

Mitteilung

Aero_M_Referenzfluegelflaeche_07-12-10.doc

Datum: 2007-12-10

Von:

Dipl.-Ing. Christian Matalla
Aero – Aircraft Design and Systems Group
Department F+F, HAW Hamburg
Berliner Tor 9, 20099 Hamburg

An:

Prof. Dr. Dieter Scholz (info@ProfScholz.de)
Aero – Aircraft Design and Systems Group

Tel.: +49.40.42875.7910

Mail: matalla@fzt.haw-hamburg.de

Ermittlung der Referenzflügelfläche von Flugzeugen verschiedener Flugzeughersteller

Inhalt

1	Fragestellung.....	5
2	Einleitung.....	5
3	Methoden zur Ermittlung der Referenzflügelfläche	6
3.1	Definition nach Fokker und McDonnell Douglas.....	6
3.2	Airbus Definition.....	7
3.3	Boeing.....	8
3.4	Boeing 747.....	9
3.5	Die gesamte Flügelfläche als Referenzflügelfläche.....	10
4	Ermittlung der Flügelflächen.....	11
4.1	Zeichnungen und deren Vermessung.....	11
4.2	Umsetzung der Fokker- und MD-Methode in Excel	11
4.3	Umsetzung der Airbusmethode in Excel	12
4.4	Umsetzung der Boeing-Methode in Excel.....	13
4.5	Umsetzung der Boeing 747 Methode	14
4.6	Umsetzung bei der Methode der gesamten Flügelfläche.....	14
5	Auswertung.....	15
5.1	Boeing 747.....	15
5.2	Fokker und MD Flugzeuge	16
5.3	Boeing-Flugzeuge.....	16
6	Anmerkungen von Ole Böttger, Airbus.....	18
7	Zusammenfassung	18
	Literaturverzeichnis	19
	Anhang A: Definitionen	20
	Anhang B: Zeichnungen Boeing-Flugzeuge, Fokker- und MD Flugzeuge.....	21
	Anhang C: Berechnungstabellen.....	38

Verzeichnis der Bilder

Bild 1:	Definition der Referenzflügelfläche nach Fokker und McDonnell Douglas	6
Bild 2:	Definition der Referenzflügelfläche von Airbus	7
Bild 3:	Definition der Referenzflügelfläche Boeing	8
Bild 4:	Referenzflügelfläche der Boeing 747	9
Bild 5:	Gesamte Flügelfläche als Reverenzflügelfläche	10
Bild 6:	Berücksichtigung der Flügelenden	12

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Die verschiedenen errechneten Flügelreferenzflächen der 747 Modelle	15
Tabelle 2:	Mittlerer Fehler Bei der Flächenermittlung der B747 nach Fokker und MD so wie der Methode der gesamten Fläche.....	15
Tabelle 3:	Die verschiedenen errechneten Flügelreferenzflächen einiger Focker und MD Flugzeuge	16
Tabelle 4:	Die verschiedenen errechneten Flügelreferenzflächen der verbleibenden Boeing-Flugzeuge	17

Liste der Abkürzungen

CAD	Computer Added Design
Dpi	Dots per Inch
MD	McDonnell Douglas

Liste der Formelzeichen

b	Spannweite
c	Flügeltiefe (chord)
d	Durchmesser
S	Fläche (surface)
S_{ref}	Referenzflügelfläche
y	Maß in Y- bzw Spannweitenrichtung

Indizes

- ()_{bt} Basistrapez
- ()_c Flugzeugmitte (center)
- ()_f Rumpf (fuselage)
- ()_{le} Flügelvorderkante (leading edge)
- ()_r Flügelwurzel (root)
- ()_t Flügelspitze (tip)
- ()_{te} Flügelhinterkante (trailing edge)
- ()_{...n} Zähler für mehrfach benötigte Indizes mit $n=1,2,3,\dots$

1 Fragestellung

Es gilt die im Vorlesungsskript zum Thema Flugzeugentwurf von **Scholz 1999** genannten Methoden zur Ermittlung der Referenzflügelfläche von Boeing sowie Fokker und MD zu untermauern. Hierzu sollen von verschiedenen Flugzeugen der drei Hersteller die vom Hersteller veröffentlichten Referenzflügelflächen (sofern verfügbar) mit den durch die drei Methoden ermittelten Flächen verglichen werden. Zur Errechnung dieser sollen öffentlich verfügbare Dreiseitenansichten genutzt werden.

2 Einleitung

Die verschiedenen Flugzeughersteller benutzen unterschiedliche Methoden zur Ermittlung der Referenzflügelfläche. Die Referenzflügelfläche ist nicht die tatsächliche Flügelfläche sondern eine Errechnete, zu der auch die Fläche des Flügelgrundrisses gerechnet wird, die durch den Rumpf führt oder von ihm verdeckt wird. Auch ist es möglich, dass bestimmte Teile des Flügels nicht mitberücksichtigt oder gewichtet werden. In den Vorlesungsunterlagen von **Scholz 1999** zur Vorlesung Flugzeugentwurf werden verschiedene Methoden genannt. Da die Hersteller solche Informationen nicht gern preisgeben, ist es erforderlich die Richtigkeit dieser Aussagen durch eine Validierung zu untermauern.

Die Flugzeuge die dazu betrachtet wurden, wurden so ausgewählt, dass sie eine möglichst frühe Modellreihe dieses Typs darstellen, da teilweise das Flügeldesign verändert wird, aber die Referenzfläche nicht angepasst wird.

3 Methoden zur Ermittlung der Referenzflügel- fläche

3.1 Definition nach Fokker und McDonnell Douglas

Die Flugzeughersteller Fokker und McDonnell Douglas haben zur Bestimmung der Referenzflügelfläche die simpelste Methode. Die Flugzeughersteller die wir betrachten bauen im Wesentlichen strahlgetriebene Passagierflugzeuge. Deren Tragflächen sind in der Regel gepfeilt und haben einen mehrfachen Trapezgrundriss. Bei Fokker und McDonnell Douglas wird ausschließlich das so genannte Basistrapez zur Referenzflügelfläche gezählt. Das Basistrapez ist das Trapez was am Außenflügel beginnt und sich gedacht bis in den Rumpf fortsetzt. Siehe **Bild 1**.

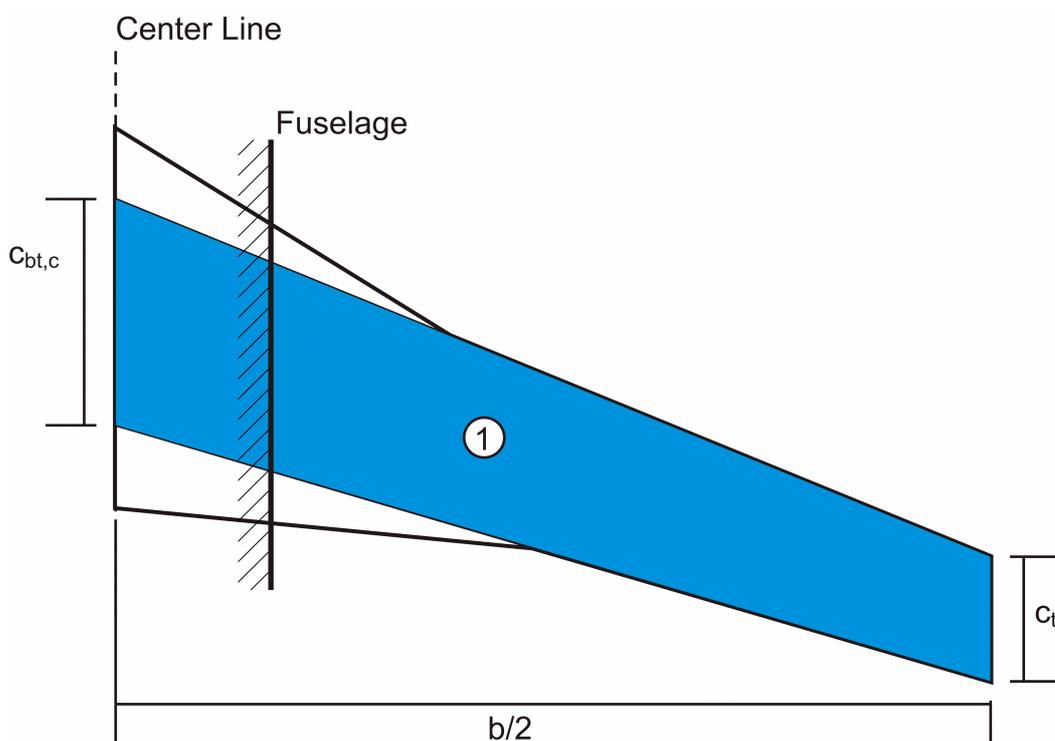


Bild 1: Definition der Referenzflügelfläche nach Fokker und McDonnell Douglas

3.2 Airbus Definition

Der Europäische Flugzeugbauer Airbus definiert die Referenzflügelfläche seiner Flugzeuge wie folgt. Es zählt die gesamte Fläche des Flügelgrundrisses die aus dem Rumpf ragt. In dem Bereich des Flügels, der durch den Rumpf geführt ist, wird bei Airbus ein Rechteck berücksichtigt, das die selbe Länge wie die Flügel Wurzel (c_r) aufweist und die selbe Breite hat wie der Rumpf an dieser Stelle. Siehe **Bild 2**.

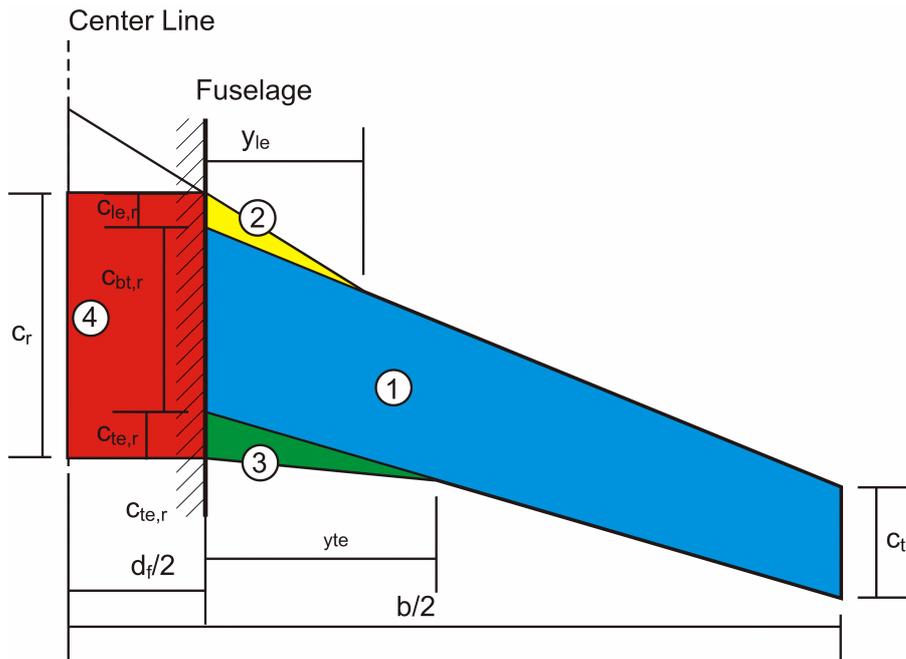


Bild 2: Definition der Referenzflügelfläche von Airbus

3.4 Boeing 747

Eine weitere Methode soll Boeing bei der 747 verwandt haben. Hierbei wird das so genannte Basistrapez, wie schon bei der Methode nach Fokker und MD gewertet. Zusätzlich werden noch die Dreiecksflächen an Vorder- und Hinterkante (Strake und Fillet) außerhalb des Rumpfes mit dazu gerechnet siehe **Bild 4**.

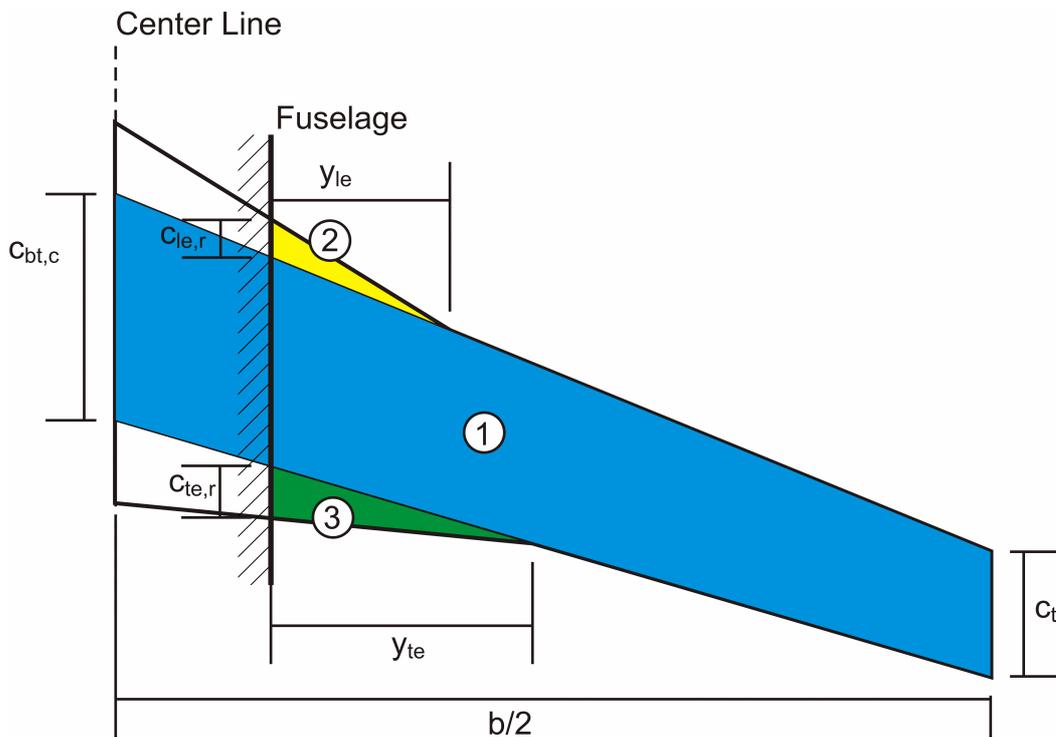


Bild 4: Referenzflügelfläche der Boeing 747

4 Ermittlung der Flügelflächen

4.1 Zeichnungen und deren Vermessung

Die Zeichnungen stammen, sofern sie die Boeing oder MD Flugzeuge betreffen, von der Boeing Homepage (**Boeing 2007**) bei den Fokkerflugzeugen wurde auf Zeichnungen aus Jane's All the World's Aircraft (**Jane's 1974-2007**) zurückgegriffen. Die Zeichnungen von der Boeing-Homepage sind CAD Zeichnungen von hoher Qualität. Die Zeichnungen aus Jane's All the World's Aircraft wurden mit 1200 dpi eingescannt. Die Qualität der gescannten Zeichnungen aus Jane's All the World's Aircraft ist deutlich schlechter als die der CAD-Zeichnungen. Das bedeutet, dass hier die Maße auch deutlich ungenauer sind.

Die Vermessung der Zeichnungen erfolgte in dem Computerprogramm Corel Draw. Die Vermessung erfolgt in Millimetern und berücksichtigt eine Nachkommastelle. Bei den CAD-Zeichnungen kann dieses auch als die Genauigkeit angenommen werden, da hier das Programm die Mitte der Linien erkennt und so sehr präzise gearbeitet werden kann. Deshalb wird hier eine Genauigkeit von 0,1 mm angenommen. Bei den gescannten Zeichnungen musste die Mitte der Linien, die zusätzlich deutlich stärker ausfallen, manuell ermittelt werden was zu einer Ungenauigkeit von ca. 0,5 mm führt. Gemessen wurden bei jedem Flugzeug die folgenden Werte:

- Halbspannweite $b/2$
- Flügeltiefe an der Flügelspitze c_t
- Länge des Basistrapez an der Mittellinie $c_{bt,c}$
- Länge und Spannweite der Dreiecke an der Vorderkante c_{le} und Y_{le}
- Länge und Spannweite der Dreiecke an der Hinterkante c_{te} und Y_{te}
- Rumpfdurchmesser d_f

4.2 Umsetzung der Fokker- und MD-Methode in Excel

Für die Ermittlung der Flügelfläche in Excel werden hier nur die Flügeltiefe außen (c_t) und die theoretische Tiefe des Grundtrapezes an der Rumpfmittelachse ($c_{bt,c}$) sowie die Spannweite (b) benötigt. Die oft schwungvoll geformten Enden des Flügels werden hier als Erleichterung zur Ermittlung der Fläche als eckig angesehen. Siehe **Bild 6**.

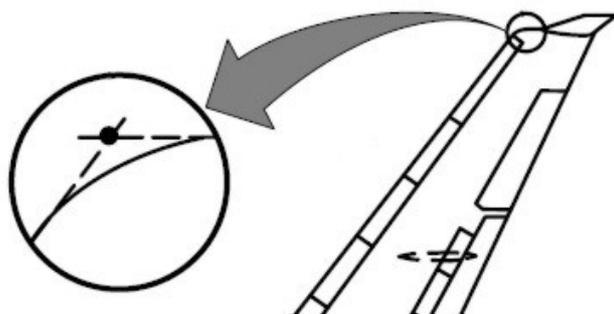


Bild 6: Berücksichtigung der Flügelenden

Aus den drei benötigten Maßen wird nun die Fläche des betreffenden Trapezes wie folgt ermittelt. Da wir beide Seiten berücksichtigen müssen, wurde der Faktor 2 mit der 2 aus $b/2$ gekürzt.

$$S_{ref,Fokker+MD} = \frac{c_t + c_{bt,c}}{2} b \quad (2)$$

4.3 Umsetzung der Airbusmethode in Excel

Die Ermittlung der Referenzflügelfläche nach Airbus ist in Excel nicht ganz so einfach wie im vorigen Teil. Zunächst wird auch hier die Fläche eines Basistrapezes berechnet, welches in diesen Fall aber nur vom Außenflügel bis zur Flügelwurzel, also bis zum begibb des Rumpfs reicht. Da die Länge des Basistrapezes an dieser Stelle $c_{bt,r}$ nicht bekannt ist, wird dieses Maß wie folgt berechnet:

$$c_{bt,r} = \frac{c_{bt,c} - c_t}{b/2} \cdot \frac{b - d_f}{2} + c_t \quad (3)$$

Die Flächen im Bereich (1) in der **Bild 2**, wird wie folgt errechnet.

$$S_1 = \frac{c_{bt,r} + c_t}{2} \cdot (b - d_f) \quad (4)$$

Hier zu werden jetzt noch dem Flügelgrundriss entsprechend Dreiecksflächen addiert. Dieses sei hier exemplarisch am fordern Dreieck, **Bild 2** Ziffer (3), der Strake gezeigt. Hier wird aus der Basislänge hier $c_{le,r}$ und der Höhe y_{le} die Fläche errechnet und ebenfalls der Faktor 2, da es das Dreieck am linken wie auch am rechten Flügel zu berücksichtigen gilt gekürzt. Dazu muss auch hier erst ein Maß, nämlich die Länge des Dreiecks an der Wurzel $c_{le,r}$ (sprich Flügel- Rumpfübergang berechnet werden. Dieses geschieht auf ähnliche weise wie beim Basistrapez, mit dieser Formel:

$$c_{le,r} = \frac{c_{le,c}}{y_{le} + d_f/2} \cdot y_{le} \quad (5)$$

Nun kann die Fläche mit folgender Formel errechnet werden:

$$S_3 = c_{le,r} \cdot y_{le} \quad (6)$$

Der Teil des Flügels der durch den Rumpf reicht, **Bild 2** Nummer (4), wird hier aus der Wurzeltiefe c_r und dem Rumpfdurchmesser d_f wie gezeigt berechnet. Die Wurzeltiefe errechnet sich aus folgenden Maßen:

$$c_r = c_{le1,r} + \dots + c_{len,r} + c_{bt,r} + c_{te1,r} + \dots c_{ten,r} \quad (7)$$

Somit ergibt sich die Fläche beider Dreiecke (linker und rechter Flügel) zu:

$$S_4 = c_r \cdot d_f \quad (8)$$

Diese einzelnen Flächenanteile addieren sich nun zur gesamten Referenzflügelfläche. In einigen Fällen ergeben sich fünf Teilflächen, da die Hinterkante hier zweimal abgewinkelt ist, siehe bemastete Zeichnungen Anhang B:

$$S_{ref,Airbus} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 \quad (9)$$

4.4 Umsetzung der Boeing-Methode in Excel

Die in Bild 3 gezeigte Fläche wird ebenso bei den Flugzeugen von Fokker und McDonnell Douglas errechnet. Die Dreiecke (2) und (3) errechnen sich genau so wie in der Methode von Airbus. Die Trapeze (4) und (5) berechnen sich wie es folgend anhand der Fläche (4) erklärt ist. Zunächst wird die Fläche des Trapezes aus $c_{le,c}$, $c_{le,r}$ und $d_f/2$ errechnet. Da auch hier zwei Flächen zu berücksichtigen sind, wird die zwei wiederum gekürzt. Diese Flächen werden dann mit einem Faktor gewichtet, der aus dem Verhältnis der Höhe des Dreiecks (2), y_{le} und dem Anteil der Halbspannweite, der aus den Flügel ragt $b/2 - d_f/2$ besteht, siehe Formel unten.

$$S_4 = \frac{c_{le,c} + c_{le,r}}{2} \cdot d_f \cdot \frac{y_{le}}{\left(\frac{b}{2} - \frac{d_f}{2} \right)} \quad (10)$$

Die so ermittelten und teilweise gewichteten Anteile werden nun wie folgt zur Referenzflügelfläche aufaddiert. Dieses sind hier bis zu sieben Anteile, durch die Flugzeugtypen mit zweifach abgewinkelter Flügelhinterkante.

$$S_{ref,Boeing} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7 \quad (11)$$

4.5 Umsetzung der Boeing 747 Methode

Die Umsetzung der vermutlich bei der Boeing 747 angewandten Methode lässt sich nun sehr einfach mit schon bekannten Flächenanteilen realisieren. Hierzu müssen nur die Fläche des Basistrapezes und die Fläche der außerhalb des Rumpfes liegenden Dreiecke addiert werden.

$$S_{ref,Boeing747} = S_1 + S_2 + S_3 \quad (12)$$

4.6 Umsetzung bei der Methode der gesamten Flügelfläche

Auch für die Methode bei der die so genannte gesamte Fläche berücksichtigt wird, besitzen wir alle nötigen Informationen, zur Ermittlung der Fläche. Entweder wir rechnen ähnlich dem Boeing-Modell und lassen lediglich die Gewichtung weg oder wir berechnen uns aus den Maßen $c_{le,c}$, d_f und y_{le} , hier exemplarisch an einer Strake die Fläche des Dreiecks von der Rumpfmittellinie aus gesehen, wie es im Folgenden gezeigt ist und addieren die Flächenanteile.

$$S_2 = c_{le,c} \cdot \left(\frac{d_f}{2} + y_{le} \right) \quad (13)$$

Damit ergibt sich die Referenzfläche zu:

$$S_{ref,Total} = S_1 + S_2 + S_3 \quad (14)$$

5 Auswertung

5.1 Boeing 747

Im Fall der Boeing 747 ist das Ergebnis eindeutig. Untersucht wurden die 747-200, die den gleichen Flügelgrundriss wie die Urversion der 747 aufweist. Weiterhin wurde die 747-400 und die 747-8, die beide einen veränderten Flügelgrundriss aufweisen betrachtet. Zu beachten gilt es, dass die Werte der Referenzflügelfläche der 747-8 einer anderen Quelle entspringen, da es im Jane's noch keine detaillierten Informationen zu diesen Flugzeugen gibt. Bei allen drei Flugzeugen ist die errechnete Referenzflügelfläche nach der Methode Boeing 747 am dichtesten an den Angaben die zu den Flugzeugen von Jane's an gegeben wurde. Die Abweichungen betragen für die 200 -1%, für die 400 0,1% und für die Version 8 5,4%. Siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Verschiedene errechneten Flügelreferenzflächen der 747 Modelle und Abweichungen gegenüber der Herstellerangabe in %

Flugzeug	$S_{\text{refHerst.}}$ [m ²]	$S_{\text{ref.Total}}$ [m ²]	$S_{\text{refAirbus}}$ [m ²]	$S_{\text{refBoeing}}$ [m ²]	$S_{\text{ref747??}}$ [m ²]	$S_{\text{refMD&Fok.}}$ [m ²]					
B747-200	511,0	535,6	4,8	529,4	3,6	520,0	1,8	506,1	-1,0	455,4	-10,9
B747-400	541,2	571,6	5,6	565,3	4,5	554,8	2,5	541,6	0,1	488,9	-9,7
B747-8	524,9	583,5	11,2	577,7	10,1	567,3	8,1	553,2	5,4	492,9	-6,1

Der mittlere Fehler nach Gauß wurde anhand der Fokker und MD Methode sowie der Methode der gesamten Flügelfläche errechnet. Dafür wurde zugrunde gelegt, dass die Angabe der Spannweite einen Fehler von $\pm 0,1\text{m}$ aufweist, die Angabe des Rumpfdurchmesser einen Fehler von $\pm 0,01\text{m}$ und die in der Zeichnung gemessenen Werte einen Fehler von $\pm 0,1\text{mm}$ ($\pm 0,0001\text{m}$). Dabei ergaben sich folgende Fehler von etwa einem halben bis einem Prozent.

Tabelle 2: Mittlerer Fehler bei der Flächenermittlung der B747 nach Fokker und MD so wie der Methode der gesamten Fläche und Abweichungen gegenüber der Herstellerangabe in %

Flugzeug	S_{bt} [m ²]	$\Delta S_{\text{bt,abs}}$ [m ²]	$\Delta S_{\text{bt,rel}}$ [%]	$S_{\text{rev,g}}$ [m ²]	$\Delta S_{\text{rev,abs}}$ [m ²]	$\Delta S_{\text{rev,rel}}$ [%]
B747-200	455,43	2,71	0,59	535,63	3,67	0,72
B747-400	488,94	2,79	0,57	571,55	3,75	0,69
B747-8	492,93	2,94	0,60	583,54	4,41	0,84

5.2 Fokker und MD Flugzeuge

Etwas weniger eindeutig aber mit einer klaren Tendenz fällt auch hier das Ergebnis aus. Drei der untersuchten sechs Flugzeuge sind mit einer Abweichung kleiner einem Prozent sehr nahe an der vermuteten Methode zur Ermittlung der Referenzflügelfläche. Im Fall der DC-10-10 scheint in der Tat mit einer anderen Methode gearbeitet worden zu sein. Dies lässt sich bereits daher ersehen, dass trotz der um etwa 4 Metern geringeren Spannweite im Vergleich zur MD-11 und der ansonsten sehr ähnlichen Flügelgeometrie eine um ca. 30 m² größere Flügelfläche angegeben wurde als bei der MD-11.

Im Fall der MD-80 wurden Angaben über die Flügelfläche von ca. 112 m² bis zu 118 m² gefunden, mit Rücksicht auf die Konsistenz dieser Untersuchung wurde als Quelle wenn es möglich war nur ein Werk gewählt, nämlich Jane's All the World's Aircraft. Die Zeichnungen der Fokker Flugzeuge sind ebenfalls Jane's entnommen, da dieses die einzige Quelle vernünftiger Qualität war. Die Abweichungen beim Ausmessen sollten hier schon in Hinblick auf die größere Strichstärke mit etwa $\pm 0,5$ mm ($\pm 0,0005$ m) angenommen werden. Wodurch sich der gesamte mittlere Fehler in einer Größe von ca. $\pm 2\%$ bewegt. Das ist eine mögliche Erklärung für die Abweichung der F-28 1000. Alles in allem lässt sich wohl mit Ausnahme der DC-10-10 sagen, dass bei diesen Flugzeugen nach der Methode des Basistrapezes vorgegangen wurde.

Tabelle 3: Die verschiedenen errechneten Flügelreferenzflächen einiger Fokker und MD Flugzeuge und Abweichungen gegenüber der Herstellerangabe in %

Flugzeug	S _{refHerst.} [m ²]	S _{ref,Total} [m ²]	Δ %	S _{refAirbus} [m ²]	Δ %	S _{refBoeing} [m ²]	Δ %	S _{ref747???} [m ²]	Δ %	S _{refMD&Fok.} [m ²]	Δ %
MD-80	118,0	118,9	0,8	117,5	-0,5	116,6	-1,2	115,9	-1,8	113,5	-3,8
MD-11	338,9	367,9	8,5	362,1	6,8	356,8	5,3	352,5	4,0	339,2	0,1
DC-9	86,8	87,5	0,8	86,6	-0,2	87,5	0,8	87,5	0,8	87,5	0,8
DC-10-10	367,7	354,1	-3,7	348,2	-5,3	342,9	-6,7	337,8	-8,1	323,8	-12,0
F-100	93,5	97,3	4,1	96,2	2,9	96,2	2,8	95,5	2,2	93,5	0,0
F-28 1000	79,0	80,4	1,7	79,2	0,3	78,8	-0,2	78,3	-0,9	76,8	-2,8

5.3 Boeing-Flugzeuge

Beim Rest der Boeing-Flugzeuge ist das Ergebnis wesentlich schlechter ausgefallen. Drei der acht untersuchten Flugzeuge liegen am dichtesten an den Ergebnissen der Methode der gesamten Flügelfläche. Weitere Zwei sind nahe an der Methode der Boeing 747, die 767-200 liegt genau beim Ergebnis der Boeing-Methode, eines liegt dicht an der Airbusmethode und eine Flugzeug dicht an der Methode nach Fokker und MD. Siehe **Tabelle 4**.

Die Werte der 707 sind am dichtesten zur Methode nach Fokker und MD angesiedelt. Es muss jedoch gesagt werden, das bei der 757, 767, 777 und der 787 der Abstand zur Boeing Methode sich zwischen 0 % bei der Boeing 767 und im Maximum 4,3 % bei der Boeing 787 bewegen. Berücksichtigt man, die folgenden Tatsachen wird man schnell die Schwierigkeiten der Aufgabenstellung erkennen.

- Der Fehler der errechneten Flächen liegt im Bereich von gut einem Prozent,
- Die Angaben zur Flügelfläche der 787 entspringen einer anderen Quelle, genau so wie die der 747-8 und muss als vorläufig gelten,
- Die Unterschiede zwischen den einzelnen Methoden sind zum Teil sehr gering.

All das macht eine genaue Bestimmung der Methode zur Ermittlung der Flügelreferenzfläche schwer. Zu einer genauen Bestimmung bedarf es exakter Herstellerdaten, die in der Regel sehr schwer zu besorgen sind. Und bekommt man diese Daten vom Hersteller, bekommt man sicher auch die Information wie der Hersteller die Referenzflügelfläche ermittelt.

Tabelle 4: Die verschiedenen errechneten Flügelreferenzflächen der verbleibenden Boeing-Flugzeuge und Abweichungen gegenüber der Herstellerangabe in %

Flugzeug	S _{refHerst.} [m ²]	S _{ref,Total} [m ²]	Δ %	S _{refAirbus} [m ²]	Δ %	S _{refBoeing} [m ²]	Δ %	S _{ref747???} [m ²]	Δ %	S _{refMD&Fok.} [m ²]	Δ %
			11,								
B707-320	283,4	315,9	5	313,1	10,5	306,2	8,0	300,7	6,1	274,3	-3,2
B727-200	157,9	158,9	0,6	156,7	-0,7	153,4	-2,8	150,6	-4,6	141,5	-10,4
B737-200	102,0	102,8	0,8	100,2	-1,7	96,9	-5,0	94,8	-7,1	89,2	-12,5
B737-600	125,0	114,4	-8,5	111,9	-10,5	108,1	-13,5	106,1	-15,1	99,7	-20,3
B757-200	185,3	186,5	0,7	184,6	-0,4	182,3	-1,6	180,3	-2,7	172,1	-7,1
B767-200	283,3	290,8	2,7	287,2	1,4	283,3	0,0	277,6	-2,0	256,7	-9,4
B777-200	427,8	453,6	6,0	447,0	4,5	437,7	2,3	426,4	-0,3	382,3	-10,6
B787-8	347,0	376,4	8,5	371,1	6,9	362,1	4,3	355,9	2,6	331,1	-4,6

6 Anmerkungen von Ole Böttger, Airbus

Ole Böttger beschäftigt sich im Future Project Office bei Airbus in Hamburg auch mit Themen wie dem Flügelentwurf seine Erfahrung im Zusammenhang mit dem Thema hat er am 10.12.2007 per Telefon beigetragen:

- Die Berechnung der Referenzflügelfläche nach **Boeing** basiert auf einer Gewichtung der (virtuellen) Flächentrapeze im Rumpf (s.o.). Boeing hat diese Methode aber nicht konsistent bei allen Flugzeugen angewandt. So z.B. nicht bei der B777, bei der die Referenzflügelfläche zu einem bestimmten Zeitpunkt im Entwurf fixiert wurde. Fraglich ist weiterhin in wie weit die Fläche der Wingtips in die Angabe der Referenzflügelfläche eingeflossen ist. Bei der B787 wurde die Fläche der Wingtips z.B. mit berücksichtigt.
- **Airbus** hat bei allen seinen Flugzeugen die Referenzflügelfläche konsistent nach der Airbus-Methode berechnet. Wenn im Verlauf des Entwurfes die Flügelgeometrie geändert wurde, dann wurde auch die Referenzflügelfläche entsprechend angepasst. Fraglich ist nur in wie weit die Fläche der Wingtips in die Angabe der Referenzflügelfläche eingeflossen ist. Bei der A350 XWB wurde z.B. die Referenzflügelfläche ohne Berücksichtigung der Wingtips festgelegt.
- Bei der **A380** ist die Vorderkante am Rumpf recht weit nach vorn gezogen. Entsprechend groß ist die virtuelle Fläche im Rumpf ausgefallen (strikt nach Airbus-Definition).

Weitere Anmerkungen:

- Die Nachrechnung der mittleren aerodynamischen Flügeltiefe (**MAC**) stellt sich oft als noch schwieriger heraus, als die Nachrechnung der Referenzflügelfläche.
- Ähnliche Probleme wie bei der Nachrechnung/Festlegung der Referenzflügelfläche ergeben sich auch bei der Nachrechnung/Festlegung der **Referenzfläche des Seitenleitwerks**. Es wird allgemein erwartet, dass das Seitenleitwerk eine gerade/horizontale Unterkante hat. Die Rumpfoberseite im Bereich des Seitenleitwerkes ist oft nicht gerade/horizontal. Airbus hat bis vor der A380 die Referenzseitenleitwerksfläche so festgelegt, dass die gleiche Fläche (unten am Seitenleitwerk) im Rumpf wie außen liegt. Mit der A380 wurde aber die Unterkante des Seitenleitwerks auf den tiefsten Punkt der wirklichen Seitenleitwerksfläche gelegt mit entsprechend viel virtueller Fläche im Rumpf.

7 Zusammenfassung

Abschließend muss gesagt werden, dass es bei der Boeing 747 und bei den Flugzeugen von Fokker und MD mit großer Wahrscheinlichkeit gezeigt werden konnte, dass die Referenzflügelfläche auch mit der entsprechenden Methode des Herstellers ermittelt wurde.

Bei dem Rest der Boeing-Flugzeuge ist dieses nicht geglückt. Dieses lässt zweierlei vermuten. Zum einem ist es möglich, dass Boeing die Methode zur Ermittlung der Flügelreferenzfläche mehrfach gewechselt hat (wie von Herrn Böttger berichtet wurde), oder zum anderen, dass die vorliegenden Informationen in Form von Zeichnungen, und Geometriedaten Fehler aufweisen.

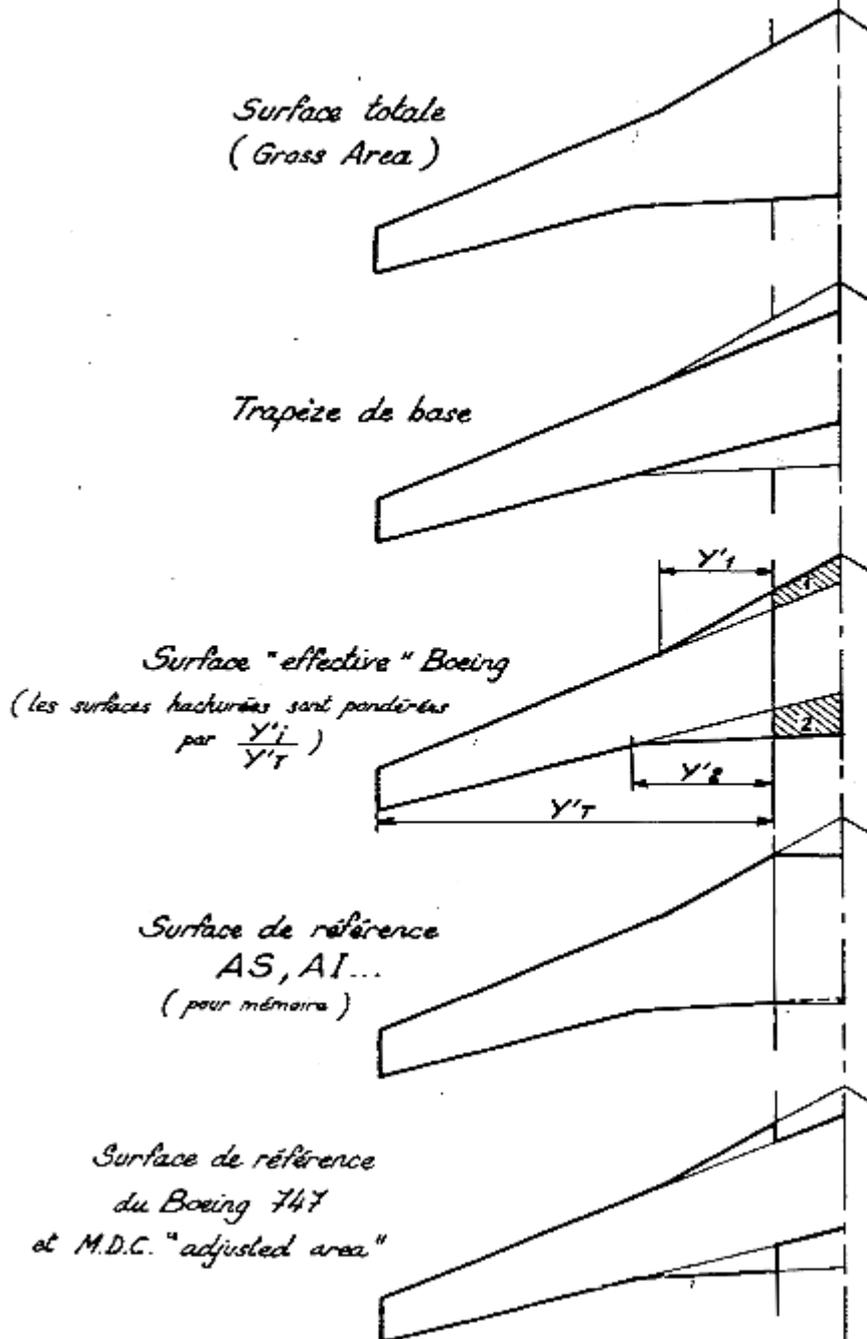
Die Tatsache, dass sich der Fehler bei genauen Daten im Bereich von einem halben bis einem Prozent bewegt und die Differenz der Werte für die Referenzflügelfläche im Vergleich der Methoden untereinander bei einigen Flugzeugen und Methoden ebenfalls unter einem Prozent liegt, zeigt die Schwierigkeiten, die damit verbunden ist, aus einer Nachrechnung der Referenzflügelfläche auf die verwendete Methode zu schließen.

Literaturverzeichnis

- | | |
|-------------------------|---|
| Boeing 2007 | THE BOEING COMPANY: Seattle 2007
“URL: http://boeing.com/commercial/airports/plan_manuals.html |
| Jane´s 1974-2008 | JANE´S: All the World´s Aircraft. Surrey: Jane´s Information Group Limited, 1974 -2008 |
| Scholz 1999 | SCHOLZ, Dieter: Skript zur Vorlesung Flugzeugentwurf. Fachhochschule Hamburg, Fahrzeugtechnik. Vorlesungsskript, 1999 |

Anhang A: Definitionen

DEFINITION des SURFACES VOILURES

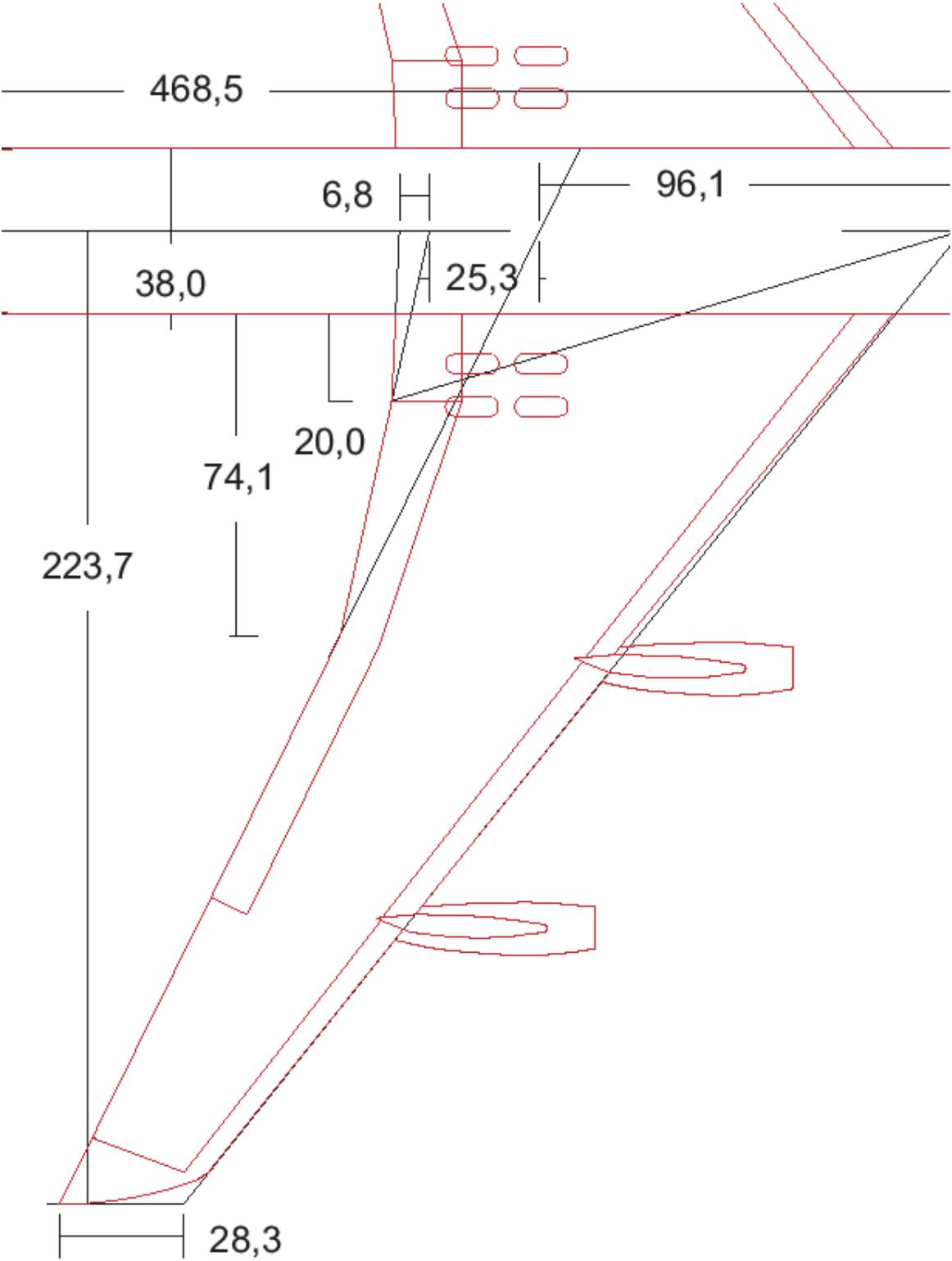


ROBERT

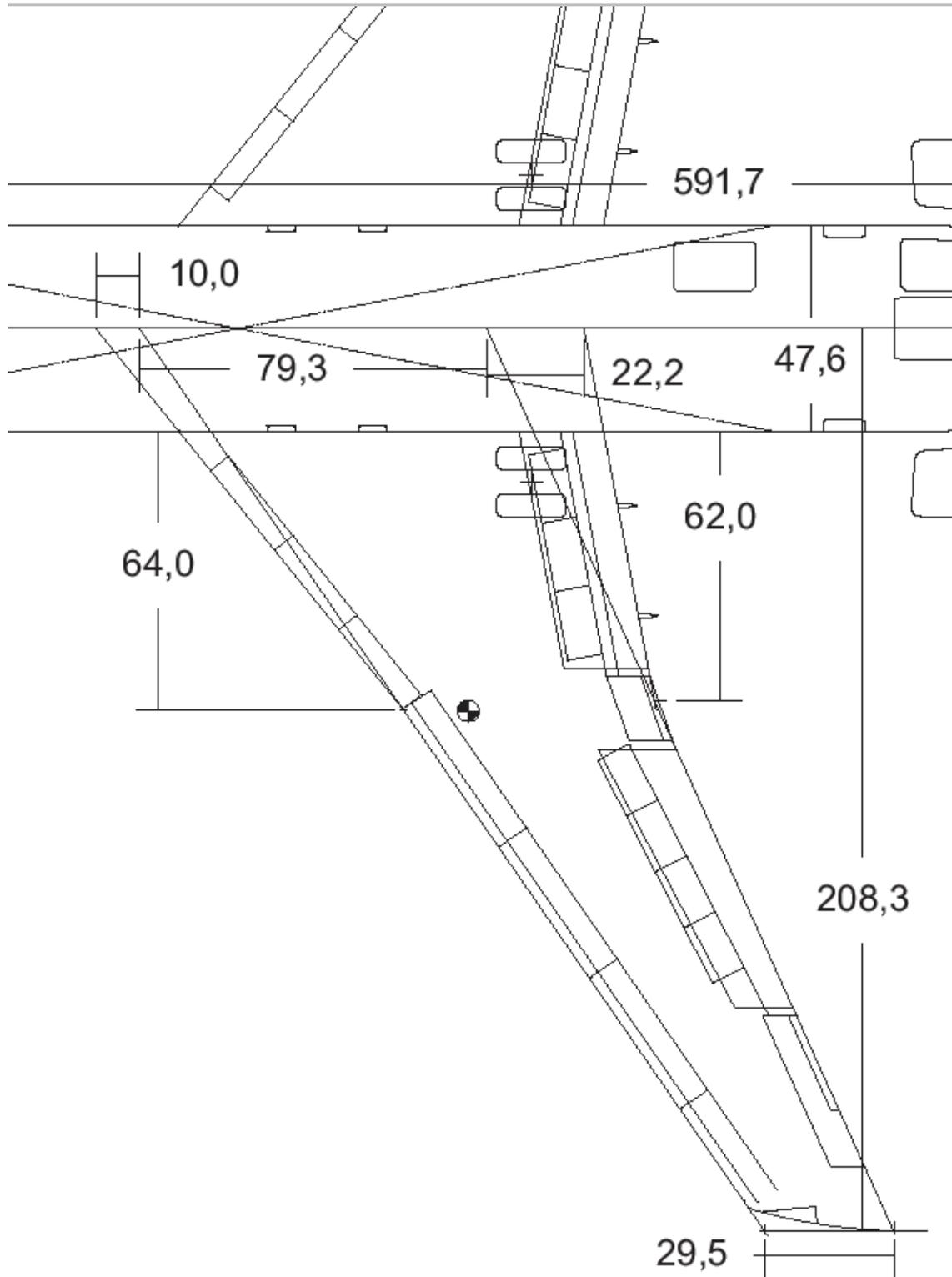
15. 02. 84

Anhang B: Zeichnungen Boeing-Flugzeuge

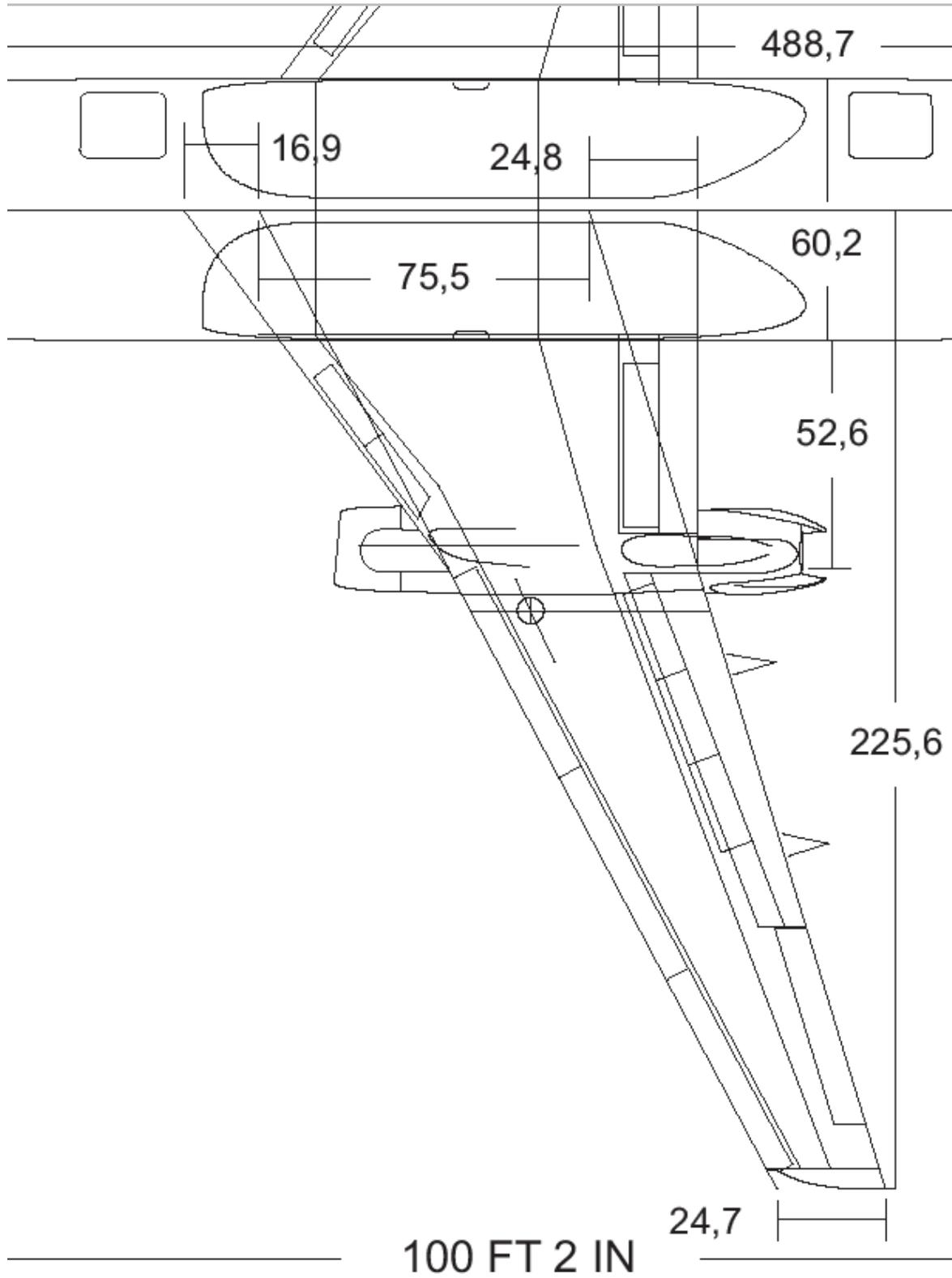
B707-320



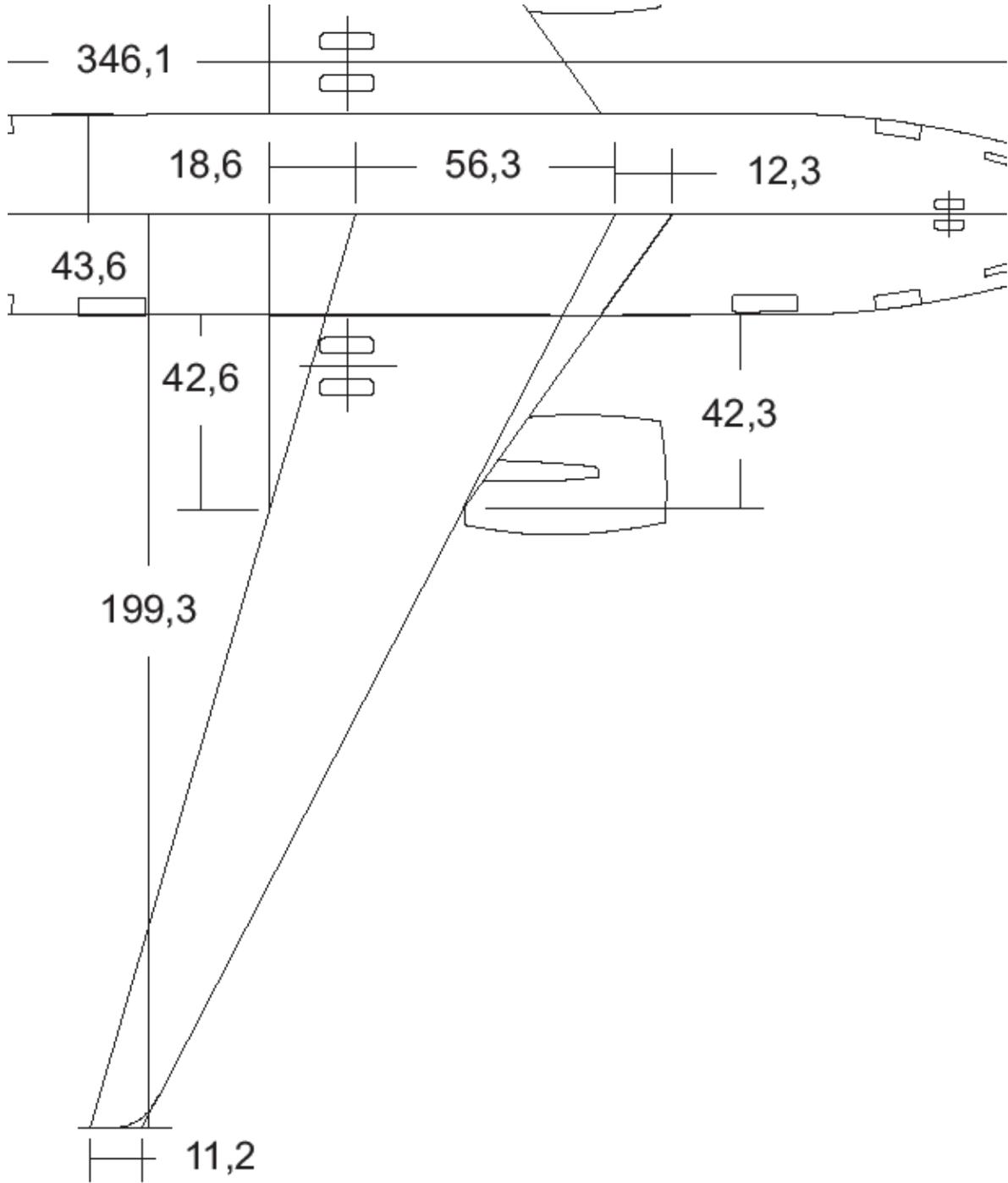
B727-200



B737-200

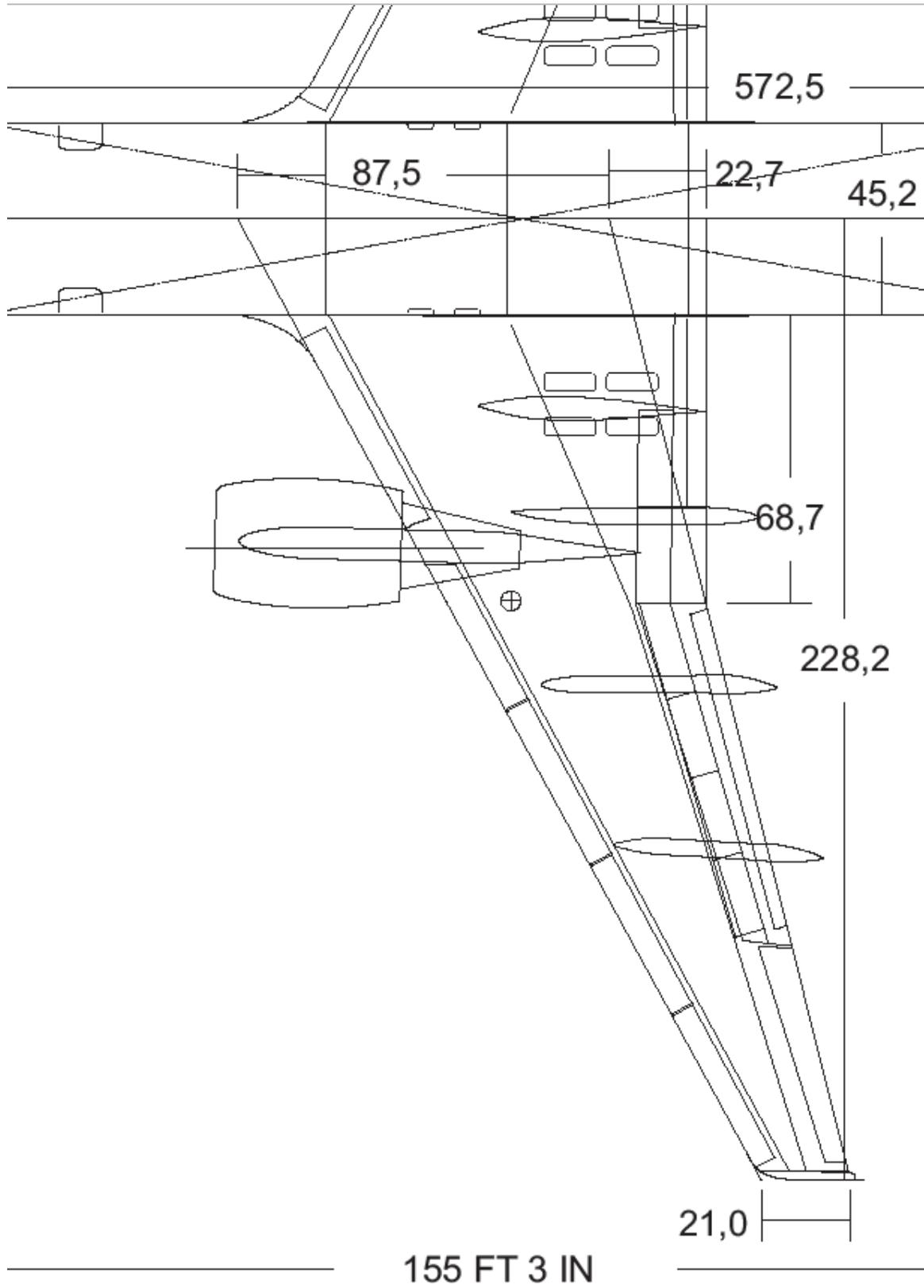


B737-600

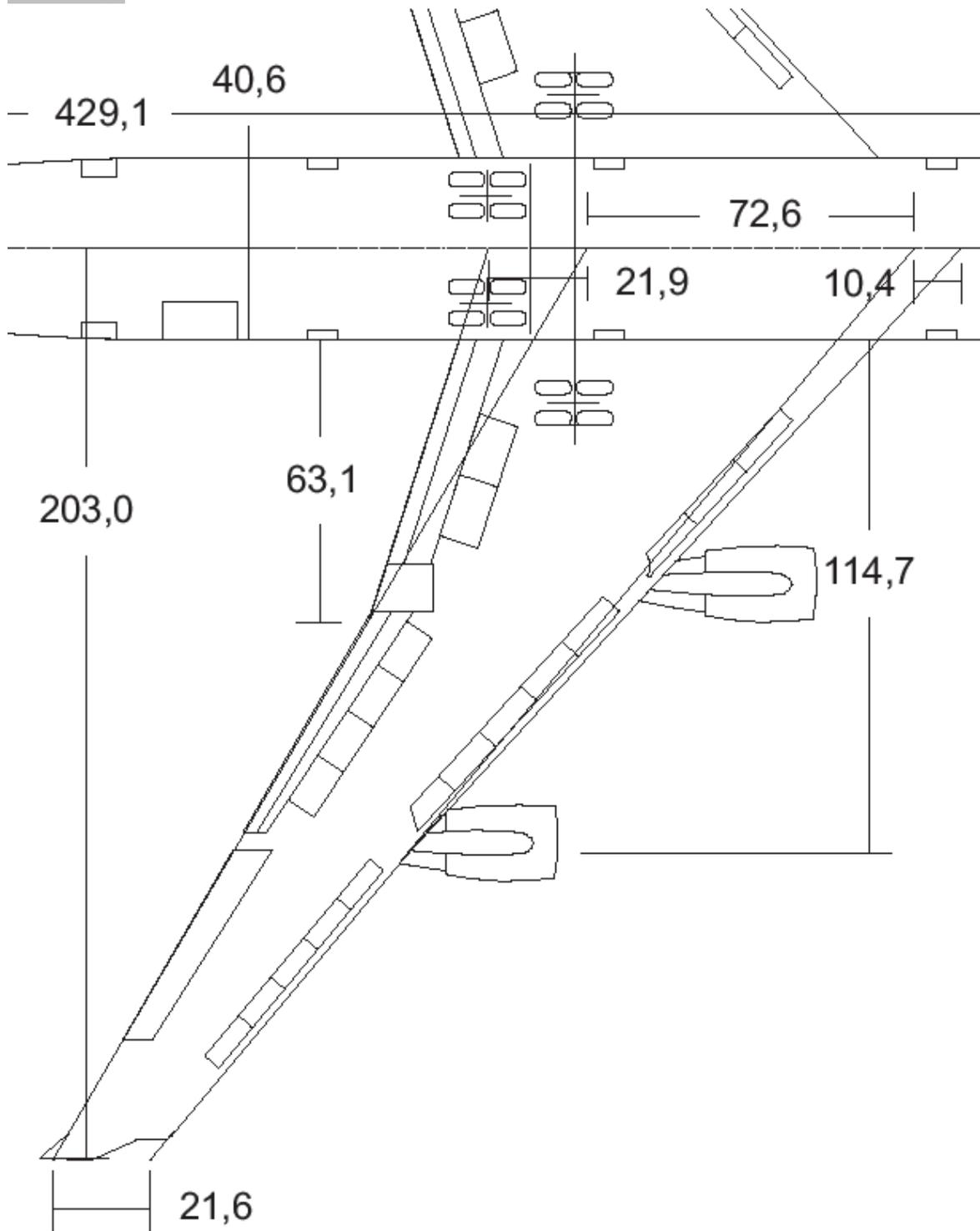


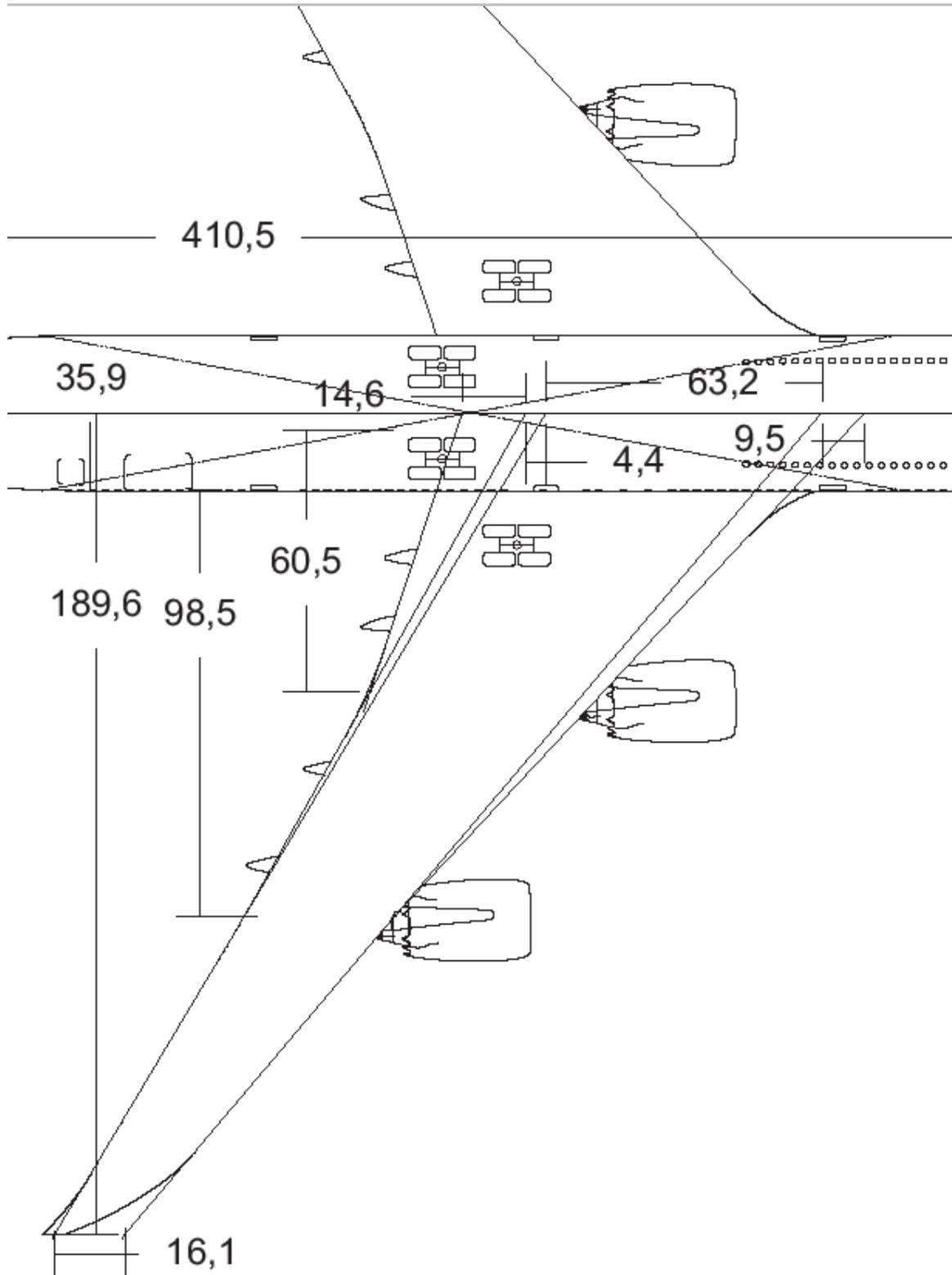
NI 6 13 26

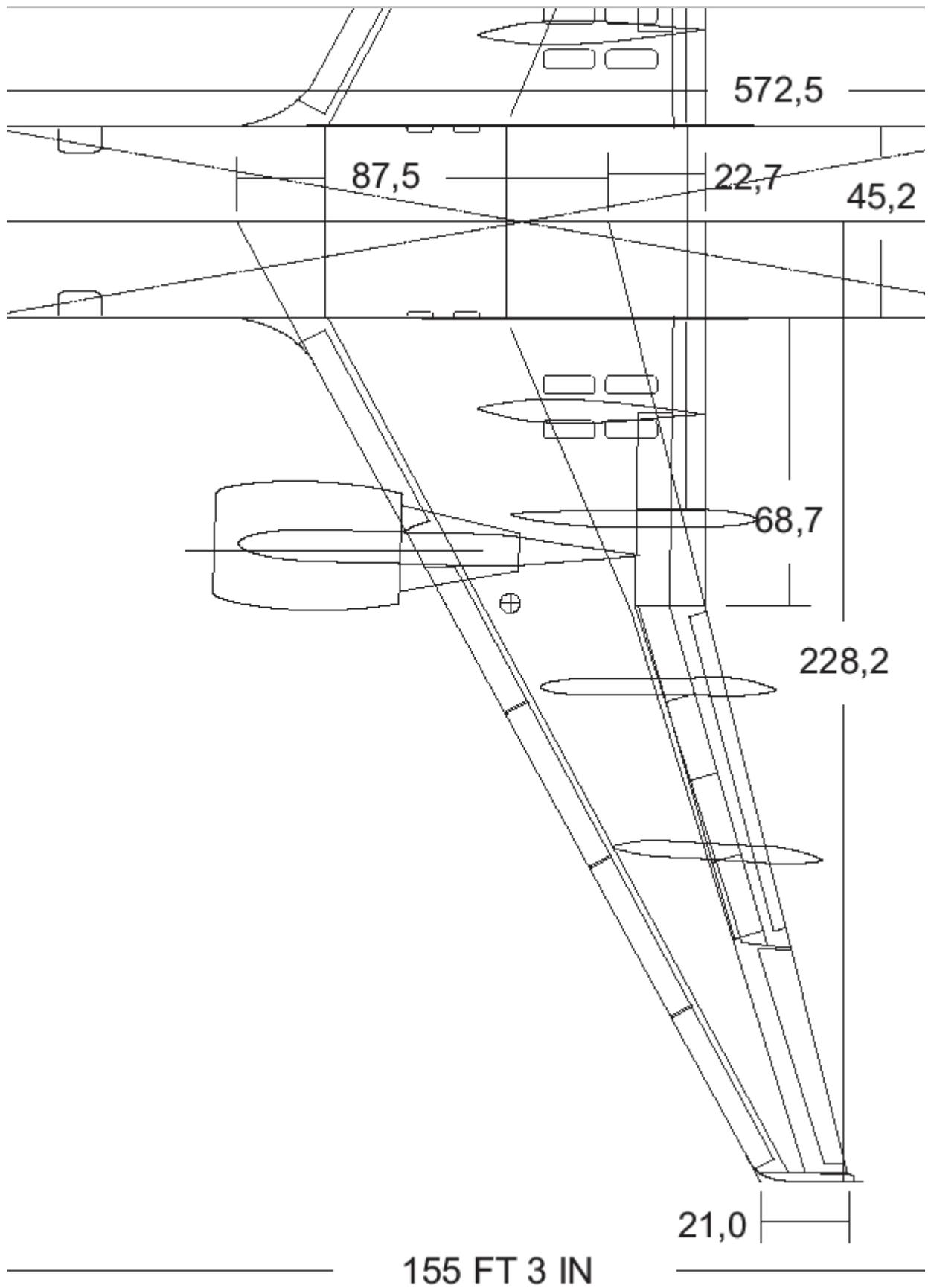
B747-200



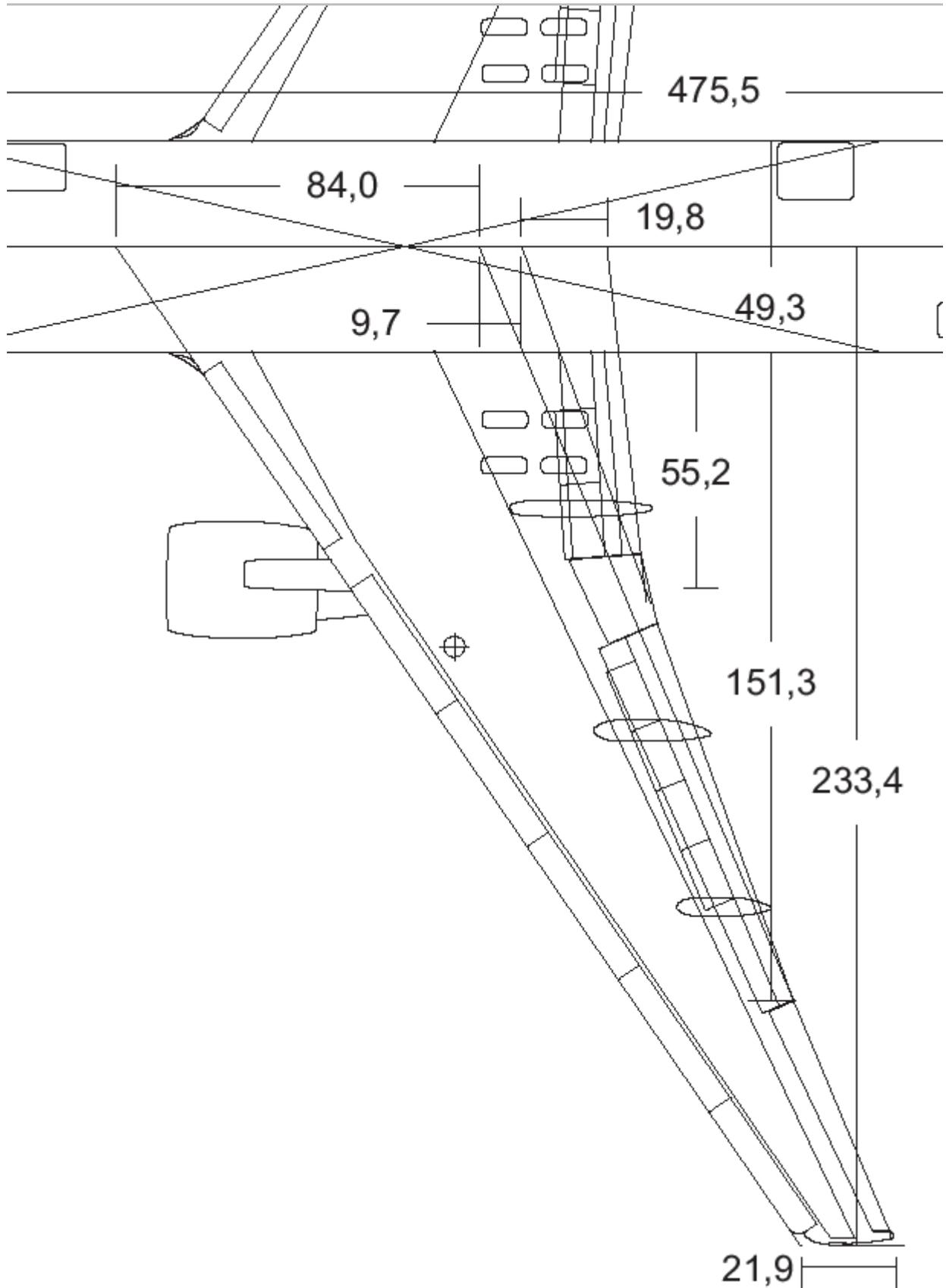
B747-400



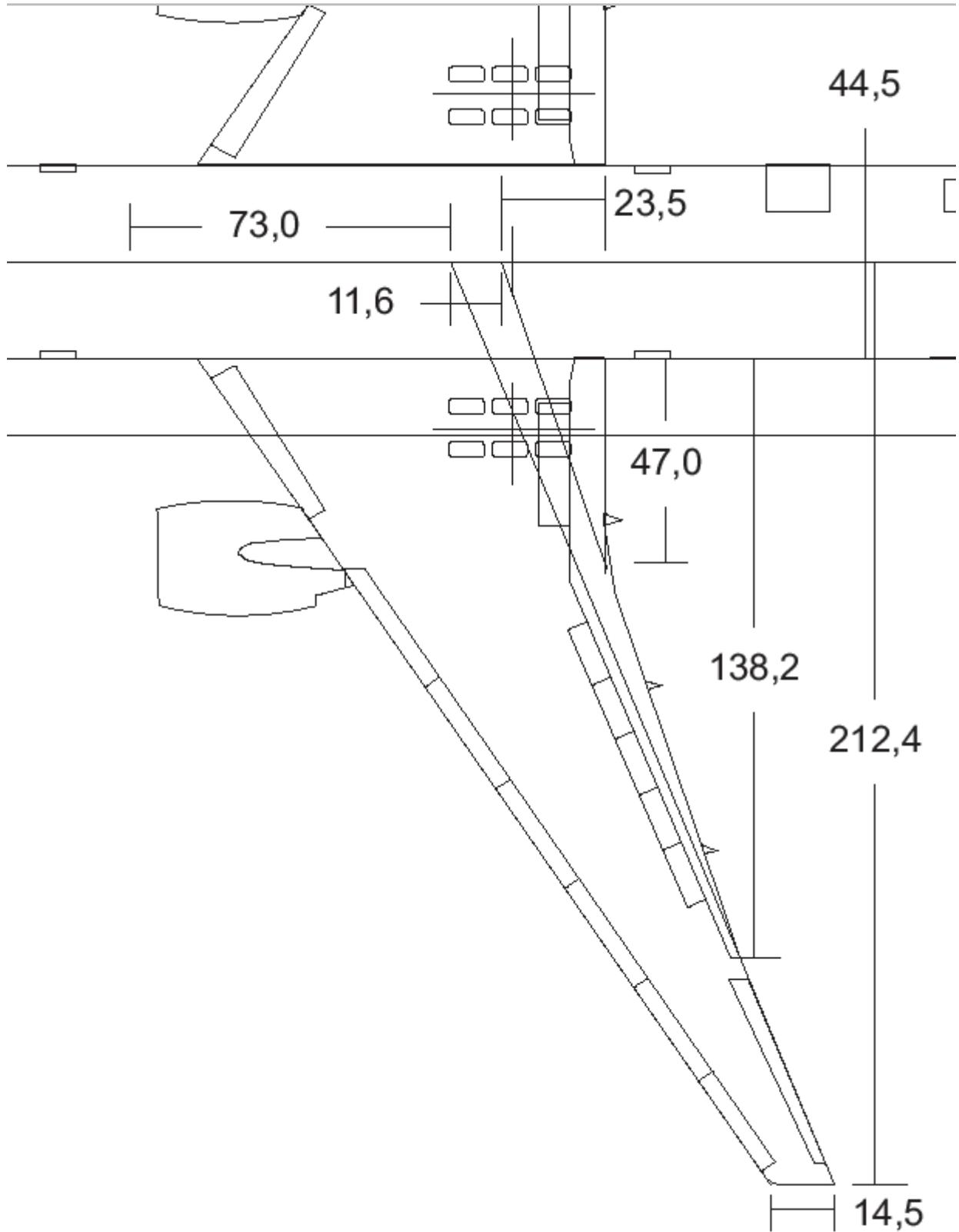




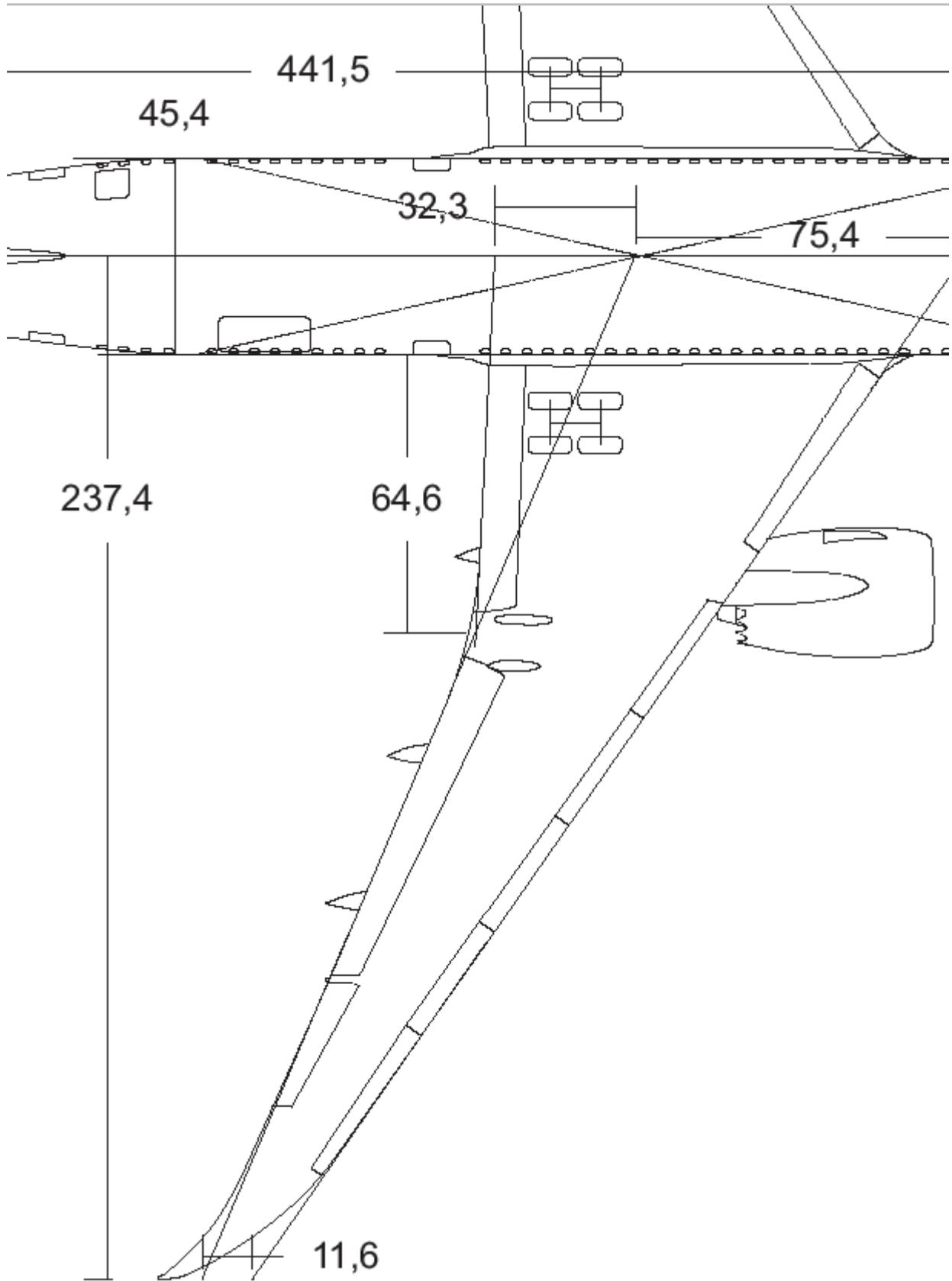
B767-200



B777-200

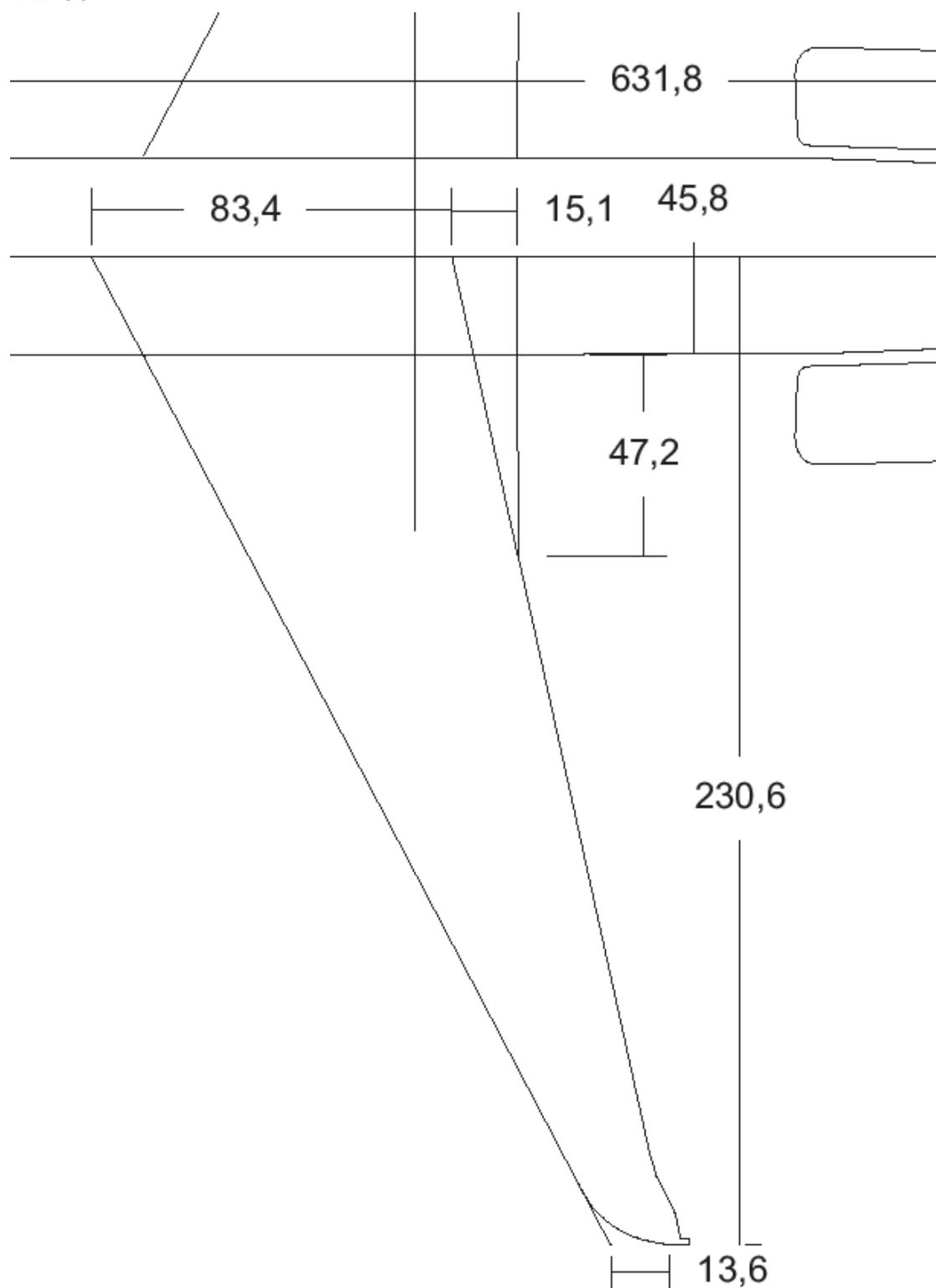


200 ET 1 IN

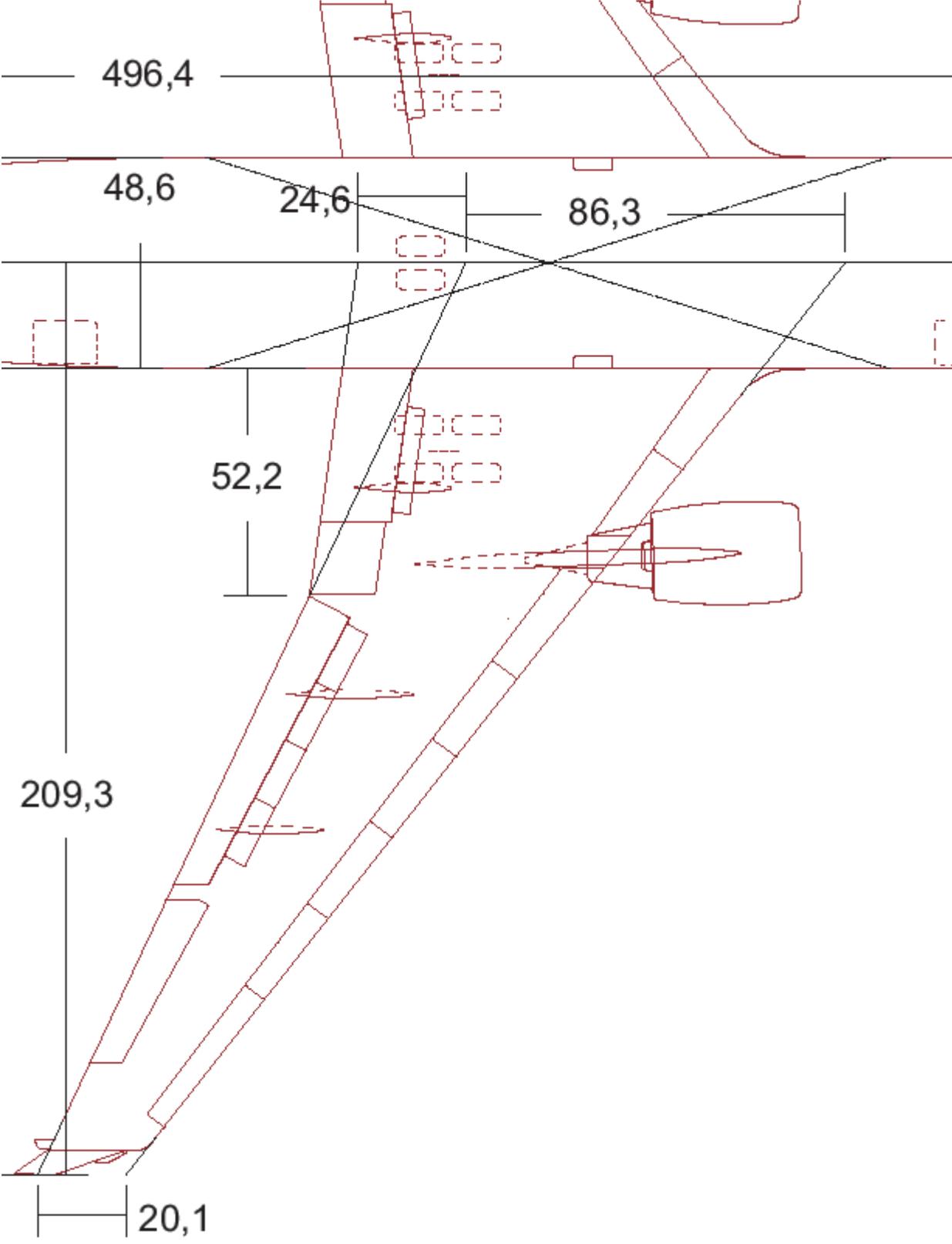


Zeichnungen Fokker- und MD Flugzeuge

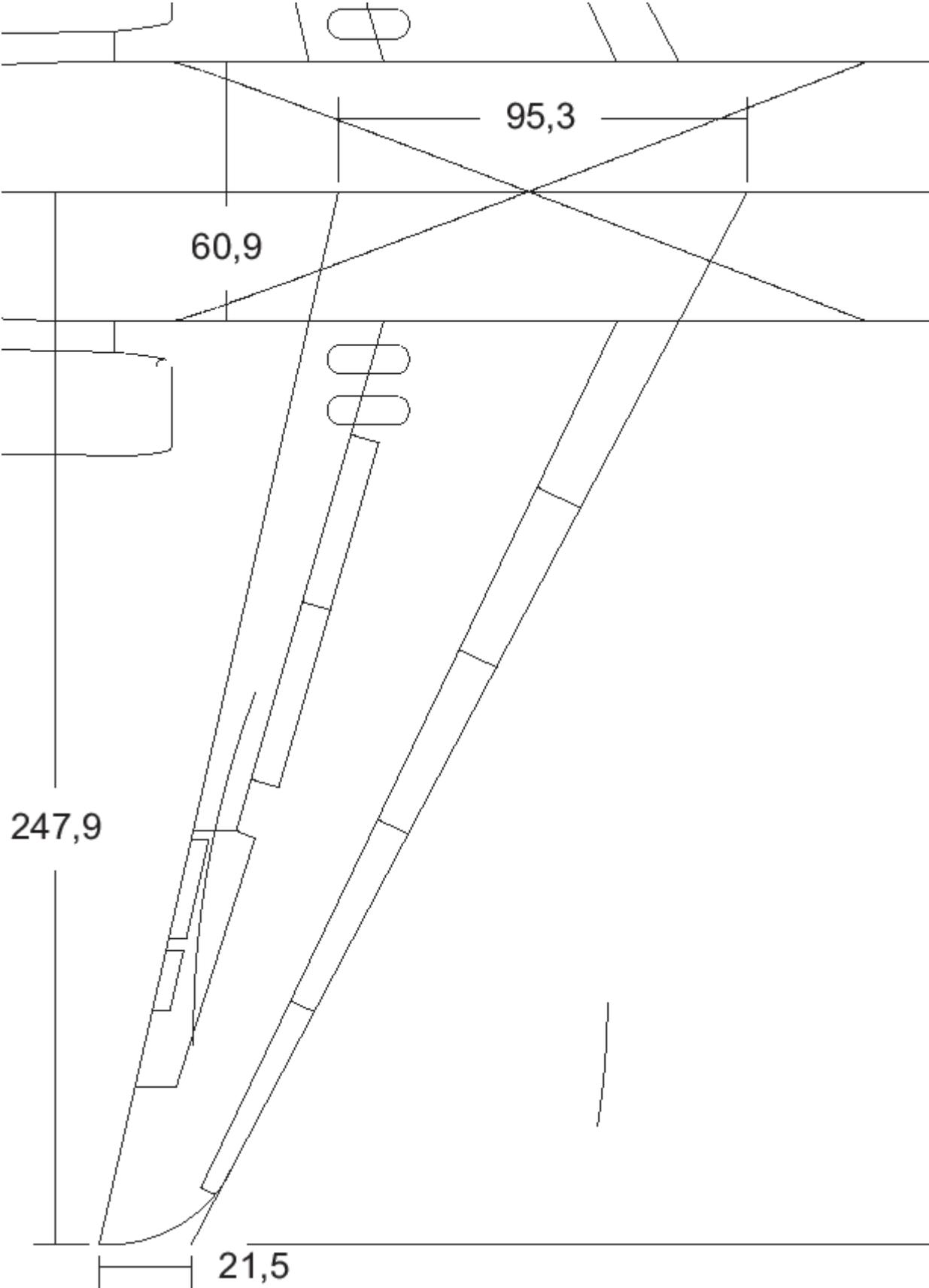
MD-80



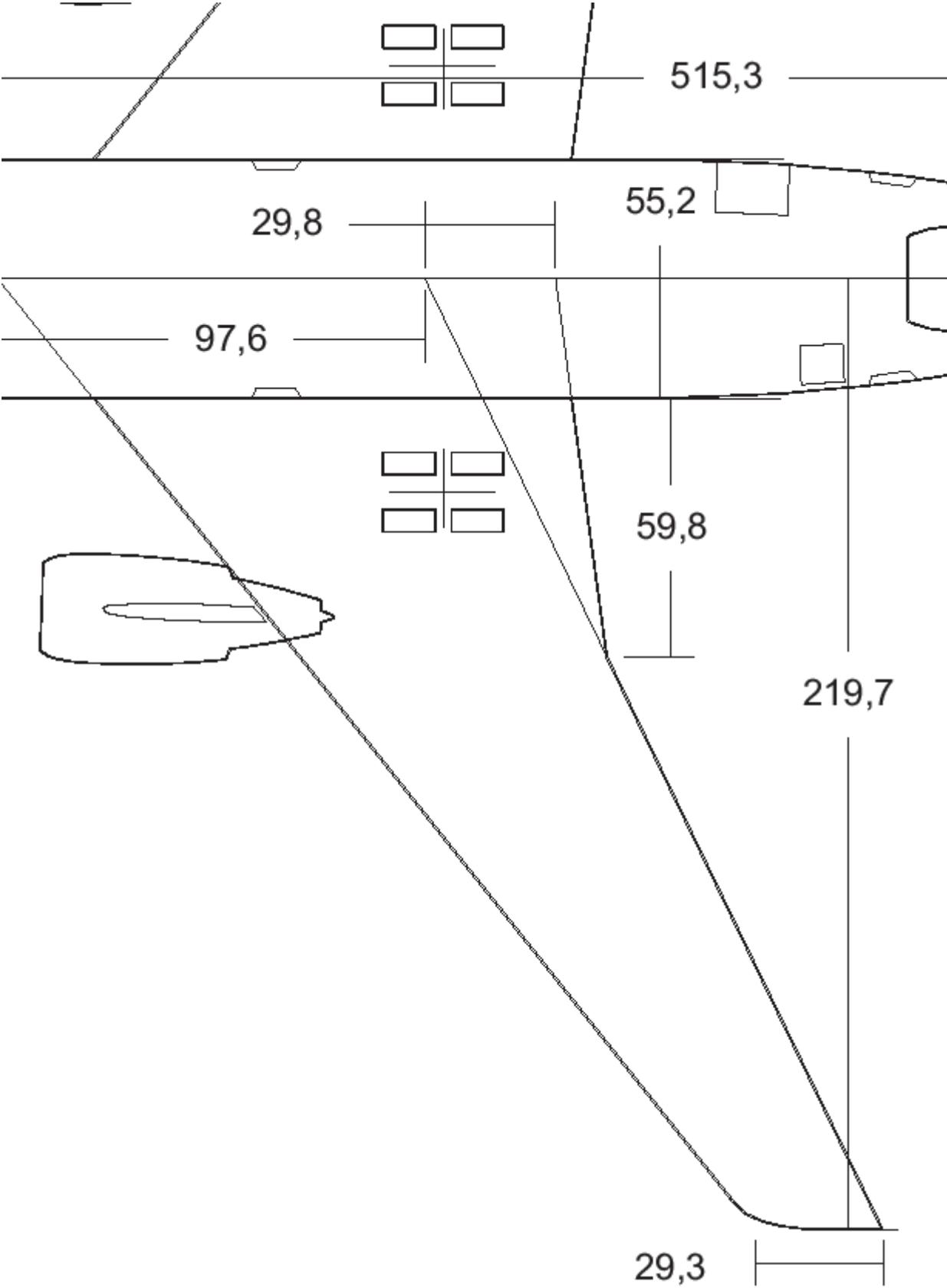
MD-11



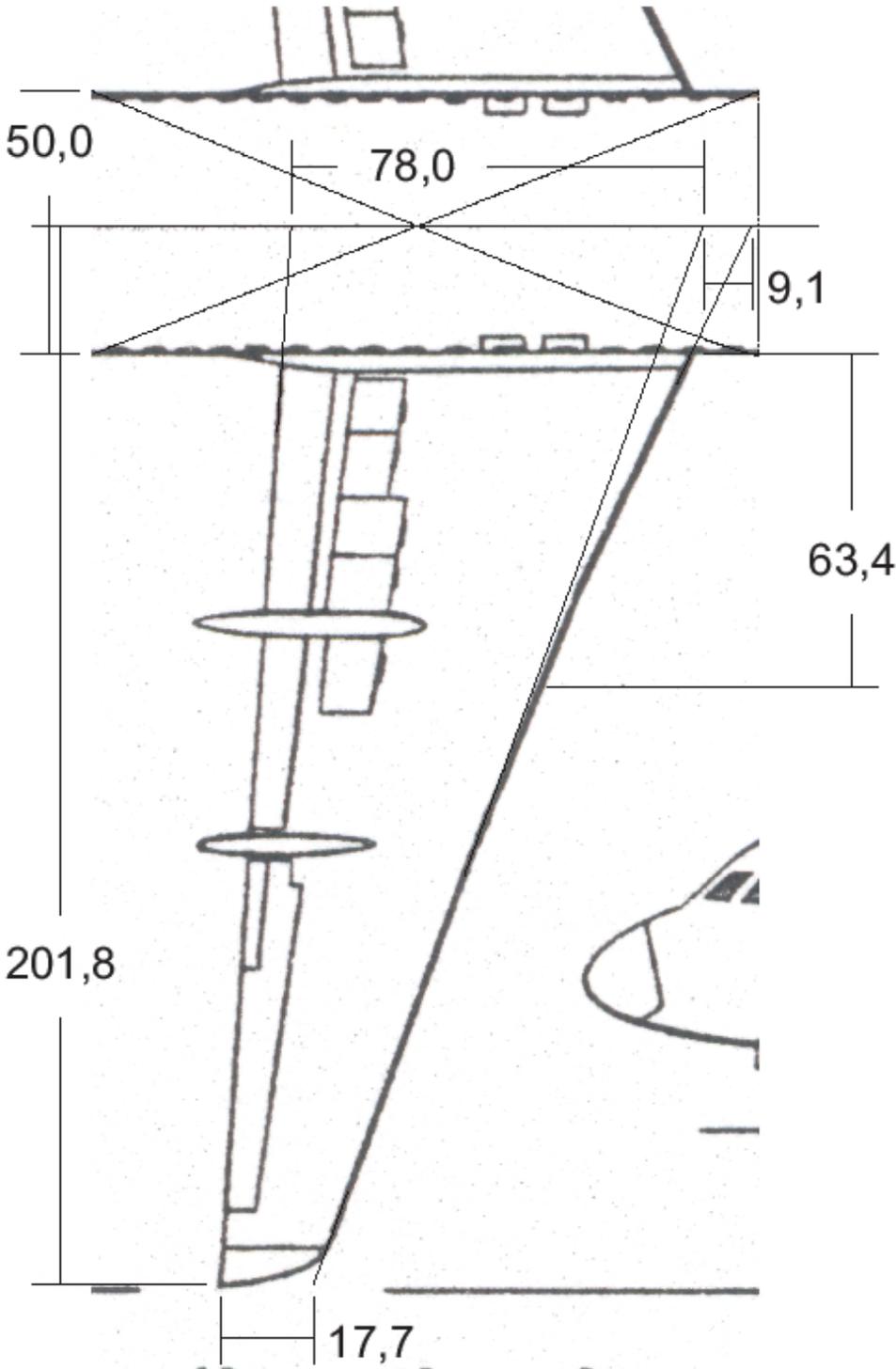
DC-9



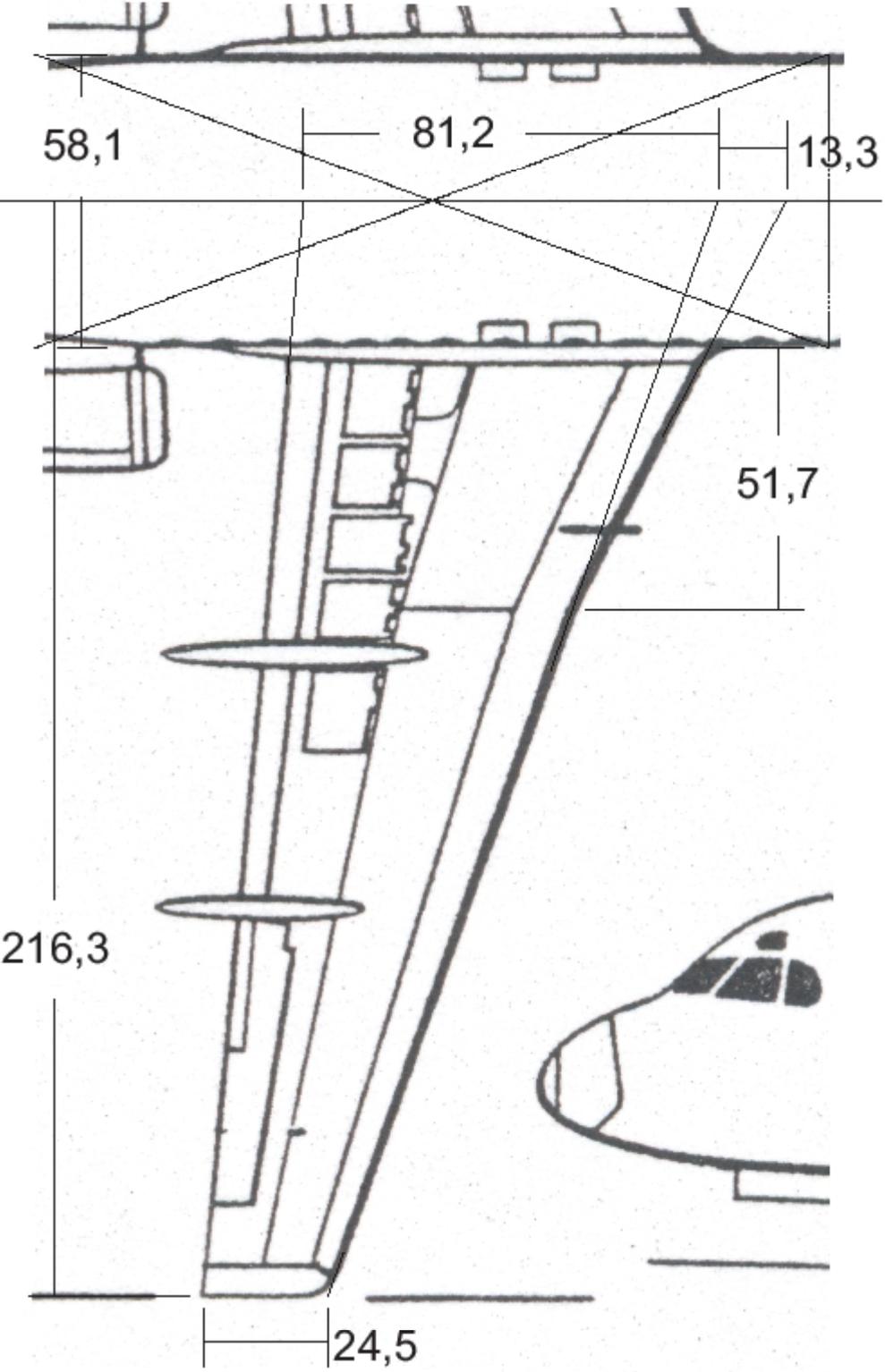
DC-10-10



F-100



F-28



Anhang C: Berechnungstabellen

Tabelle zur Berechnung der Reverenzflügelflächen

Flugzeug	S _{refHerst.} [m ²]	S _{ref>Total} [m ²]	Δ %	S _{refAirbus} [m ²]	Δ %	S _{refBoeing} [m ²]	Δ %
B707-320	283,4	315,9	11,5	313,1	10,5	306,2	8,0
B727-200	157,9	158,9	0,8	156,7	-0,7	153,4	-2,8
B737-200	102,0	102,8	0,8	100,2	-1,7	96,9	-5,0
B737-800	125,0	114,4	-8,5	111,9	-10,5	108,1	-13,5
B747-200	511,0	535,6	4,8	529,4	3,6	520,0	1,8
B747-400	541,2	571,6	5,8	565,3	4,5	554,8	2,5
B747-8	524,9	583,5	11,2	577,7	10,1	567,3	8,1
B757-200	185,3	186,5	0,7	184,6	-0,4	182,3	-1,6
B767-200	283,3	290,8	2,7	287,2	1,4	283,3	0,0
B777-200	427,8	453,6	6,0	447,0	4,5	437,7	2,3
B787-8	347,0	376,4	8,5	371,1	6,9	362,1	4,3
MD-80	118,0	118,9	0,8	117,5	-0,5	116,6	-1,2
MD-11	338,9	367,9	8,5	362,1	6,8	356,8	5,3
DC-9	86,8	87,5	0,8	86,6	-0,2	87,5	0,8
DC-10-10	367,7	354,1	-3,7	348,2	-5,3	342,9	-6,7
F-100	93,5	97,3	4,1	96,2	2,9	96,2	2,8
F-28 1000	79,0	80,4	1,7	79,2	0,3	78,8	-0,2

?????

Flugzeug	$S_{ref747??}$ [m ²]	Δ %	$S_{refMD&Fok}$ [m ²]	Δ %	b [m]	D_f [m]	$D_{f,c}$ [m]	L_f [m]
B707-320	300,7	6,1	274,3	-3,2	44,42	3,76	3,77	100,34
B727-200	150,6	-4,6	141,5	-10,4	32,92	3,76	3,76	100,04
B737-200	94,8	-7,1	89,2	-12,5	28,35	3,78	3,78	100,60
B737-800	106,1	-15,1	99,7	-20,3	34,31	3,76	3,75	99,81
B747-200	506,1	-1,0	455,4	-10,9	59,64	6,50	6,45	99,17
B747-400	541,6	0,1	488,9	-9,7	64,92	6,50	6,49	99,88
B747-8	553,2	5,4	492,9	-6,1	68,66	6,50	6,50	100,00
B757-200	180,3	-2,7	172,1	-7,1	38,05	3,76	3,77	100,22
B767-200	277,6	-2,0	256,7	-9,4	47,57	5,03	5,02	99,88
B777-200	426,4	-0,3	382,3	-10,6	60,93	6,19	6,38	103,11
B787-8	355,9	2,6	331,1	-4,6	60,12	5,77	5,75	99,63
MD-80	115,9	-1,8	113,5	-3,8	32,85	3,35	3,26	97,38
MD-11	352,5	4,0	339,2	0,1	51,66	6,02	6,00	99,63
DC-9	87,5	0,8	87,5	0,8	27,25	3,35	3,35	99,92
DC-10-10	337,8	-8,1	323,8	-12,0	47,35	6,03	5,95	98,65
F-100	95,5	2,2	93,5	0,0	28,08	3,30	3,48	105,41
F-28 1000	78,3	-0,9	76,8	-2,8	25,07	3,30	3,37	102,03

Flugzeug	$L_{r,c}$ [m]	C_t [m]	$C_{bt,c}$ [m]	$C_{bt,r}$ [m]	S_{bt} [m ²]	$S_{bt,o}$ [m ²]	C_{lec} [m]	Y_{le} [m]	$C_{le,r}$ [m]	
B707-320	46,51	99,80	2,81	9,54	8,97	274,32	239,51	0,00	0,00	0,00
B727-200	46,76	100,16	2,33	6,27	5,82	141,51	118,80	0,79	5,06	0,58
B737-200	30,71	100,58	1,55	4,74	4,32	89,24	72,20	1,06	3,30	0,68
B737-800	29,79	99,40	0,96	4,85	4,42	99,67	82,25	1,06	3,64	0,70
B747-200	69,38	99,40	3,92	11,35	10,54	455,43	384,29	1,70	17,83	1,44
B747-400	68,61	99,98	3,45	11,61	10,79	488,94	416,13	1,66	18,34	1,41
B747-8	74,33	97,41	2,92	11,44	10,64	492,93	421,17	1,72	17,83	1,45
B757-200	47,73	100,86	1,75	7,29	6,75	172,09	145,69	0,00	0,00	0,00
B767-200	48,46	99,89	2,23	8,56	7,89	256,69	215,31	0,00	0,00	0,00
B777-200	64,47	101,17	2,08	10,47	9,62	382,35	320,17	0,00	0,00	0,00
B787-8	55,90	99,99	1,47	9,55	8,77	331,14	278,29	0,00	0,00	0,00
MD-80	45,00	99,96	0,97	5,94	5,43	113,48	94,43	0,00	0,00	0,00
MD-11	61,26	100,10	2,48	10,65	9,70	339,17	277,92	0,00	0,00	0,00
DC-9	31,82	100,01	1,18	5,24	4,74	87,47	70,75	0,00	0,00	0,00
DC-10-10	55,53	99,96	3,16	10,52	9,58	323,75	263,16	0,00	0,00	0,00
F-100	35,85	64,54	1,23	5,43	4,93	93,48	76,39	0,63	4,41	0,46
F-28 1000	29,86	53,76	1,42	4,71	4,27	76,78	61,97	0,77	3,00	0,50

Flugzeug	$S_{te,g}$ [m ²]	$S_{te,d}$ [m ²]	$S_{te,l}$ [m ²]	$S_{te,l,ts}$ [m ²]	$C_{te,c}$ [m]	Y_{te} [m]	$C_{te,r}$ [m]	$S_{te,d}$ [m ²]		
B707-320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,51	7,36	2,00	23,20	14,72
B727-200	5,48	5,48	2,91	2,57	0,89	1,75	4,90	1,27	11,89	6,21
B737-200	5,51	5,51	2,24	3,27	0,88	1,56	3,30	0,99	8,08	3,28
B737-800	5,85	5,85	2,54	3,30	0,79	1,60	3,67	1,06	8,88	3,88
B747-200	35,88	35,88	25,66	10,21	6,85	3,40	9,77	2,55	44,33	24,96
B747-400	35,90	35,90	25,91	10,00	6,28	3,50	10,09	2,65	46,71	26,72
B747-8	36,27	36,27	25,95	10,32	5,92	0,80	17,83	0,67	16,80	12,02
B757-200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,89	5,73	1,42	14,40	8,16
B767-200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	15,42	0,85	17,73	13,10
B777-200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,66	19,82	1,44	38,13	28,53
B787-8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,09	8,18	3,02	45,25	24,73
MD-80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,08	3,36	0,72	5,42	2,41
MD-11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,04	6,44	2,07	28,70	13,33
DC-9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DC-10-10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,21	6,44	2,19	30,38	14,10
F-100	3,84	3,84	2,03	1,80	0,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F-28 1000	3,58	3,58	1,49	2,09	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Flugzeug	$S_{te,l}$ [m ²]	$S_{te,l,ta}$ [m ²]	$C_{te,c2}$ [m]	Y_{te2} [m]	$C_{te,r2}$ [m]	$S_{te2,o}$ [m ²]	$S_{te2,l}$ [m ²]	$S_{te2,r,ta}$ [m ²]	
B707-320	8,48	3,07	1,99	7,36	1,58	18,34	11,84	6,71	2,43
B727-200	5,68	1,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B737-200	4,80	1,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B737-800	5,00	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B747-200	19,37	7,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B747-400	19,99	6,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B747-8	4,78	2,74	2,64	10,95	2,04	37,55	22,33	15,22	5,36
B757-200	6,24	2,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B767-200	4,62	3,35	2,02	5,63	1,39	16,42	7,84	8,58	2,27
B777-200	9,60	6,96	3,37	6,74	2,31	33,15	15,57	17,58	4,33
B787-8	20,52	6,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MD-80	3,00	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MD-11	15,37	4,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DC-9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DC-10-10	16,28	5,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F-100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F-28 1000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Flugzeug	S_{cs} [m ²]	Faktor	$B/2_d$ [mm]	C_{td} [mm]	$C_{bt-c,d}$ [mm]	$C_{ie,c,d}$ [mm]	$Y_{ie,d}$ [mm]
B707-320	47,20	0,099285	223,70	28,30	96,10	0,00	0,00
B727-200	28,80	0,079021	208,30	29,50	79,30	10,00	64,00
B737-200	22,52	0,062832	225,60	24,70	75,50	16,90	52,60
B737-800	23,23	0,086076	199,30	11,20	56,30	12,30	42,30
B747-200	94,47	0,157611	189,20	24,90	72,00	10,80	113,10
B747-400	96,55	0,159901	203,00	21,60	72,60	10,40	114,70
B747-8	96,22	0,181085	189,60	16,10	63,20	9,50	98,50
B757-200	30,73	0,083370	228,20	21,00	87,50	0,00	0,00
B767-200	50,98	0,101907	233,40	21,90	84,00	0,00	0,00
B777-200	82,74	0,143432	212,40	14,50	73,00	0,00	0,00
B787-8	68,06	0,126622	237,40	11,60	75,40	0,00	0,00
MD-80	20,61	0,071227	230,60	13,60	83,40	0,00	0,00
MD-11	70,84	0,123411	209,30	20,10	86,30	0,00	0,00
DC-9	15,88	0,054962	247,90	21,500000	95,30	0,00	0,00
DC-10-10	70,96	0,107761	219,70	29,300000	97,60	0,00	0,00
F-100	17,80	0,069574	201,80	17,70	78,00	9,10	63,40
F-28 1000	15,74	0,057952	216,30	24,50	81,20	13,30	51,70

Flugzeug	$C_{te,c,d}$ [mm]	$Y_{te,d}$ [mm]	$C_{te,c2,d}$ [mm]	$Y_{te2,d}$ [mm]	$D_{t,d}$ [mm]	$L_{t,d}$ [mm]
B707-320	25,30	74,10	20,00	74,10	38,00	488,50
B727-200	22,20	62,00	0,00	0,00	47,80	591,70
B737-200	24,80	52,60	0,00	0,00	60,20	488,70
B737-800	18,60	42,60	0,00	0,00	43,60	346,10
B747-200	21,60	62,00	0,00	0,00	40,90	440,20
B747-400	21,90	63,10	0,00	0,00	40,60	429,10
B747-8	4,40	98,50	14,60	60,50	35,90	410,50
B757-200	22,70	68,70	0,00	0,00	45,20	572,50
B767-200	9,70	151,30	19,80	55,20	49,30	475,50
B777-200	11,60	138,20	23,50	47,00	44,50	449,50
B787-8	32,30	64,60	0,00	0,00	45,40	441,50
MD-80	15,10	47,20	0,00	0,00	45,80	631,80
MD-11	24,60	52,20	0,00	0,00	48,80	496,40
DC-9	0,00	0,00	0,00	0,00	60,90	579,00
DC-10-10	29,80	59,80	0,00	0,00	55,20	515,30
F-100	0,00	0,00	0,00	0,00	50,00	515,30
F-28 1000	0,00	0,00	0,00	0,00	58,10	515,30