



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

**Memo**

**Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau**

# **Aerodynamik eines Wasserstoffaußentanks**

**Martin Oehlke**

**26. Juni 2009**



# Nomenklatur

## Lateinische Formelzeichen

$C_{D0}$	Nullwiderstandsbeiwert	-
$C_F$	Oberflächenwiderstandsbeiwert	-
$D_{eff}$	effektiver Durchmesser	m
$d_T$	Durchmesser der Triebwerksgondel	m
$FF$	Formfaktor	-
$l$	Referenzlänge	m
$L_{Bug}$	Buglänge	m
$l_T$	Länge der Triebwerksgondel	m
$M$	Machzahl	-
$Q$	Interferenzfaktor	-
$Re$	Reynoldszahl	-
$S_{ref}$	Referenzoberfläche	m <sup>2</sup>
$S_{wet}$	Benetzte Oberfläche	m <sup>2</sup>
$U_\infty$	Anströmgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$

## Griechische Formelzeichen

$\nu$	kinematische Zähigkeit	$\frac{m^2}{s}$
-------	------------------------	-----------------

# Ermittlung des Nullwiderstandsbeiwertes

Im folgenden Abschnitt wird der Widerstandsbeiwert, sowie der Interferenzwiderstand des Außentanks ermittelt. Zur Ermittlung gibt es die Handbuchmethode nach „USAF stability and control Datcom“, die sich gut eignen würde, leider ist die Ermittlung des Widerstandsbeiwertes nach Datcom nicht möglich, da die Methode erst ab Mach 0,6 anzuwenden ist. Die ATR 72 fliegt jedoch maximal Mach 0,45. Für Machzahlen unter 0,6 wird ausdrücklich erwähnt, dass es nicht möglich ist die Ergebnisse von höheren Machzahlen zu interpolieren. Somit kommt die Berechnung des Widerstandsbeiwertes nach Datcom nicht in Frage.

Im Luftfahrttechnischen Handbuch findet sich eine Methode für die Berechnung von Unterflügellasten im Unterschallbereich von Mach 0 bis Mach 0,9. Die Methode ist für Außenlasten rotationssymmetrischer Form ausgelegt und berechnet sogar den Interferenzwiderstand zwischen Außenlast und Tragflügel. Leider ist jedoch das Paper „ESDU 78019: Profile drag of axisymmetric bodies at zero incidence for subcritical Mach numbers“ auf das sich die Berechnung im **LTH 2008** bezieht nicht mehr erhältlich und auch in keiner Bibliothek vorhanden, so dass die Berechnung nach **LTH 2008** ebenfalls nicht in Frage kommt.

Zur Anwendung kommt die Abschätzung des Widerstandes nach **Scholz 1999** anhand der ebenen Platte. Dieses Verfahren berücksichtigt Interferenz und 3d-Effekte mit Hilfe von Korrekturfaktoren.

## 1.1 Geometrie des Tanks

Um die Berechnung durchführen zu können muss zuvor die Geometrie bekannt sein. Aus der Tankauslegung im Abschnitt 4 und 5 ergibt sich ein Tank mit folgenden Daten:

Durchmesser:	1,50 m
Länge:	3,06 m
Länge zylindrischer Teil:	2,47 m
Dicke Isolation:	0,10 m

Somit ergibt sich ein Gesamtdurchmesser von 1,70 m. Es wird ein Abstand zur Verkleidung aufgrund von Dehnung von je 0,05 m angenommen, die aerodynamische Verkleidung hat eine angenommene Dicke von 0,02 m. Somit ergibt sich ein Außendurchmesser von insgesamt 1,84 m.

Es gilt nun passende aerodynamische Verkleidungen zu finden. Das Ziel ist einen möglichst geringen Widerstand zu erzeugen. Das Gewicht der Verkleidung spielt eine untergeordnete Rolle, da es mit  $4,2 \text{ kg/m}^2$  gering ist. **Thudt 1994** Wichtig ist, dass es nicht zu Ablösungen mit Wirbelbildung kommt, da in diesem Zustand der Widerstand stark ansteigt. Diese Ablösungen werden von einem hohen Druckgradienten im Bereich der Nase und des Hecks des Tanks hervorgerufen, welche durch zu stumpfe bzw. kurze Nasen- und Heckverkleidungen hervorgerufen werden. Um diese hohen Druckgradienten zu vermeiden muss die Verkleidung einen „sanften“ Übergang zwischen Nase und zylindrischem Teil und zwischen zylindrischem Teil und Heckverkleidung schaffen.

Laut **Scholz 1999** wird bei Verkehrsflugzeugen die Nasenlänge des Rumpfes nach der Formel

$$L_{Bug} \approx 1,7 \cdot D_{eff} \quad (1.1)$$

berechnet. Der effektive Durchmesser  $D_{eff}$  ergibt sich aus der Wurzel aus dem Produkt von Höhe und Breite des Querschnitts und ist somit bei kreisrunden Querschnitten entsprechend dem Durchmesser, also 1,84 m.

Hier wird von dem Faktor 1,7 für den Bug abgewichen, da sich eine Buglänge von 3,13 m ergeben würde, was gemessen an der Länge des Zylindrischen Teils viel zu lang wäre und zu einem erhöhten Reibwiderstand führen würde. Um Ablösung und Wirbel zu verhindern genügt ein kürzerer Bug. Es wird ein Faktor  $\nu$  von 1,1 gewählt, womit sich eine Buglänge von 2,02 m ergibt. Üblich für die Auslegung eines Flugzeughecks ist ein Faktor von 3,5. Dies wird hier ebenfalls nicht zur Anwendung gebracht, da dies ein viel zu langes Heck verursachen würde. Für das Heck wird der Faktor 1,63 gewählt, so dass sich eine Hecklänge von 3,00 m ergibt. Somit hat der Tank mit Verkleidung eine Gesamtlänge von 7,48 m, bei einem Durchmesser von 1,84 m. Die Längen von Bug und Heck sind in Absprache mit einem Mitarbeiter des Instituts „Aerodynamik und Strömungsmechanik“ des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt gewählt worden.

## 1.2 Berechnung des Nullwiderstandsbeiwertes

Die Berechnung wird nach dem Schema in (Scholz 1999) für Flugzeugtriebwerke durchgeführt. Dabei ist die Flughöhe 7000 m und die Fluggeschwindigkeit 138 m/s. Dabei ergibt sich der Gesamtwiderstand aus der Summe folgender Formel:

$$C_{D0} = C_f \cdot FF \cdot Q \cdot \frac{S_{wet}}{S_{ref}} \quad (1.2)$$

$C_f$  bezeichnet den Oberflächenwiderstand der mit Hilfe der Abschätzung einer ebenen Platte ermittelt wird.

$$C_f = \frac{0,455}{(\log Re)^{2,58} \cdot (1 + 0,144 \cdot M^2)^{0,65}} \quad (1.3)$$

Die Reynoldszahl  $Re$  ergibt sich aus

$$Re = \frac{l \cdot U_\infty}{\nu} \quad (1.4)$$

Wobei  $l$  die Länge des Tanks ist,  $U_\infty$  die Geschwindigkeit der freien Anströmung von 138 m/s und  $\nu$  die kinematische Zähigkeit mit  $26,479 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ . Damit ergibt sich eine Reynoldszahl von

$$Re = 3,9 \cdot 10^7 \quad (1.5)$$

Die Machzahl beträgt 0,44. Somit ergibt sich:

$$C_f = \frac{0,455}{(\log 3,9 \cdot 10^7)^{2,58} \cdot (1 + 0,144 \cdot 0,44^2)^{0,65}} \quad (1.6)$$

$$C_f = 0,00239 \quad (1.7)$$

$FF$  ist ein Formfaktor für Triebwerksgondeln, der dreidimensionale Effekte berücksichtigt. Er ergibt sich nach der Formel:

$$FF = 1 + \frac{0,35}{l_T / d_T} \quad (1.8)$$

$$FF = 1 + \frac{0,35}{7,48 \text{ m} / 1,84 \text{ m}} \quad (1.9)$$

$$FF = 1,09 \quad (1.10)$$

Q ist ein Interferenzfaktor für die Interferenz zwischen Außentank und Tragfläche und wird mit 1,3 angenommen, da der Abstand des Außentanks zur Tragfläche kleiner ist als der Durchmesser des Außentanks. Somit ergibt sich der Nullwiderstand zu:

$$C_{D0} = 0,00239 \cdot 1,09 \cdot 1,3 \cdot \frac{37,61 \text{ m}^2}{122 \text{ m}^2} \quad (1.11)$$

$$\underline{\underline{C_{D0} = 0,00104}} \quad (1.12)$$

(bezogen auf die gespülte Oberfläche der Tragfläche von  $122 \text{ m}^2$ )

Der absolute Wert des Widerstandes beträgt 713 N.

Der induzierte Widerstand spielt keine Rolle, da der Tank keinen Auftrieb erzeugt, der Wellenwiderstand spielt ebenfalls keine Rolle, da die Fluggeschwindigkeit bei Mach 0,44 liegt.

# Literaturverzeichnis

- LTH 2008** SONNEMANN, Dirk; BOEHM, Martin: *Strukturmechanische und thermodynamische Auslegung von LH<sub>2</sub>-Tankstrukturen*. München: Universität der Bundeswehr München, 2008
- Scholz 1999** SCHOLZ, Dieter: *Script Flugzeugentwurf*. Hamburg, Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Dept. Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Vorlesungsskript, 1999
- Thudt 1994** THUDT, K.; EHRHARDT, J.: *Cryoplane Metallic Tank Design*. München: MAN Technologie, 1994

# Anhang A

## Excel-Tool „Tankdesign“

Das Excel-Tool bietet die Möglichkeit mit wenigen Eingaben und ohne detaillierte Kenntnisse über die Details der Auslegung eines Wasserstofftanks, einen zylindrischen Tank wahlweise mit Halbkugel- oder Klöpperboden beliebiger Größe auszulegen. Es genügt entsprechende Werte in die grün markierten Felder einzutragen. In den gelben Feldern werden die Ergebnisse ausgegeben. Die blauen Felder, stellen Werte, die auf einem anderen Excel-Tabellenblatt berechnet worden sind dar und dürfen nicht verändert werden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	<b>Tankdesign</b>									
2	Eingabegrößen sind grün markiert --> hier eintippen									
3	Übergabewerte aus anderer Rechnung --> so lassen									
4	Ausgabegrößen sind gelb markiert --> anschauen									
5										
6	<b>Vorgehen:</b>									
7	1.	Auf diesem Tabellenblatt grüne Zellen ausfüllen								
8	2.	Auf Tabellenblatt "Isolationsdicke" grüne Zellen ausfüllen								
9	3.	Auf Tabellenblatt "Widerstand Scholz" grüne Zellen ausfüllen								
10										
11	<b>Parameter Geometrieberechnung Inntank</b>				<b>Einheit</b>	<b>Wert</b>	<b>Bemerkungen</b>			
12	Tankvolumen				[m <sup>3</sup> ]	5,00				
13	Außendurchmesser				[m]	1,50				
14	Berechnung nach...				[-]	LTH				
15	Art des Bodens				[-]	Klöpper	Klöpperboden nach DIN 28011			
16	Wandstärke berechnet Zylinderteil				[mm]	1,43				
17	Wandstärke berechnet Boden Kalotte, Halbkugel				[mm]	0,72				
18	Wandstärke berechnet Boden Krempe				[mm]	3,12				
19	Wandstärke gewählt Zylinderteil				[mm]	1,50				
20	Wandstärke gewählt Kalotte, Halbkugel				[mm]	0,80				
21	Wandstärke gewählt Krempe				[mm]	3,20	Wenn F15="-" dann Eingabe: 0			
22	Werkstoff				[-]	AL-2219				
23	Dichte des Werkstoffes				[kg/m <sup>3</sup> ]	2850				
24	3 Pumpen und Rohre				[kg]	45	empirisch (Luger 1996)			
25	Anti-Spritzwände (1 pro 0,85m und an Kappen)				[kg/(Stk*m <sup>2</sup> )]	1,31	empirisch ermittelt (Thudt 1994)			

**Bild A.1** Excel-Tool "Tankdesign" Eingabemaske

28	<b>Ausgabewerte für Innentank</b>									
29	Innenvolumen Zylindersegment	[m <sup>3</sup> ]	4,33							
30	Innenvolumen Boden (beide)	[m <sup>3</sup> ]	0,67							
31	Volumen Wand Zylinderteil	[m <sup>3</sup> ]	0,0174							
32	Volumen Wand Boden (einer)	[m <sup>3</sup> ]	0,0014							
33	Volumen Wand gesamt	[m <sup>3</sup> ]	0,0202							
34	Außenoberfläche	[m <sup>2</sup> ]	16,04	ohne aerodynamische Verkleidung						
35	Außenvolumen	[m <sup>3</sup> ]	5,02	ohne aerodynamische Verkleidung						
36	Länge Zylindersegment	[m]	2,46							
37	Außenlänge Boden (ein Boden)	[m]	0,29							
38	Gesamtlänge des Druckbehälters	[m]	3,04							
39	Gesamtlänge des Tanks mit aerodynam. Verkleidung	[m]	7,48							
40	Gewicht Tankstruktur	[kg]	111,72							
41	Gewicht Isolation	[kg]	54,94							
42	Gesamtgewicht	[kg]	166,66	ohne aerodynamische Verkleidung						
43	Flächengewicht Struktur bezogen auf Außenoberfläche	[kg/m <sup>2</sup> ]	6,97	ohne aerodynamische Verkleidung						
44	Volumengewicht Struktur bezogen auf Außenvolumen	[kg/m <sup>3</sup> ]	22,26	ohne aerodynamische Verkleidung						
45	Flächengewicht Isolation bezogen auf Außenoberfläche	[kg/m <sup>2</sup> ]	3,43	ohne aerodynamische Verkleidung						
46	Volumengewicht Isolation bezogen auf Außenvolumen	[kg/m <sup>3</sup> ]	10,94	ohne aerodynamische Verkleidung						
47	Flächengewicht gesamt bezogen auf Außenoberfläche	[kg/m <sup>2</sup> ]	10,39	ohne aerodynamische Verkleidung						
48	Volumengewicht gesamt bezogen auf Außenvolumen	[kg/m <sup>3</sup> ]	33,20	ohne aerodynamische Verkleidung						
49	Formfaktor	[-]	1,13	ohne aerodynamische Verkleidung						
50	Oberfläche/Volumen	[-]	3,20	ohne aerodynamische Verkleidung						
51	Gesamtgewicht/Gewicht LH <sub>2</sub>	[-]	0,47	ohne aerodynamische Verkleidung						
52	Gewicht aerodynamische Verkleidung	[Kg]	157,97							
53	Nullwiderstand Tank bezogen auf S <sub>wet</sub> Tragfläche	[-]	0,00104							
54	Nullwiderstand absolut	[N]	713							

**Bild A.2** Excel-Tool "Tankdesign" Ausgabemaske

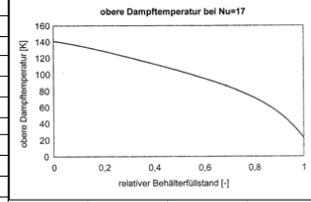
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	<b>Berechnung Wandstärke nach LTH</b>									
2	Eingabegrößen sind grün markiert --> hier eintippen									
3	Übergabewerte aus anderer Rechnung --> so lassen									
4	Ausgabegrößen sind gelb markiert --> anschauen									
5										
6	<b>Parameter für Berechnung AL-2219</b>				<b>Einheit</b>	<b>Wert</b>	<b>Bemerkungen</b>			
7	Außendurchmesser D <sub>a</sub>				[m]	1,50				
8	Differenzdruck Delta p				[Bar]	1,50				
9	Festigkeitskennwert K <sub>20</sub>				[N/mm <sup>2</sup> ]	172,00				
10	Sicherheitsfaktor S				[-]	1,33				
11	Schweißnahtfaktor v <sub>s</sub>				[-]	1,00				
12	Korrosionszuschlag c				[-]	0,00				
13	Berechnungsbeiwert β				[-]	4,3501	über Iteration annähern:			4,3501
14	Bemessungsdruck p				[Bar]	2,48				
15	Bemessungsdruck p				[N/mm <sup>2</sup> ]	0,25				
16	Wandstärke s <sub>z</sub> des inneren Druckbehälters (Zylinder)				[mm]	1,43	Auslegung gegen inneren Überdruck			
17	Wandstärke s <sub>HK</sub> des Halbkugelbodens				[mm]	0,72	Auslegung gegen inneren Überdruck			
18	Wandstärke s <sub>Ka</sub> der Kalotte Klöpperbodens				[mm]	0,72	Auslegung gegen inneren Überdruck			
19	Wandstärke s <sub>Kr</sub> der Krempe des Klöpperbodens				[mm]	3,12	Auslegung gegen inneren Überdruck			
20										
21										
22										

**Bild A.3** Excel-Tool "Tankdesign" Berechnung der Wandstärke nach LTH 2008

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	<b>Berechnung Wandstärke nach AD 2000</b>									
2	Eingabegrößen sind grün markiert --> hier eintippen									
3	Übergabewerte aus anderer Rechnung --> so lassen									
4	Ausgabegrößen sind gelb markiert --> anschauen									
5										
6	<b>Parameter für Berechnung AL-2219</b>				<b>Einheit</b>	<b>Wert</b>	<b>Bemerkungen</b>			
7	Außendurchmesser $D_a$				[mm]	1500,00				
8	Differenzdruck Delta $p$				[Bar]	1,50				
9	Festigkeitskennwert bei Berechnungstemperatur K				[N/mm <sup>2</sup> ]	172,00				
10	Sicherheitbeiwert bei Berechnungsdruck S				[-]	1,50	B0			
11	Schweißnahtfaktor $v$				[-]	1,00	B1			
12	Zuschlag f. Wanddickenunterschreitung $c_1$				[-]	0,00	B0 9.1.2			
13	Abnutzungszuschlag $c_2$				[-]	0,00	B0 9.2.3			
14	Berechnungsbeiwert $\beta$				[-]	4,35				
15	Berechnungsdruck				[Bar]	2,48				
16	Wandstärke $s_z$ des inneren Druckbehälters (Zylinder)				[mm]	3,00	Auslegung gegen inneren Überdruck; mind. 3mm; B1			
17	Wandstärke $s_{HK}$ des Halbkugelbodens				[mm]	3,00	Auslegung gegen inneren Überdruck; mind. 3mm; B1			
18	Wandstärke $s_{Ka}$ der Calotte Klöpperbodens				[mm]	3,00	Auslegung gegen inneren Überdruck; mind. 3mm; B3			
19	Wandstärke $s_{Kr}$ der Krempe des Klöpperbodens				[mm]	3,52	Auslegung gegen inneren Überdruck; mind. 3mm;			

**Bild A.4** Excel-Tool "Tankdesign" Berechnung der Wandstärke nach AD 2000-Merkblättern

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1	<b>Berechnung Isolationsdicke</b>															
2	Eingabegrößen sind grün markiert --> hier eintippen															
3	Übergabewerte aus anderer Rechnung --> so lassen															
4	Ausgabegrößen sind gelb markiert --> anschauen															
5																
6	<b>Parameter für Berechnung Isolationsdicke</b>				<b>Einheit</b>	<b>Wert</b>	<b>Bemerkungen</b>									
7	Außendurchmesser				$D_a$	[m]	1,500									
8	Dicke der Isolierung				$\delta_{iso}$	[m]	0,100	gucken, ob verdampfende Masse LH <sub>2</sub> ok ist (G32/G33)								
9	Durchschnittlicher Behälterfüllstand				$\vartheta_{BFS}$	[-]	0,50									
10	Obere Dampftemperatur				$T_{DO}$	[K]	100	bei Behälterfüllstand 0,5								
11	mittlere Temperatur LH <sub>2</sub> / Siedetemp LH <sub>2</sub>				$T_F/T_S$	[K]	22	zum ablesen Mittelwert zwischen $T_a$ und $T_f$ bilden								
12	mittlere Außenwandtemperatur				$T_A / T_1$	[K]	240	Reiseflug: 200K; Boden: 290K; Mittelwert: 240K								
13	Dichte der Isolierung				$\rho$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	32,00	Polyurethan Freon S. 183 Brewer 1990								
14	Wärmeleitfähigkeit der Isolierung				$\lambda_{iso}$	[W/(m*K)]	0,0168	Polyurethan Freon S. 183 Brewer 1990								
15	spezifische Wärmekapazität des gesättigten Dampfs				$c_p$	[KJ/(Kg*K)]	12,5									
16	Verdampfungsenthalpie				$h_v$	[KJ/Kg]	445,6	bei 22K und 1,5Bar								
17	Nusseltzahl				Nu	[-]	17									
18	Wärmeleitfähigkeit GH <sub>2</sub>				$\lambda$	[W/(m*K)]	0,1815									
19	Innendurchmesser				$D_i$	[m]	1,497									
20	Wärmeübergangskoeffizient				$\alpha_i$	[W/(m <sup>2</sup> *K)]	2,06									
21	Mittlere Austauschfläche				$A_m$	[m <sup>2</sup> ]	5,01									
22	Tankwandfläche der Flüssigkeit				$A_{FF}$	[m <sup>2</sup> ]	2,50									
23	Tankwandfläche des Dampfs				$A_{FD}$	[m <sup>2</sup> ]	2,50									
24	Wärmewiderstand LH <sub>2</sub>				$R_F$	[(m <sup>2</sup> *K)/W]	6,06									
25	Wärmewiderstand GH <sub>2</sub>				$R_D$	[(m <sup>2</sup> *K)/W]	6,55									
26	Mittlere Dampftemperatur				$T_D$	[K]	61,00									
27	Mittlerer Wärmestrom zwischen Außenwand und LH <sub>2</sub>				$Q_{AF}$	[W]	90,10									
28	Mittlerer Wärmestrom zwischen Außenwand und GH <sub>2</sub>				$Q_{AD}$	[W]	68,50									
29	Gesamter Wärmestrom				$Q_{ges}$	[W]	158,60									
30	Mittlere Enthalpieerhöhung des verdampften LH <sub>2</sub>				$\Delta h$	[KJ/Kg]	487,50									
31	Massenstrom des verdampfenden LH <sub>2</sub>				$m$	[Kg/s]	1,7E-04									
32	Verdampfende Wasserstoffmasse nach 3h				$m_{vW}$	[Kg]	1,8									
33	Verdampfende Wasserstoffmasse nach 12h				$m_{vW}$	[Kg]	7,3									
34	Masse der Isolation				$m_{iso}$	[Kg]	51,3									
35	Masse der Dampfsperre				$m_{Dampfsperre}$	[Kg]	3,6	0,225 Kg/m <sup>2</sup> Brewer 1990 Seite 190								
36	Gesamtmasse				$m_{Gesamt}$	[Kg]	54,94									



**Bild A.5** Excel-Tool "Tankdesign" Berechnung der Isolationsdicke

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	<b>Berechnung Nullwiderstand</b>										
2	Eingabegrößen sind grün markiert --> hier eintippen										
3	Übergabewerte aus anderer Rechnung --> so lassen										
4	Ausgabegrößen sind gelb markiert --> anschauen										
5											
6	<b>Parameter für Berechnung Nullwiderstand</b>					<b>Einheit</b>	<b>Wert</b>	<b>Bemerkungen</b>			
7	Außendurchmesser inkl. Verkleidung				$D_a$	[m]	1,840				
8	Dicke der Haut der aerodynam. Verkleidung				$S_{Haut}$	[m]	0,020				
9	Flächengewicht der aerodyn. Verkleidung					[Kg/m <sup>2</sup> ]	4,20				
10	Fluggeschwindigkeit				V	[m/s]	138,0				
11	Flughöhe				h	[m]	7000				
12	Referenzflügelfläche (bepülte Fläche)				$S_{ref}$	[m <sup>2</sup> ]	122,0				
13	Temperatur laut ICAO Standardatmosphäre				T	[°K]	242,66				
14	Schallgeschwindigkeit in Höhe				a	[m/s]	312,45				
15	Dichte der Luft				$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,5895				
16	Viskosität der Luft				$\mu$	[kg/(m*s)]	1,5610E-05				
17	Kinematische Zähigkeit				$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	2,6480E-05				
18	Benetzte Oberfläche des Tanks				$S_{wet}$	[m <sup>2</sup> ]	37,61				
19	Länge Nase				$l_{Nase}$	[m]	2,02				
20	Länge Heck				$l_{Heck}$	[m]	3,00				
21	Gesamtlänge Tank mit Verkleidung				$l_{Gesamt}$	[m]	7,48				
22	Reynoldszahl				Re	[-]	3,9E+07				
23	Machzahl				M	[-]	0,44				
24	Reibwiderstandsbeiwert				$C_{f,turbulent}$	[-]	0,00239				
25	Formfaktor				FF	[-]	1,09				
26	Interferenzfaktor				Q	[-]	1,30				
27	Nullwiderstand Tank				$C_{D0}$	[-]	0,00338				
28	Nullwiderstand Tank bezogen auf $S_{wet}$ Tragfläche				$C_{D0}$	[-]	0,00104				
29	Nullwiderstand absolut				$W_R$	[N]	713,44				

**Bild A.6** Excel-Tool "Tankdesign" Berechnung des Nullwiderstandes nach **Scholz 1999**

# **Anhang B**

## **CD-ROM**

In diesem Anhang befindet sich die CD-Rom mit den folgenden Daten:

- die Projektarbeit als Word- und als PDF-Datei
- Excel-Tool „Tankdesign“