



## DER EINFLUSS LAMINARER ABLÖSEBLASEN AUF DIE PROFILPOLAREN

D.Althaus<sup>+</sup>

Im Reynoldszahlbereich des Segelflugs ( $Re \leq 3$  Millionen) weist nahezu jedes Profil laminare Ablöseblasen auf. Um einen kleinen Profilwiderstand zu erzielen, ist man bei Laminarprofilen bemüht, die Grenzschicht möglichst lang laminar zu halten, d.h., die Verzögerung der Geschwindigkeit oder der Druckanstieg darf erst im hinteren Profilteil erfolgen. Wenn die Stabilität der laminaren Grenzschicht beim Übergang zum Druckanstieg noch so groß ist, daß der Umschlag in den turbulenten Strömungszustand noch nicht erfolgen kann, löst sich die Grenzschicht laminar von der Profiloberfläche ab. In der so entstehenden freien Scherschicht kann der Umschlag zur Turbulenz schneller erfolgen als an der Wand, und die Grenzschicht legt sich turbulent wieder an die Wand an. Im Bereich zwischen dem laminaren Ablösepunkt und dem turbulenten Wiederanlegen bildet sich eine sogenannte laminare Ablöseblase, eine Art Totwassergebiet. Sowohl die Länge der Blase als auch ihre Höhe sind eine Funktion der Reynoldszahl, beide Größen bestimmen die Anfangsbedingungen für die nachfolgende turbulente Grenzschicht. Ablöseblasen mit großen Abmessungen haben dicke turbulente Grenzschicht mit entsprechend großem Widerstand und entsprechend großer Ablöseneigung zur Folge. In vielen Fällen ist es jedoch nicht möglich, durch Beseitigung der Blase eine Widerstandsverminderung zu erzielen. Unter den gegebenen Umständen scheint dann eine kleine Blase den optimalen Übergang zur turbulenten Grenzschicht zu gewährleisten.

---

<sup>+</sup> vorgetragen beim "Symposium für Segelflugzeugentwicklung 1984"

Wie sich relativ große laminare Ablöseblasen auf die Form der Profilpolaren auswirken, soll an einem speziell für solche Untersuchungen entworfenen Profil demonstriert werden. Es handelt sich um ein 15% dickes starres Profil mit einer laminaren Laufstrecke von 66% an der Oberseite und 75% an der Unterseite. Das Diagramm 1 zeigt die Profilkontur sowie die Geschwindigkeitsverteilung für verschiedene Anstellwinkel und die gemessene Profilpolare. Infolge der langen laminaren Laufstrecken muß auf beiden Profilseiten auf kurzer Laufstrecke eine starke Verzögerung der Geschwindigkeit bis zur Hinterkante erfolgen. Dadurch entstehen auf beiden Profilseiten große laminare Ablöseblasen.

Die drei im Diagramm 1 dargestellten Geschwindigkeitsverteilungen entsprechen (entsprechend der Numerierung) dem mittleren, dem unteren und dem oberen Teil der Profilpolaren. Die beim glatten Profil gemessene Polare für  $Re = 0,7$  Millionen weist im mittleren Teil eine starke Einbuchtung auf, das obere und das untere Eck der Laminardelle springen deutlich hervor. Bei der dem mittleren Polarenbereich entsprechenden Geschwindigkeitsverteilung Nr.1 wird die Grenzschicht auf beiden Profilseiten bis zum Druckanstieg beschleunigt, dadurch bilden sich lange laminare Ablöseblasen aus, die den entsprechend großen Widerstand verursachen. An der Profiloberseite entsteht eine Blase von 63% bis 76% der Profiltiefe. Für  $c_a$ -Werte kleiner als 0,3 verringert sich der Profilwiderstand. Dies rührt daher, daß sich mit kleiner werdendem Anstellwinkel die Instabilität der Grenzschicht auf der Unterseite vergrößert. Die Blase wird kürzer und verschwindet schließlich im Minimum des Widerstands nahezu ganz (siehe die dazugehörige Geschwindigkeitsverteilung Nr.2).

Mit zunehmendem Anstellwinkel oder  $c_a$  geschieht auf der Oberseite dasselbe. Wie die Geschwindigkeitsverteilung Nr.3 zeigt, ist jetzt ab 25% der Tiefe ein Druckanstieg vorhanden, der die Blase verkürzt. Beim Widerstandsminimum im oberen Delleneck erfolgt schließlich der Übergang zur turbulenten Grenzschicht an der Oberseite unter optimalen Bedingungen.

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen Petroleum-Ruß-Aufnahmen für das Profil beim Anstellwinkel  $0^\circ$ , im Bereich 1 der Polaren bei  $Re = 0,7$  Millionen. Auf der Oberseite (Abb.1) ist eine Blase von 63% bis 76%, auf der Unterseite (Abb.2) eine Blase von 73% bis 88% zu erkennen. Die Abb.3 zeigt einen Petroleum-Ruß-Anstrich der Profiloberseite für  $\alpha = 5^\circ$  für  $Re = 0,7$  Millionen mit einer Blase von 62% bis 69% der Tiefe. Auf der Abb.4 ist die Reynoldszahl auf 1 Million erhöht, die Blase verkürzt sich von 62% bis 66%. Die Abb.5 zeigt einen Petroleum-Ruß-Anstrich der Profilunterseite bei  $\alpha = -1,5^\circ$  entsprechend einem  $c_a$  von 0,2. Bei  $Re = 0,7$  Millionen ist eine Blase von 74% bis 83% der Tiefe vorhanden.

Im Diagramm 2 wird demonstriert, wie sich die Profilpolaren verändern, wenn die Blase entweder an der Unterseite und/oder an der Oberseite durch Turbulatoren beeinflusst wird. Die Art der Turbulatoren, seien es Noppenbänder, eine pneumatische Ausblasung, ein Stolperdraht oder Zackenbänder, spielt dabei keine Rolle. Sie bewirken, sofern sie an der richtigen Stelle und in der richtigen Dosierung eingesetzt werden, daß der Umschlag zur turbulenten Strömungsform früher erfolgt, d.h., die Blase wird verkürzt oder eventuell ganz beseitigt. Auf der linken Seite des Diagramms 2 ist die Auswirkung von Noppenbändern an der Profilunterseite dargestellt. Zum Vergleich sind die am glatten Profil gemessenen Polaren gestrichelt eingezeichnet. Bei allen Reynoldszahlen bleibt der am glatten Profil gemessene Minimalwiderstand am unteren Delleneck erhalten, im übrigen Dellenbereich verringert sich der Widerstand. Die Polaren haben einen nahezu geradlinigen Verlauf. Verbesserungen an der Profilunterseite wirken sich also bis zum oberen Delleneck aus. Auch bei  $Re = 2,5$  Millionen verringert sich der Widerstand im oberen Dellenbereich noch geringfügig.

Auf der rechten Seite des Diagramm 2 ist die Wirkung von Turbulatoren an der Profiloberseite dargestellt. Gegenüber dem glatten Profil verringert sich der Widerstand am unteren Eck der Delle nur für  $Re = 1$  Million, am oberen Eck der Delle wird der Widerstand

geringfügig größer. Bei der Reynoldszahl  $Re = 2,5$  Millionen ist der Widerstand im ganzen Dellenbereich größer. Nach allen meinen Erfahrungen ist es sehr schwierig und nur in ganz wenigen Fällen möglich, durch Turbulatoren an der Profiloberseite im ganzen Dellen- und Reynoldszahlbereich Widerstandsverringern zu erzielen.

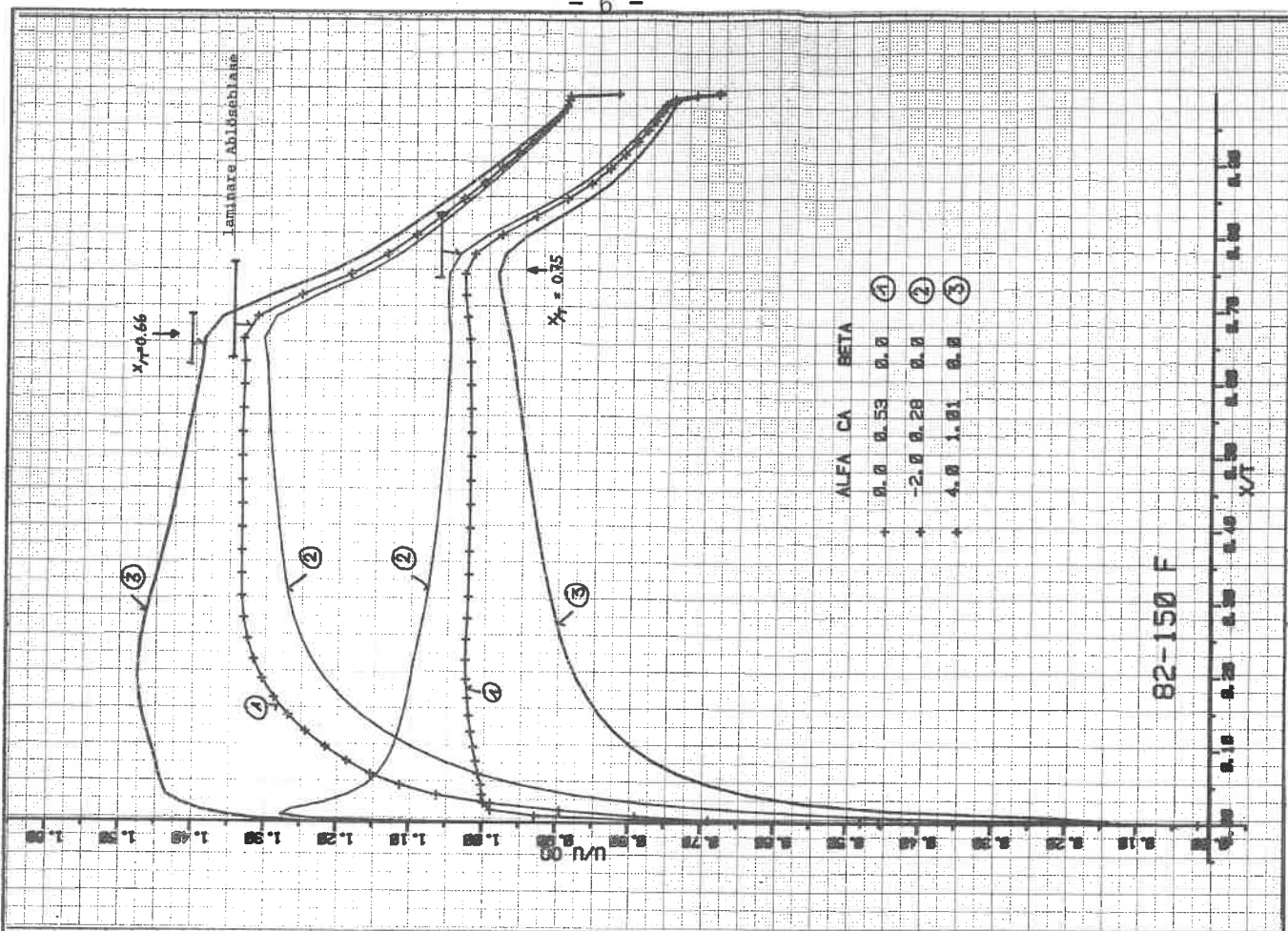
Im Diagramm 3 ist auf der linken Hälfte der Einfluß der Noppen an Profilunter- und -oberseite bei  $Re = 0,7$  Millionen dargestellt. Durch die Beeinflussung der laminaren Ablöseblasen kann gegenüber der Polaren des glatten Profils bei dieser Reynoldszahl eine beträchtliche Widerstandsverringern erzielt werden. Auch bei  $Re = 1$  Million verringert sich der Profilwiderstand infolge der Turbulatoren. Bei der Reynoldszahl  $Re = 1,5$  Millionen im Diagramm 4 erhöht sich der Profilwiderstand, mit Noppen an der Profiloberseite geringfügig. Bei  $Re = 2,5$  Millionen weist die Polare mit Noppen an der Profilunterseite den geringsten Widerstand auf. Im Diagramm 5 sind die Polaren mit den Turbulatoren für die verschiedenen Reynoldszahlen aufgezeichnet. Gegenüber den am glatten Profil gemessenen Polaren (Diagramm 1) ist der Verlauf des Profilwiderstands innerhalb der Delle geradlinig, lediglich bei  $Re = 0,7$  Millionen ist noch ein Widerstandseinbruch am unteren Delleneck zu beobachten. Dieser kann beseitigt werden, wenn der Turbulator an der Profilunterseite geringfügig nach vorne versetzt wird, jedoch muß dann bei  $Re = 2,5$  Millionen unter Umständen eine Widerstandszunahme in Kauf genommen werden.

Das Beispiel dieses Profils 82-150 F zeigt, daß durch lange laminare Laufstrecken an der Profilober- und -unterseite nicht ohne weiteres ein geringer Profilwiderstand erzielt werden kann. Im Diagramm 6 ist ein Vergleich des Profils 82-150 F mit dem ebenfalls 15% dicken Profil 82-150 D dargestellt. Beide Profile haben an der Unterseite identische Geschwindigkeitsverteilungen, auch an der Profiloberseite sind die Geschwindigkeiten im vorderen Bereich nahezu gleich. Der Druckanstieg des Profils 82-150 D beginnt jedoch bereits bei 60% der Tiefe gegenüber 66% der Tiefe beim

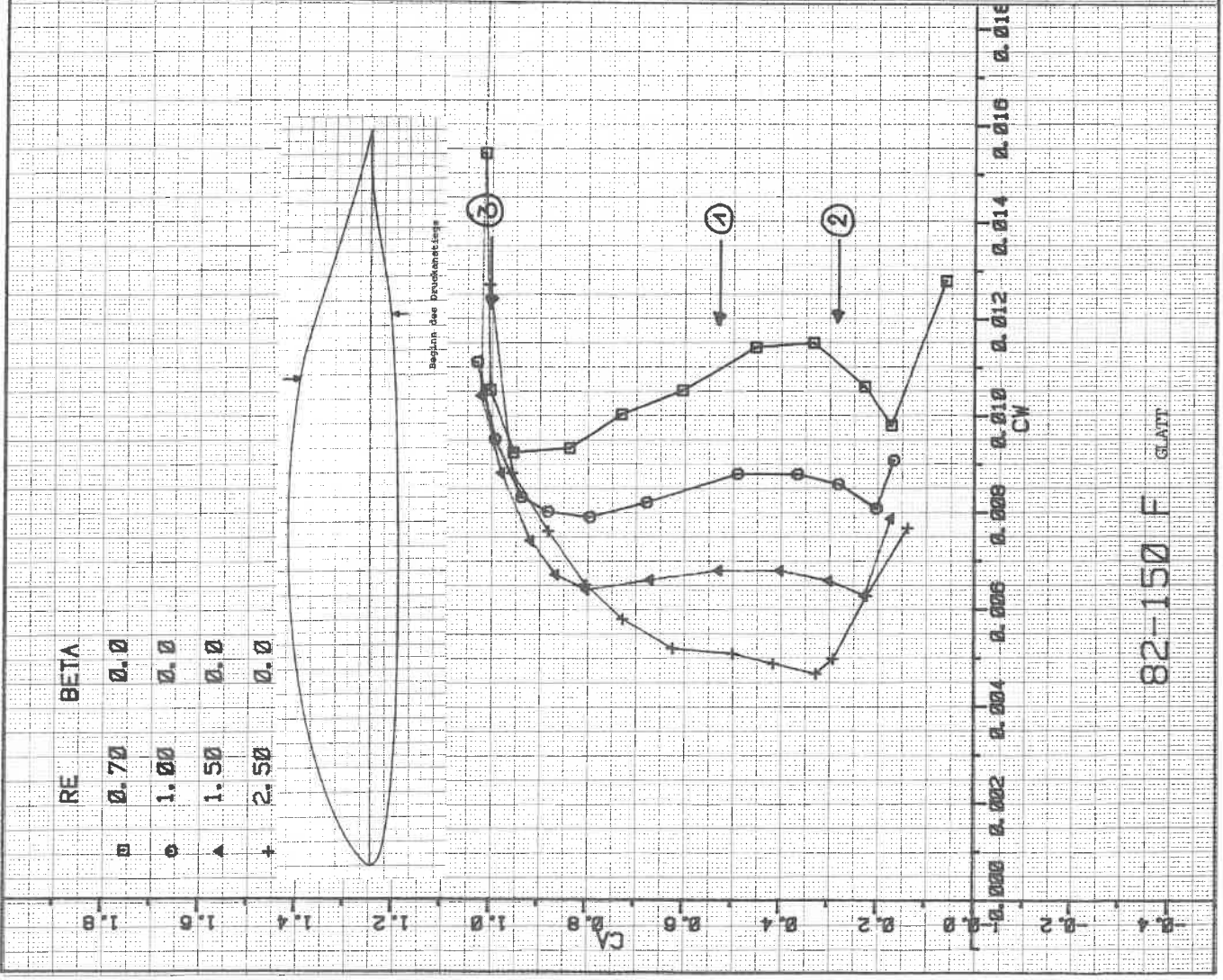
Profil 82-150 F. Dies bedeutet zwar eine kürzere laminare Laufstrecke, jedoch ist der Übergang zum Druckanstieg sanfter und der Druckanstieg insgesamt schwächer. Die Polare für  $Re = 1$  Million zeigt, daß das Profil 82-150 D nahezu im gesamten Bereich der Delle einen geringeren Profilwiderstand besitzt, außerdem erstreckt sich infolge des schwächeren Druckgradienten die Laminardelle bis zu höheren  $c_a$ -Werten. Auch an der Profilunterseite könnte die laminare Laufstrecke verkürzt werden, ohne, daß der Profilwiderstand zunimmt. Der Einsatz von Turbulatoren wäre dann unnötig.

Die hier angeführten Beispiele sollen zeigen, welchen Einfluß laminare Ablöseblasen an der Ober- und/oder Unterseite auf den Profilwiderstand haben und welche Verbesserungen durch Beeinflussung der Blasen durch Turbulatoren oder durch geeignete Wahl der Druckverteilung erzielt werden können.

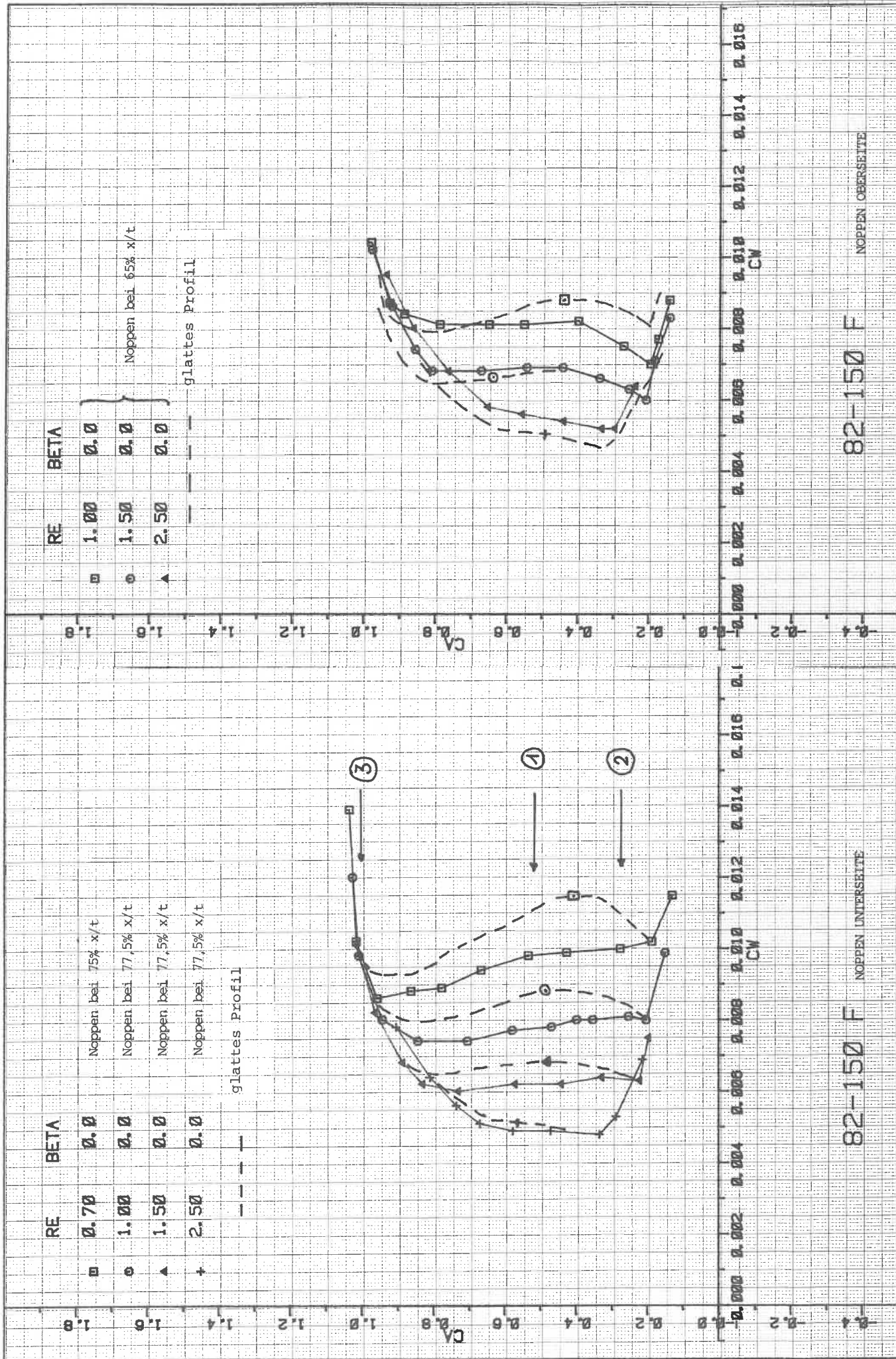
November 1984

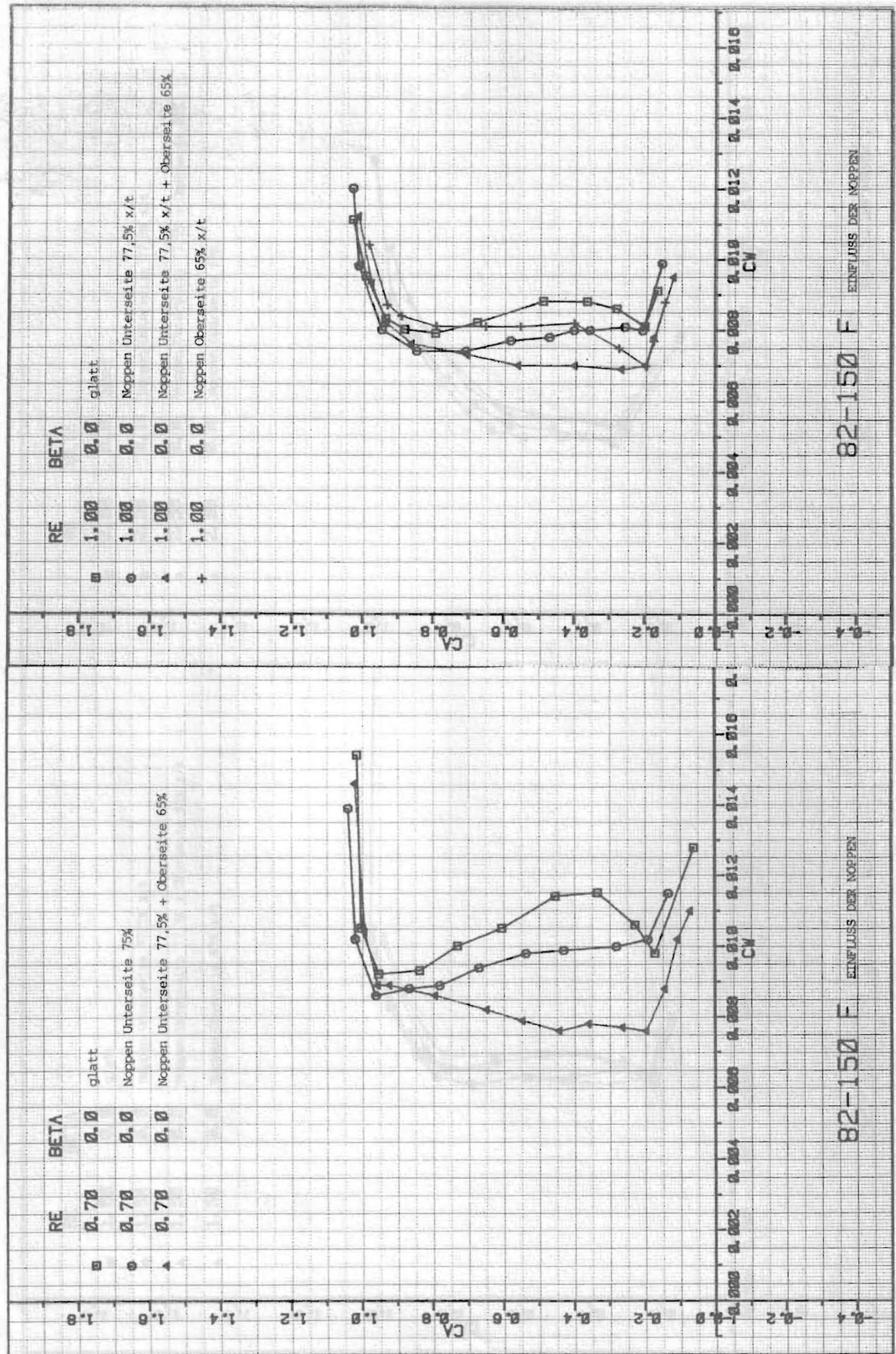


82-150 F



82-150 F GLATT



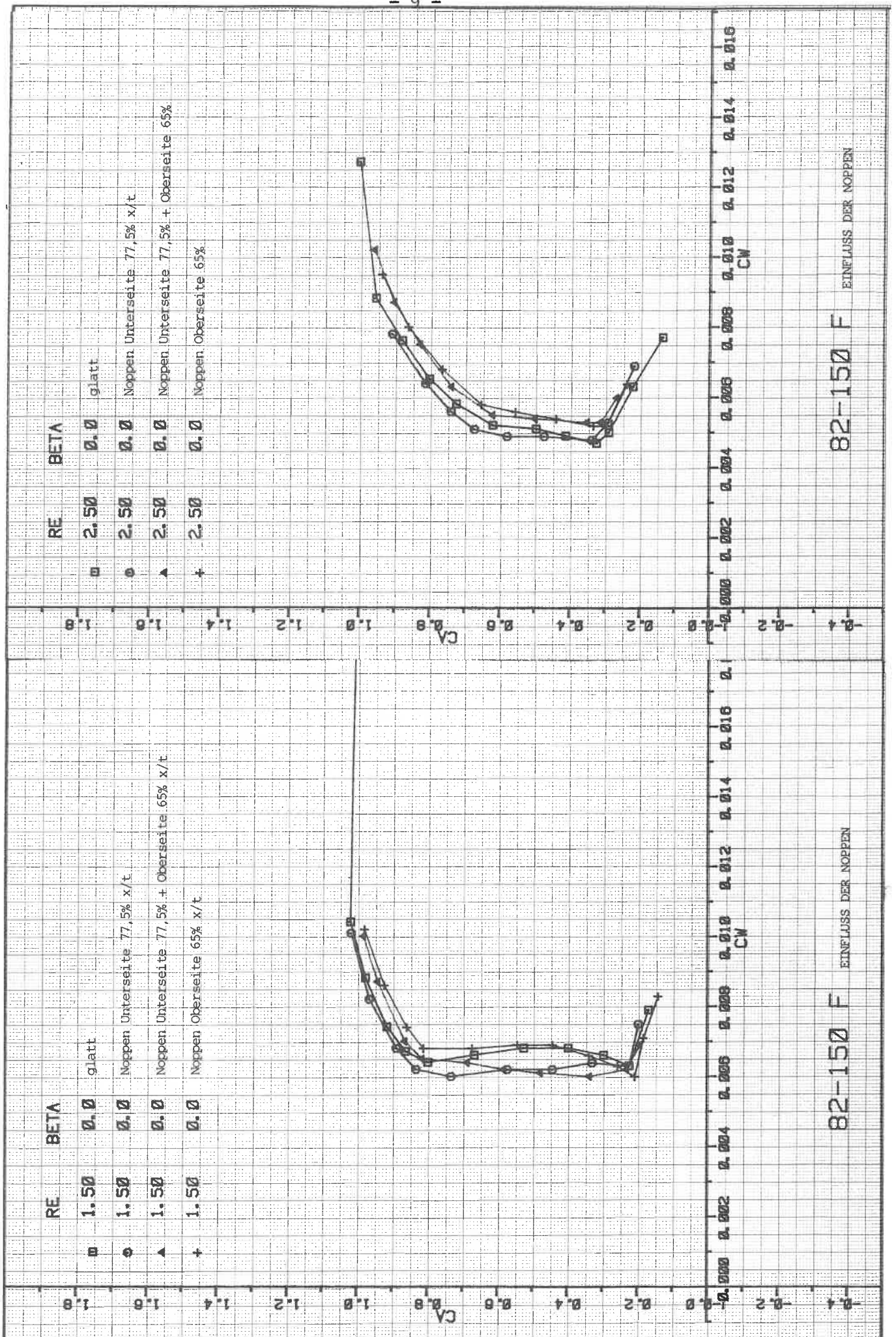


82-150 F EINFLUSS DER NOPPEN

82-150 F EINFLUSS DER NOPPEN

Diagr. 3



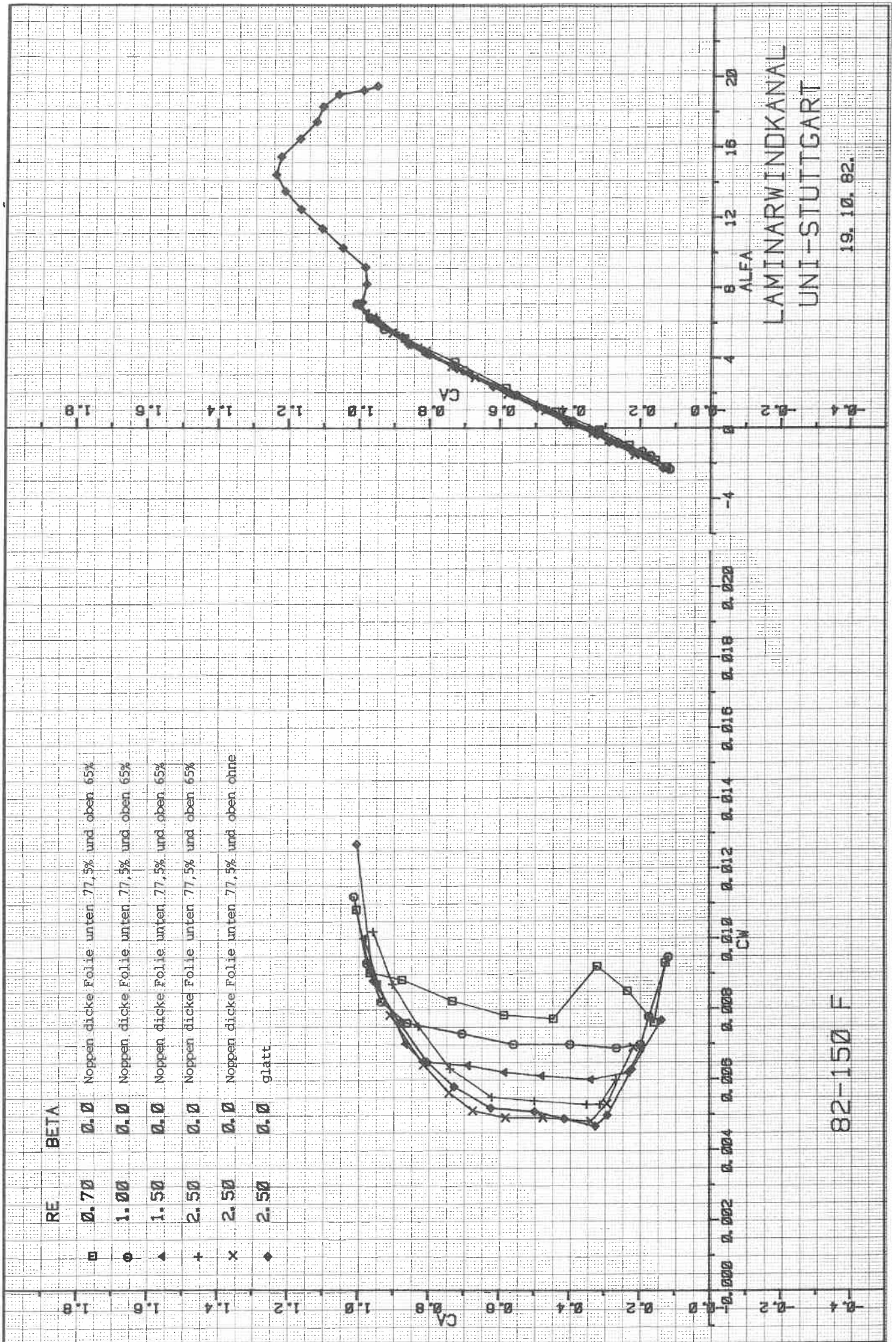


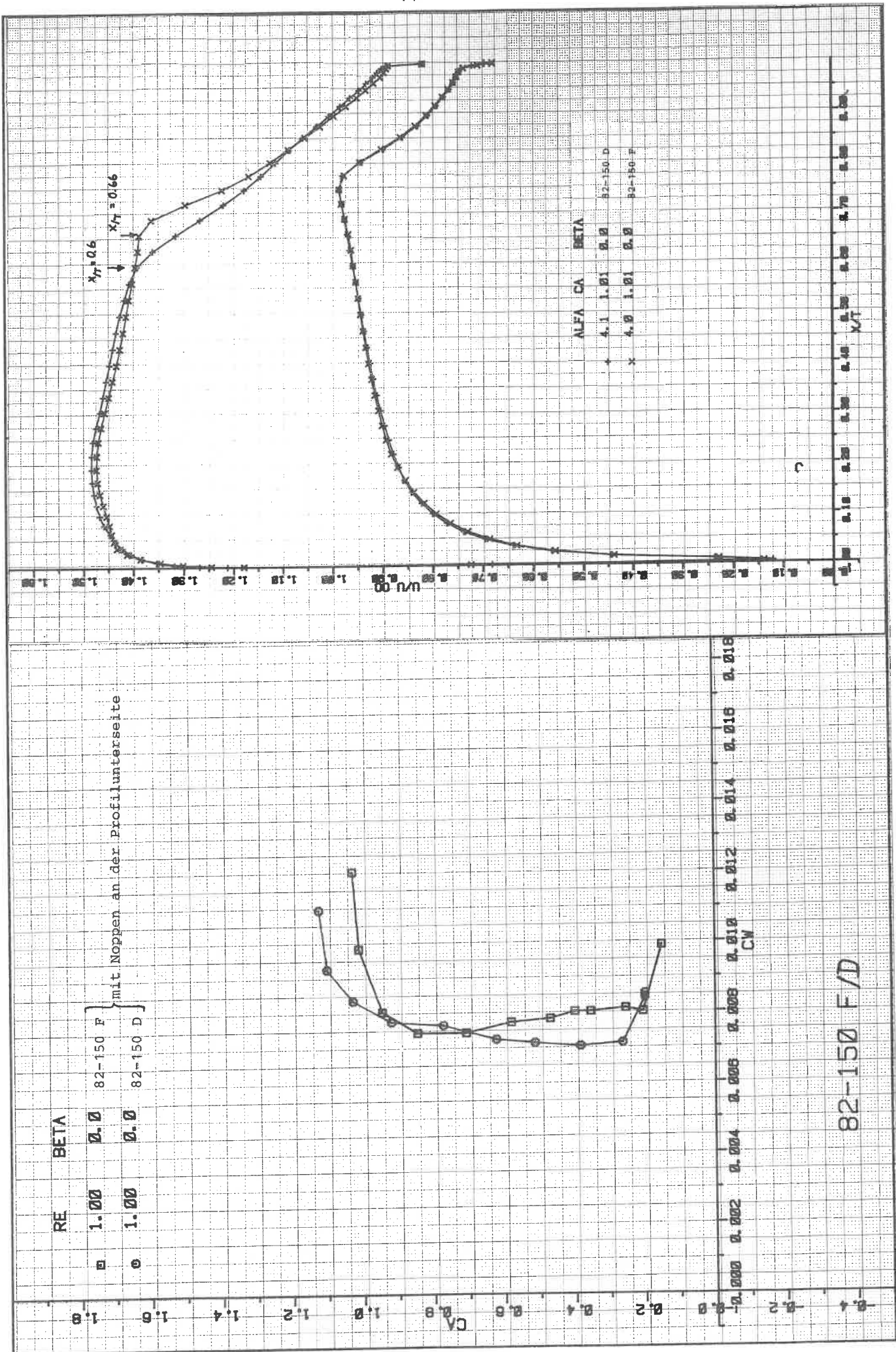
82-150 F

EINFLUSS DER NOPPEN

82-150 F

EINFLUSS DER NOPPEN





Diagr. 6

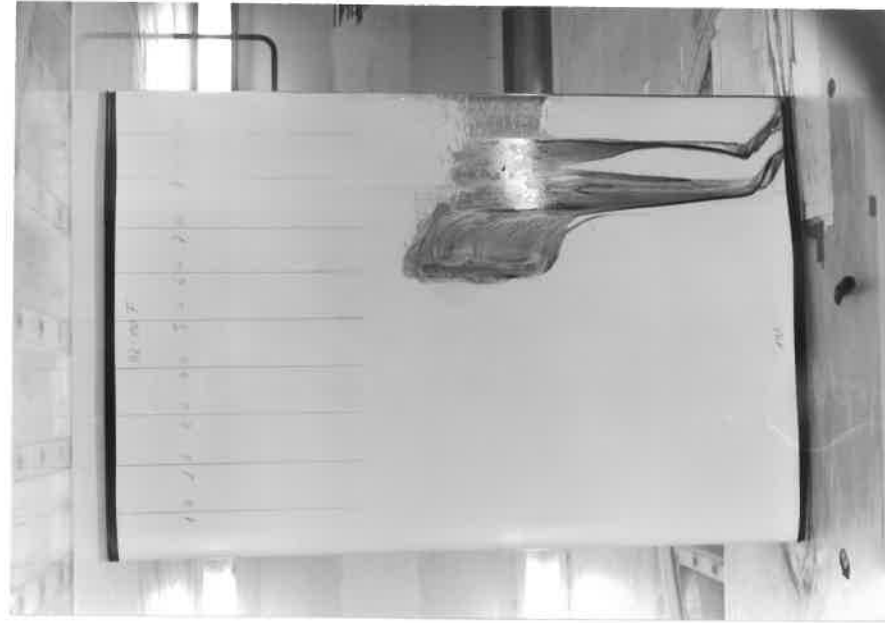


Abb.2:  $\alpha = 0^\circ$ ,  $c_a = 0.37$ ,  $Re = 0.7$   
Blase 73%-88%  
Unterseite

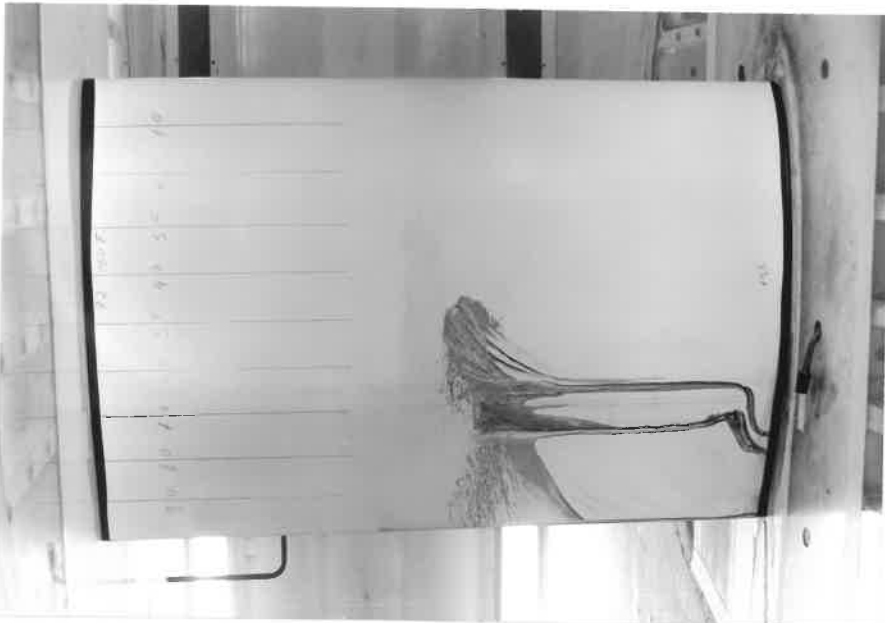


Abb.1:  $\alpha = 0^\circ$ ,  $c_a = 0.37$ ,  $Re = 0.7$   
Blase 63%-76%  
Oberseite





Abb.4:  $\alpha = 5^\circ$ ,  $c_a = 0.88$ ,  $Re = 0.7$  ~~1.0~~ 1.0  
Blase 62%-66%



Abb.3:  $\alpha = 5^\circ$ ,  $c_a = 0.88$ ,  $Re = 0.7$   
Blase 62%-69%

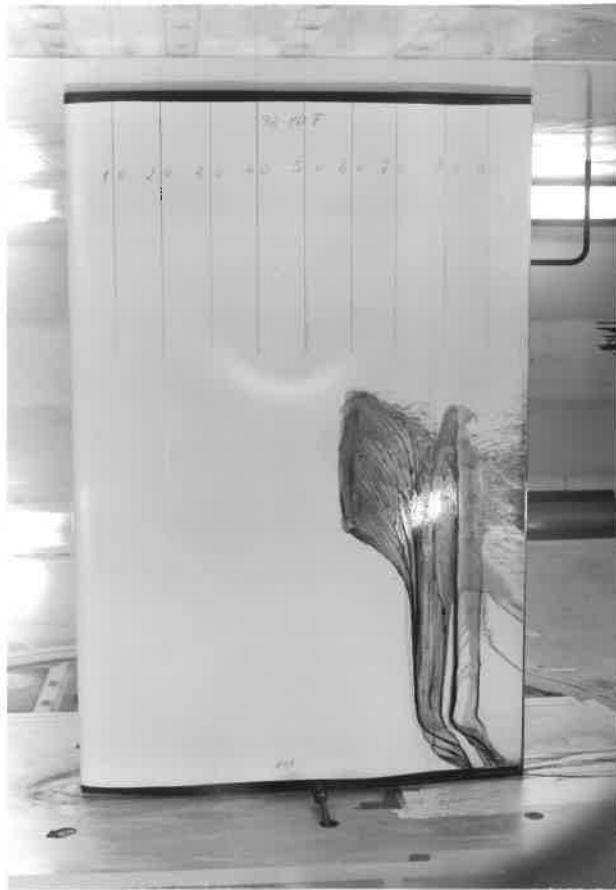


Abb.5:  $\alpha = -1,5^\circ$ ,  $c_a = 0.2$ ,  $Re = 0.7$   
Blase 74%-83%