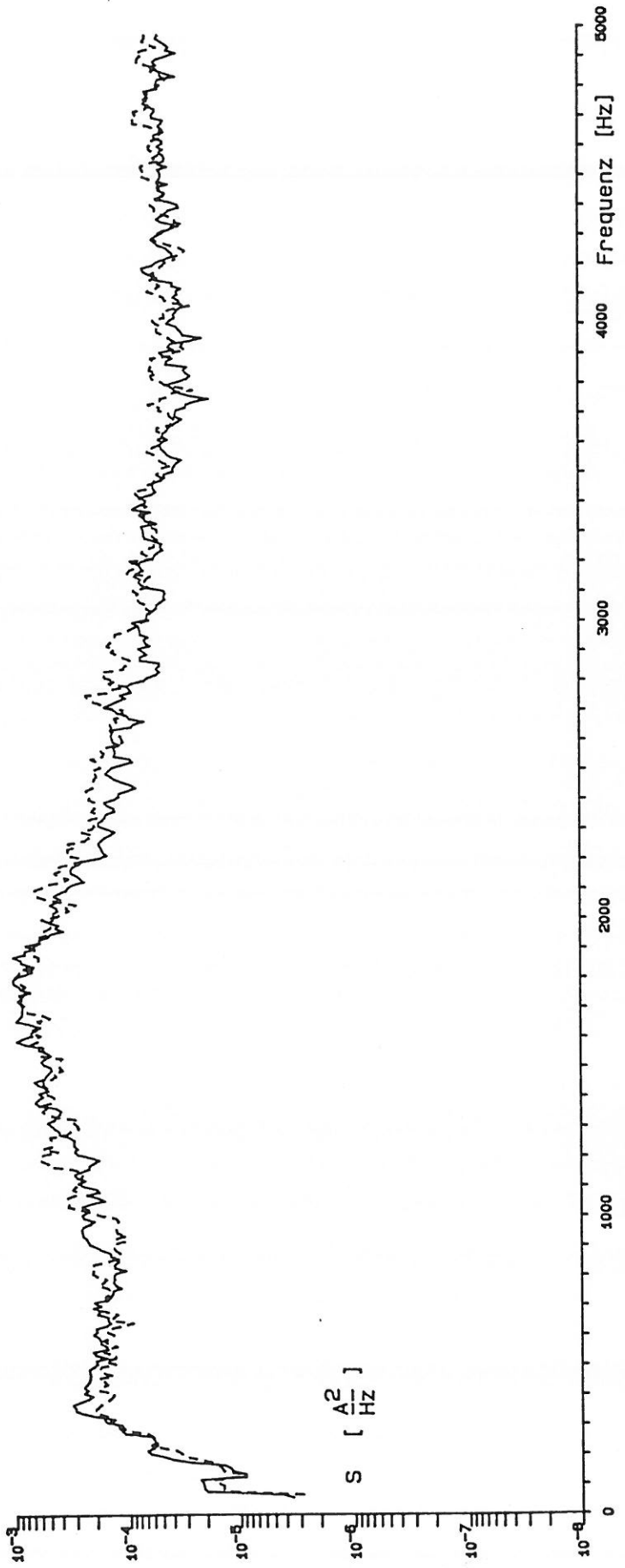
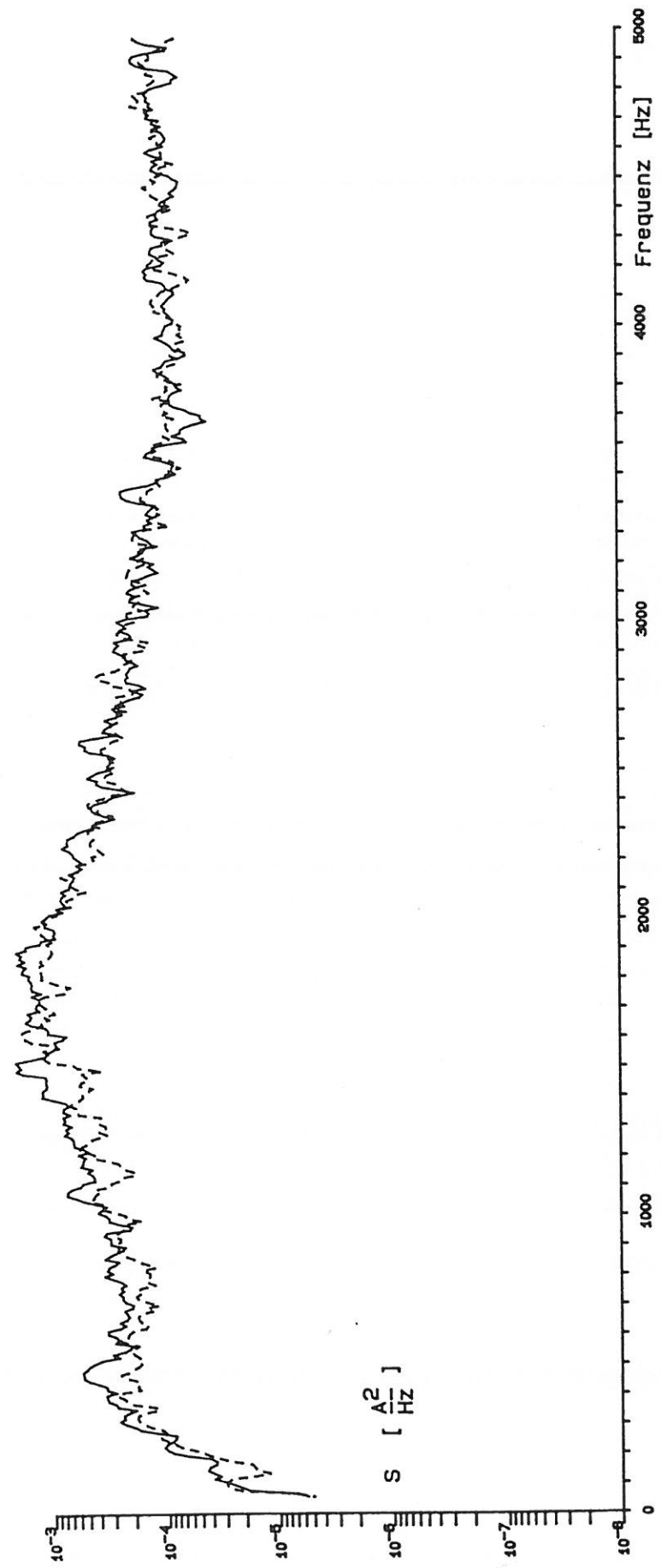
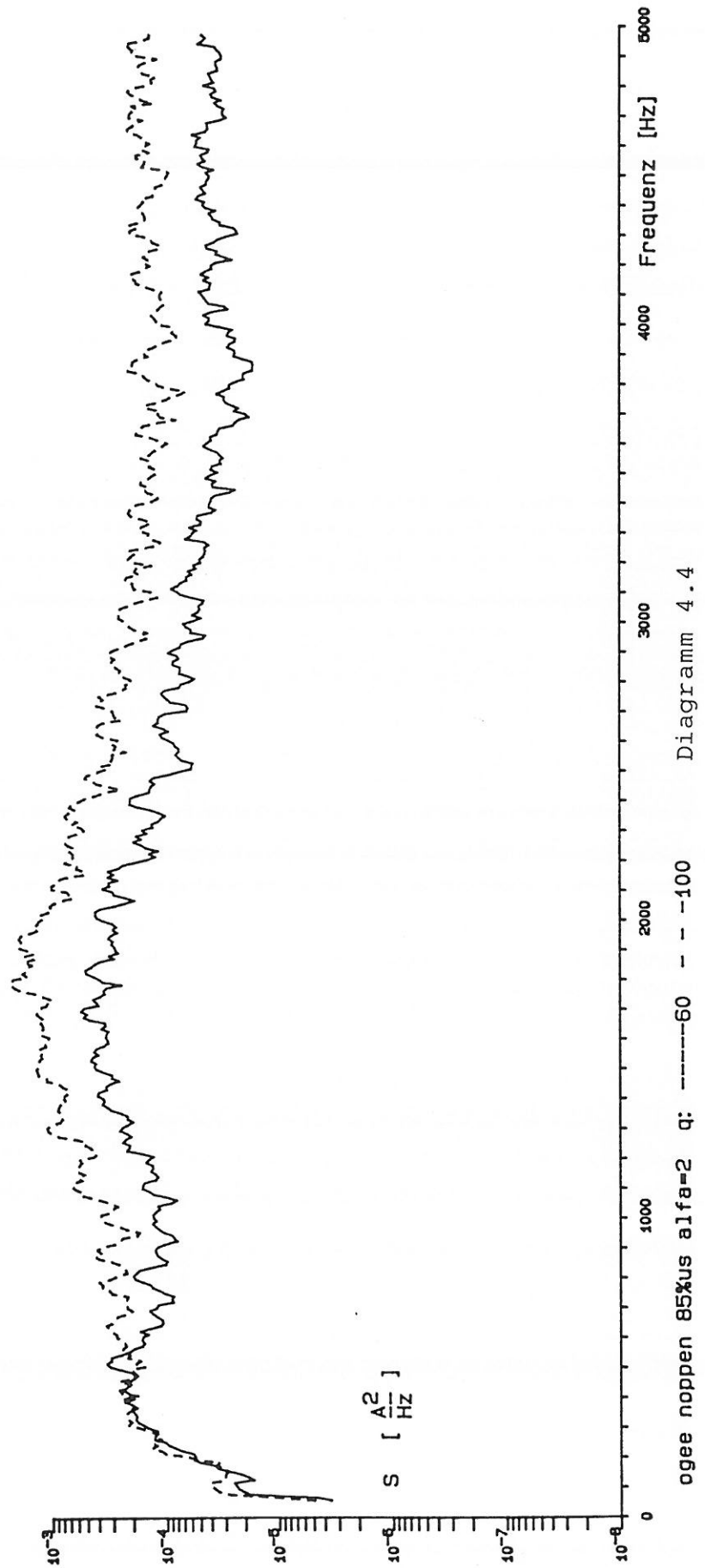
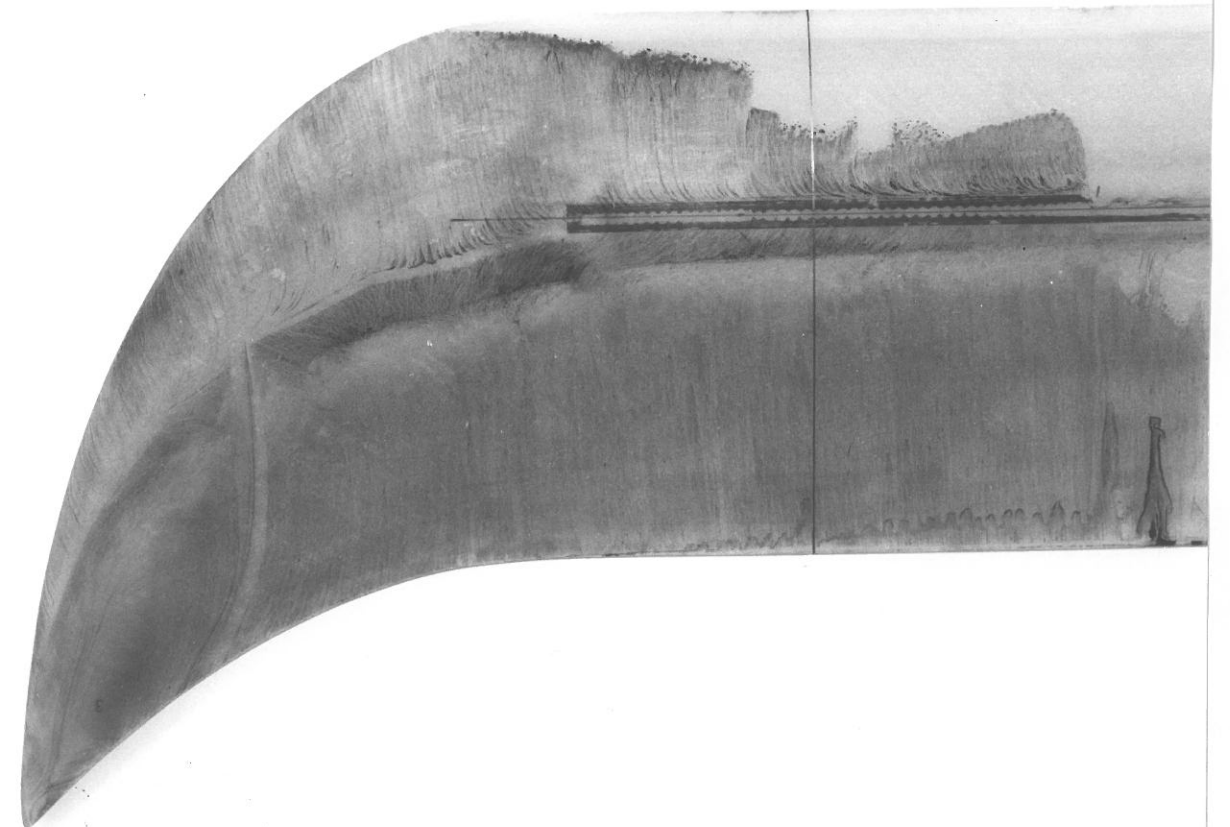
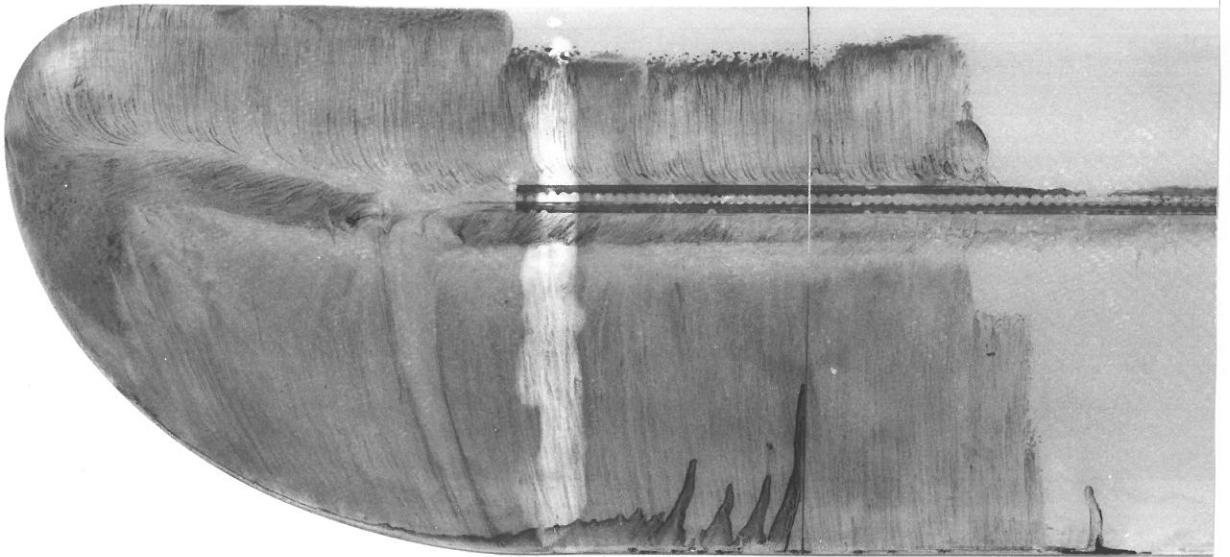
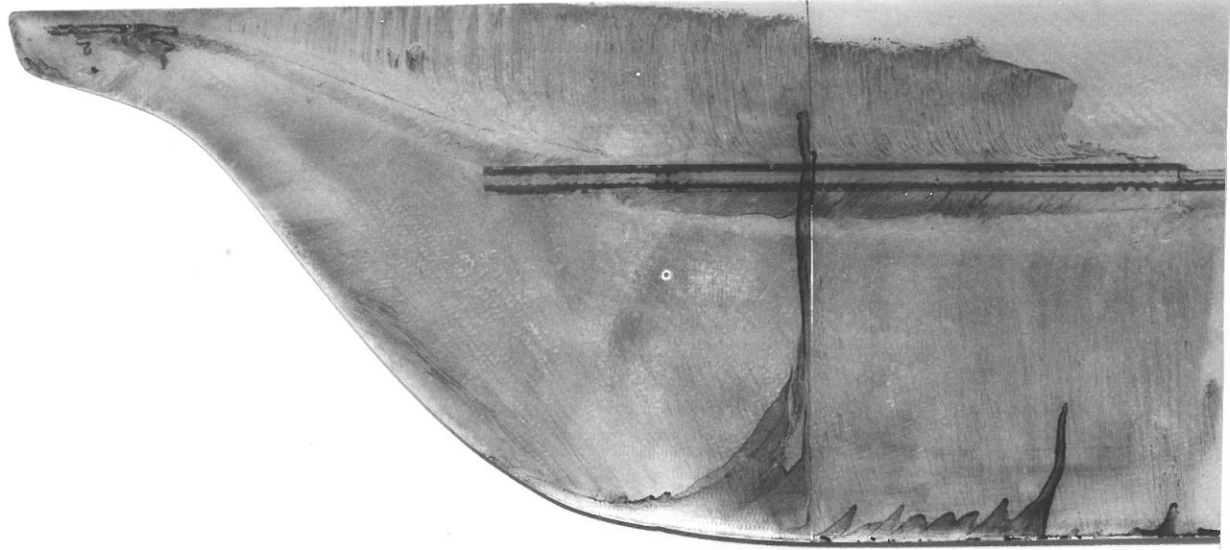


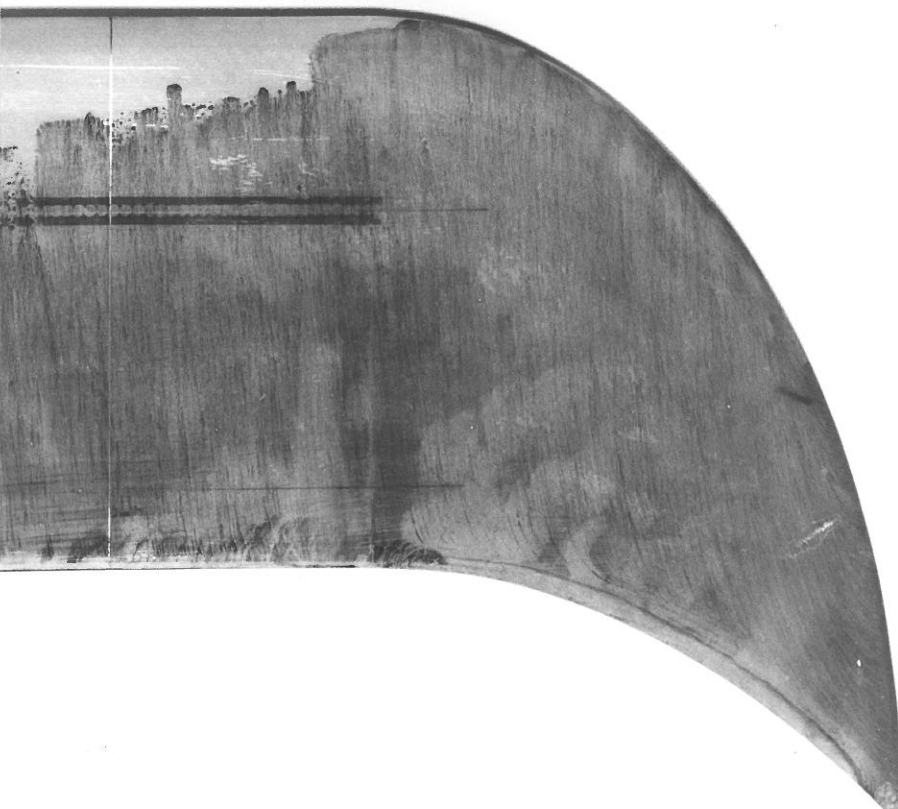
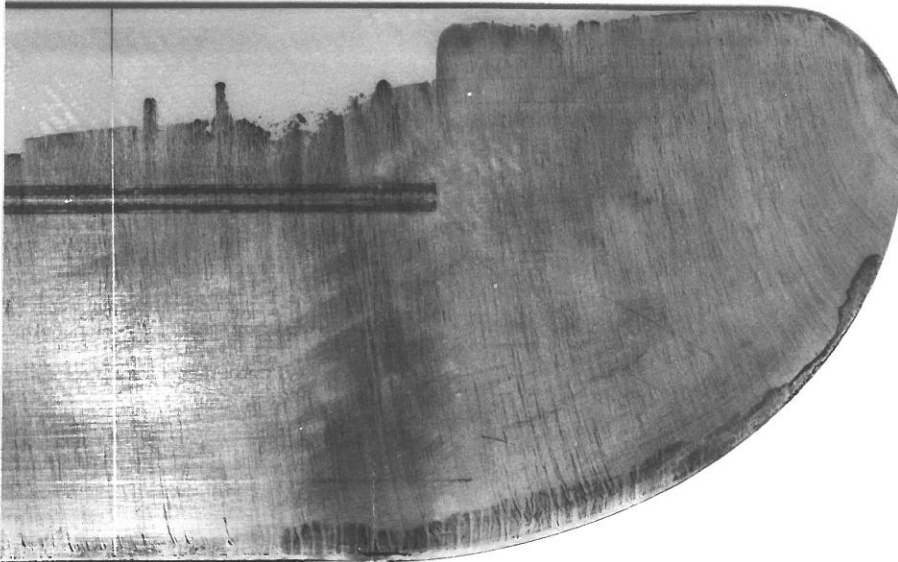
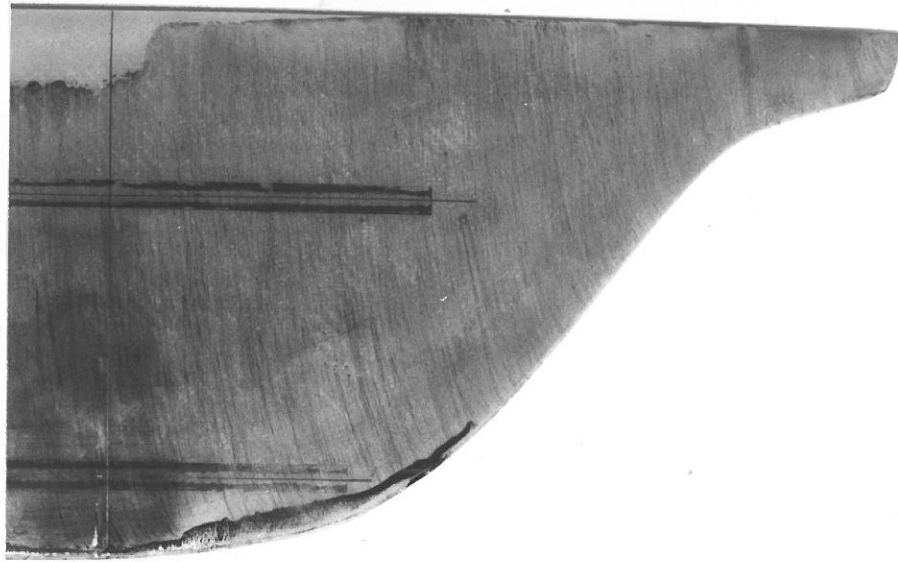
Diagramm 4.2







Petroleum - Rußanstrich auf den Flügeloberseiten; Alfa = 8°



Petroleum - Rußanstrich auf den Flügelunterseiten; Alfa = 8°