

**Bericht K 12-11**

**Verbundprojekt HAI-TECH  
Strömungsgünstige Oberflächen durch Lacksysteme**

**Teilprojekt  
Numerische Berechnungen und Modellversuche zur Optimierung und  
Überprüfung der Wirksamkeit reibungswiderstandsreduzierender  
Lacksysteme**

**Teilaufgabe  
Widerstandsversuche mit schräg angeströmten Riblets im HYKAT**

**Auftraggeber  
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie**

## Dokumentenkontrollblatt

<b>Auftraggeber</b>	: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
<b>Projekt</b>	: HAI-TECH
<b>Projekt Nr.</b>	: 635010
<b>Report Nr.</b>	: K 12-11
<b>Berichtstitel</b>	: Widerstandsversuche mit schräg angeströmten Riblets im HYKAT
<b>Datei</b>	: K12_11.doc

Rev. Nr.	Datum	Grund der Ausgabe	Erstellt von	Geprüft von	Genehmigt von
	26.4.2011	Teilbericht	Jo		Jo
A					
B					
C					
D					
E					

<b>Zusammenfassung:</b>	<p>Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie wurden vergleichende Widerstandsmessungen im Rahmen des Verbundprojektes HAI-TECH durchgeführt, um den Einfluss der Schräganströmung der Riblet-Strukturierung auf deren reibungswiderstandsreduzierende Wirkung im Bereich schiffsrelevanter Reynoldszahlen zu untersuchen.</p> <p>Leider gestaltete sich die unter der Regie des IFAM durchgeführte, schräge Klebung der langen schmalen Streifen riblet-strukturierter Folie auf dem zylinderförmigen Prüfkörper als außerordentlich schwierig. Aufgrund von Blasenbildung und Folienablösung waren die Messergebnisse bei 5° Klebewinkel vollkommen unbrauchbar. Auch bei 10° Klebewinkel war die ermittelte Reibungswiderstandszunahme mit 4% gegenüber der gerade verlaufenden Strukturierung so groß, dass ein Großteil des Effektes in der Schräganströmung der Klebefugen zwischen den Folienbahnen vermutet werden muss.</p> <p>Zusammenfassend muss gesagt werden, dass die messtechnische Ermittlung des Einflusses der Schräganströmung auf die Wirkung der Riblet-Strukturierung weitgehend gescheitert ist.</p>
-------------------------	--

<b>Schlagworte:</b> Lacksysteme, Reibungswiderstandsreduzierung, Widerstandsmessungen
---

**Bericht K 12-11****Verbundprojekt HAI-TECH  
Strömungsgünstige Oberflächen durch Lacksysteme**

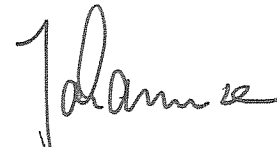
**Teilprojekt  
Numerische Berechnungen und Modellversuche zur Optimierung und Überprüfung der Wirksamkeit reibungswiderstandsreduzierender Lacksysteme**

**Teilaufgabe  
Widerstandsversuche mit schräg angeströmten Riblets im HYKAT**

**Auftraggeber  
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
53107 Bonn**

Hamburg, 26. April 2011

HAMBURGISCHE SCHIFFBAU-  
VERSUCHSANSTALT GmbH



ppa. Christian Johannsen

## Inhalt

1	Liste der Symbole.....	3
2	Einleitung .....	4
3	Versuchsaufbau .....	4
4	Messprogramm.....	5
5	Ergebnis.....	5
6	Zusammenfassung.....	6
7	Tabellenverzeichnis.....	7
8	Abbildungsverzeichnis .....	7

Tabellen

Abbildungen

## 1 Liste der Symbole

$C_F$  Reibungs-Widerstandsbeiwert nach ITTC

$$C_F = \frac{W}{\frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot S} = \frac{0.075}{\log(Re - 2)^2}$$

L Charakteristische Länge

S Oberfläche

Re Reynoldszahl

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

V Strömungsgeschwindigkeit

W Widerstand

$\nu$  Kinematische Zähigkeit von Wasser

$\rho$  Dichte von Wasser

## 2 Einleitung

Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie wurden Versuche im Rahmen des Verbundprojektes HAI-TECH / Teilprojekt: “Numerische Berechnungen und Modellversuche zur Optimierung und Überprüfung der Wirksamkeit reibungswiderstandsreduzierender Lacksysteme” – Förderkennzeichen 03SX257D – durchgeführt. Der vorliegende Bericht präsentiert weitere Ergebnisse aus der Teilaufgabe AP 170, nämlich Ergebnisse der “Widerstandsversuche mit schräg angeströmten Riblets im HYKAT”. Hierbei handelt es sich um Widerstandsmessungen zur Ermittlung des Einflusses einer nicht optimalen Schräganströmung der Riblet-Struktur auf deren reibungswiderstandsreduzierende Wirkung. Die Versuche fanden im Januar 2011 wieder im HYKAT, dem Hydrodynamik- und Kavitationstunnel der HSVA statt. Entsprechende Versuche mit glatter, mit neuwertig strukturierter sowie mit künstlich verschlissener Folie waren Gegenstand der Teilberichte K 13-09 und K 54-09.

## 3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau war exakt der gleiche wie bei den Versuchen mit glatter, neuwertig strukturierter und künstlich verschlissener Riblet-Folie und ist im Teilbericht K 13-09 ausführlich beschrieben. Dort findet sich auch eine ausführliche Erläuterung für die Notwendigkeit zur Durchführung solcher Versuche bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten unter gleichzeitiger Nutzung längstmöglicher Prüfkörper, wie sie im HYKAT in ausgezeichneter Weise gegeben war.

Vor der jetzigen Messkampagne war der bereits vorhandene Prüfkörper von der HSVA mittels Trockeneis-Strahlverfahren von alter Folie und Kleberesten befreit, wieder an der Messvorrichtung installiert und sauber verspachtelt worden. Sodann war er unter der Regie des IFAM mit neuwertiger Riblet-Folie beklebt worden, deren Riblet-Geometrie wieder die gleiche war, wie bei den vorangegangenen Versuchen. Anders als in den vorangegangenen Versuchsserien wurden die Folienstreifen für die erste Messung mit einem Winkel von  $5^\circ$  gegenüber der Körperlängsachse aufgeklebt. Dies erwies sich aufgrund der langen, schmalen und nicht dehnbaren Folienstreifen als äußerst schwierig. Blasenbildung, die nach Trocknung des Klebers auftrat, musste durch Einschneiden und Wärmebehandlung beseitigt werden. Trotzdem zeigte der Körper im Versuchsverlauf erneut Blasen und teilweise Folienablösung. Abb. 1 zeigt Fotos vom Folienzustand nach der Messung mit  $5^\circ$  Klebewinkel.

Vor der Messung mit Klebewinkel  $10^\circ$  wurden die Folienreste wieder mittels Trockeneis-Strahlverfahren entfernt. Um möglichst reproduzierbare Messbedingungen zu erhalten, erfolgte diese Reinigung am zusammengebauten Körper, der dazu samt Halteschwert und Tunneldeckel in den unteren Teil der HYKAT-Halle verbracht worden war. Möglicherweise aufgrund der nunmehr vorhandenen Übung gelang die Klebung mit  $10^\circ$  Klebewinkel erheblich besser. Blasen und Folienablösungen waren auch nach Beendigung der zugehörigen Messung nicht zu sehen. Gleichwohl waren die Klebefugen, die aufgrund des Klebewinkels ja nunmehr nicht in Strömungsrichtung verliefen, von Anfang an deutlich zu spüren.

Der Prüfkörper wurde in beiden Messungen wieder mit Wassergeschwindigkeiten bis über 10 m/s angeströmt.

## 4 Messprogramm

Widerstandsmessungen wurden mit Klebewinkel  $5^\circ$  und  $10^\circ$  durchgeführt. Dabei wurde die Wassergeschwindigkeit in 10 Schritten auf den Maximalwert gesteigert und sodann "auf Lücke" wieder gesenkt, um ein Hysterese-Verhalten der Messwaage ausschließen zu können. Als Referenz bei der Ergebnisdarstellung diente die Widerstandsmessung mit gerade geklebter, unverschlissener Folie, die aus dem Bericht K 13-09 übernommen wurde. Die Messwerttabellen 2 bis 4 enthalten die Messwerte in der tatsächlich gemessenen Reihenfolge.

## 5 Ergebnis

In Abb. 2 ist zunächst der Gesamt-Prüfkörperwiderstand für alle drei Konfigurationen über der Strömungsgeschwindigkeit neben dem Prüfkörper aufgetragen. Neben dem Reibungswiderstand der Prüfbeschichtung beinhaltet dieser Widerstand natürlich auch Anteile aus der Reibung an den An- und Ablaufteilen, sowie Druckwiderstände infolge der unvermeidbaren Strömungsablösung am Schwanzende des Prüfkörpers. Diese hier nicht interessierenden Widerstandsanteile dürfen für alle Messreihen als gleich angesehen werden, insofern sollte der Widerstandsunterschied gegenüber der Messung mit gerade geklebter Riblet-Folie nur auf dem zunehmenden Reibungswiderstand infolge des zunehmenden Klebewinkels beruhen.

Das Messergebnis mit  $5^\circ$  Klebewinkel ist in Abb. 2 nur der Vollständigkeit halber eingetragen (grüne Kurve). Man erkennt leider, dass der Widerstand größer als mit  $10^\circ$  Klebewinkel ist und ohnehin einen vollkommen unrealistischen Widerstandszuwachs gegenüber der gerade geklebten Folie zeigt. Dies ist auf die oben beschriebenen Blasen und Ablösungen der Folie zurückzuführen, so dass die Messung für  $5^\circ$  Klebewinkel als unbrauchbar bezeichnet werden muss. Die rote Kurve in Abb. 2 zeigt das Ergebnis für  $10^\circ$  Klebewinkel.

Der Reibungs-Widerstandsunterschied  $\Delta W_{\text{reib}}$  relativ zum Gesamt-Reibungswiderstand ist in Abb. 3 über der Reynoldszahl dargestellt. Da der Gesamt-Reibungswiderstand einer Prüfbeschichtung ja nicht isoliert gemessen werden kann, wurde dieser – wie schon in den Messkampagnen zuvor – nach der allgemein anerkannten ITTC-Reibungslinie abgeschätzt. Die entsprechenden Gleichungen sind in Abschnitt 1 gegeben, der rechnerische Reibungswiderstand ist in Abb. 2 als gestrichelte Linie eingetragen.

Abb. 3 zeigt das Endergebnis der Untersuchung in der gleichen Weise dargestellt wie in den vorangegangenen Berichten. Nach oben abgetragen ist die prozentuale Reibungswiderstandszunahme infolge des größer werdenden Klebewinkels der Riblet-Strukturierung. Die grüne Kurve für Klebewinkel  $5^\circ$  ist auch hier nur der Vollständigkeit halber eingetragen. Allerdings ist auch die bei  $10^\circ$  Klebewinkel gemessene Reibungswiderstandszunahme (rot) von bis zu 4% zweifelhaft. Aus der Theorie hätte man eine Zunahme unter 1% erwartet (vergl. Bericht K 12-09). Es ist zu vermuten, dass die Klebefugen zwischen den Folienbahnen, die ja nun ebenfalls eine Anstellung von  $10^\circ$  gegenüber der Anströmung hatten, erheblich zur Widerstandserhöhung beigetragen haben. Insofern ist festzuhalten, dass eine seriöse messtechnische Aussage über den Einfluss der Schräganströmung der Riblets auf deren widerstandsreduzierende Wirkung – zumindest mit dieser Messkampagne – nicht möglich ist.

## 6 Zusammenfassung

Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie wurden vergleichende Widerstandsmessungen im Rahmen des Verbundprojektes HAI-TECH durchgeführt, um den Einfluss der Schräganströmung der Riblet-Strukturierung auf deren reibungswiderstandsreduzierende Wirkung im Bereich schiffsrelevanter Reynoldszahlen zu untersuchen.

Leider gestaltete sich die unter der Regie des IFAM durchgeführte, schräge Klebung der langen schmalen Streifen riblet-strukturierter Folie auf dem zylinderförmigen Prüfkörper als außerordentlich schwierig. Aufgrund von Blasenbildung und Folienablösung waren die Messergebnisse bei 5° Klebewinkel vollkommen unbrauchbar. Auch bei 10° Klebewinkel war die ermittelte Reibungswiderstandszunahme mit 4% gegenüber der gerade verlaufenden Strukturierung so groß, dass ein Großteil des Effektes in der Schräganströmung der Klebefugen zwischen den Folienbahnen vermutet werden muss.

Zusammenfassend muss gesagt werden, dass die messtechnische Ermittlung des Einflusses der Schräganströmung auf die Wirkung der Riblet-Strukturierung weitgehend gescheitert ist.



## 7 Tabellenverzeichnis

- 1 Versuchsbedingungen
- 2 Versuchsergebnisse, Klebewinkel  $0^\circ$
- 3 Versuchsergebnisse, Klebewinkel  $5^\circ$
- 4 Versuchsergebnisse, Klebewinkel  $10^\circ$
- 5 Rechnerischer Reibungswiderstand

## 8 Abbildungsverzeichnis

- 1 Folienschäden nach der Messung mit Klebewinkel  $5^\circ$
- 2 Gesamt-Körperwiderstand in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit
- 3 Reibungswiderstandsveränderung in Abhängigkeit der Reynoldszahl

Berichtsnummer	K 12-11
Versuchsnummer	44-01/11
Prüfkörperlänge	7.42 m
Prüfbeschichtungslänge	6.0 m
Prüfbeschichtungsfläche	9.42 m <sup>2</sup>
Prüfkörperdurchmesser	0.5 m
Tunnelwassertemperatur	22.9 °C
kin. Zähigkeit des Tunnelwassers	$9.37 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
Dichte des Tunnelwassers	997.5 kg/m <sup>3</sup>

Tab. 1: Versuchsbedingungen

Strömungsgeschwindigkeit		Reynoldszahl	Gesamtwiderstand N
Zuströmung m/s	neben dem Körper m/s		
-0.06	-0.06	-4.65E+05	0.0
1.76	1.84	1.46E+07	70.7
2.40	2.51	1.99E+07	123.1
3.01	3.15	2.49E+07	186.7
3.63	3.80	3.01E+07	264.2
4.85	5.07	4.02E+07	455.0
6.02	6.30	4.99E+07	690.8
7.20	7.53	5.96E+07	969.4
8.02	8.39	6.64E+07	1194.1
9.00	9.41	7.45E+07	1491.0
9.70	10.14	8.03E+07	1721.8
9.26	9.69	7.67E+07	1578.6
8.51	8.90	7.05E+07	1340.6
7.55	7.90	6.25E+07	1068.2
6.52	6.82	5.40E+07	803.2
5.53	5.78	4.58E+07	585.7
4.16	4.35	3.45E+07	342.0
3.24	3.39	2.68E+07	214.2
2.65	2.77	2.19E+07	147.4
1.98	2.07	1.64E+07	87.4

Tab. 2: Messergebnisse  
Klebwinkel 0 Grad, aus K 13-09

Strömungsgeschwindigkeit		Reynoldszahl	Gesamtwiderstand N
Zuströmung m/s	neben dem Körper m/s		
-0.06	-0.06	-4.65E+05	0.1
1.76	1.84	1.46E+07	71.4
2.40	2.51	1.99E+07	124.1
3.01	3.15	2.49E+07	188.7
3.63	3.80	3.01E+07	266.6
4.85	5.07	4.02E+07	460.8
6.02	6.30	4.99E+07	706.0
7.20	7.53	5.96E+07	997.0
8.02	8.39	6.64E+07	1230.7
9.00	9.41	7.45E+07	1543.4
9.67	10.12	8.01E+07	1777.2
9.23	9.66	7.65E+07	1628.0
8.49	8.88	7.03E+07	1386.6
7.55	7.90	6.25E+07	1110.9
6.52	6.82	5.40E+07	839.8
5.53	5.78	4.58E+07	613.7
4.16	4.35	3.45E+07	360.2
3.24	3.39	2.68E+07	228.0
2.65	2.77	2.19E+07	158.0
1.98	2.07	1.64E+07	94.2

Tab. 3: Messergebnisse  
Klebewinkel 5 Grad, 7.1.11 (verfälscht durch Folienablösung)

Strömungsgeschwindigkeit		Reynoldszahl	Gesamtwiderstand N
Zuströmung m/s	neben dem Körper m/s		
-0.06	-0.06	-4.65E+05	-0.4
1.76	1.84	1.46E+07	70.8
2.40	2.51	1.99E+07	123.6
3.01	3.15	2.50E+07	187.5
3.63	3.80	3.01E+07	269.1
4.85	5.07	4.02E+07	468.9
6.02	6.30	4.99E+07	708.9
7.20	7.53	5.96E+07	995.0
8.02	8.39	6.64E+07	1221.1
8.93	9.34	7.40E+07	1504.6
9.69	10.13	8.03E+07	1756.3
9.21	9.63	7.63E+07	1595.2
8.45	8.84	7.00E+07	1358.4
7.55	7.90	6.25E+07	1091.4
6.52	6.82	5.40E+07	824.9
5.53	5.78	4.58E+07	604.4
4.16	4.35	3.45E+07	352.5
3.24	3.39	2.68E+07	217.5
2.65	2.77	2.19E+07	148.4
1.98	2.07	1.64E+07	87.4

Tab. 4: Messergebnisse  
Klebewinkel 10 Grad, 21.1.11

Strömungsgeschwindigkeit		Reynoldszahl	CF	Reibungs- widerstand N
Zuströmung m/s	neben dem Körper m/s			
1.50	1.57	1.24E+07	2.89E-03	33.4
2.00	2.09	1.66E+07	2.75E-03	56.6
2.50	2.61	2.07E+07	2.65E-03	85.3
3.00	3.14	2.48E+07	2.58E-03	119.2
3.50	3.66	2.90E+07	2.51E-03	158.3
4.00	4.18	3.31E+07	2.46E-03	202.5
4.50	4.71	3.73E+07	2.42E-03	251.6
5.00	5.23	4.14E+07	2.38E-03	305.5
5.50	5.75	4.56E+07	2.34E-03	364.3
6.00	6.28	4.97E+07	2.31E-03	427.8
6.50	6.80	5.38E+07	2.28E-03	496.0
7.00	7.32	5.80E+07	2.26E-03	568.9
7.50	7.84	6.21E+07	2.23E-03	646.3
8.00	8.37	6.63E+07	2.21E-03	728.3
8.50	8.89	7.04E+07	2.19E-03	814.7
9.00	9.41	7.45E+07	2.17E-03	905.7
9.50	9.94	7.87E+07	2.16E-03	1001.1
10.00	10.46	8.28E+07	2.14E-03	1100.9

Tab. 5: Rechnerischer Reibungswiderstand



Abb. 1: Folienschäden nach der Messung mit Klebewinkel  $5^\circ$

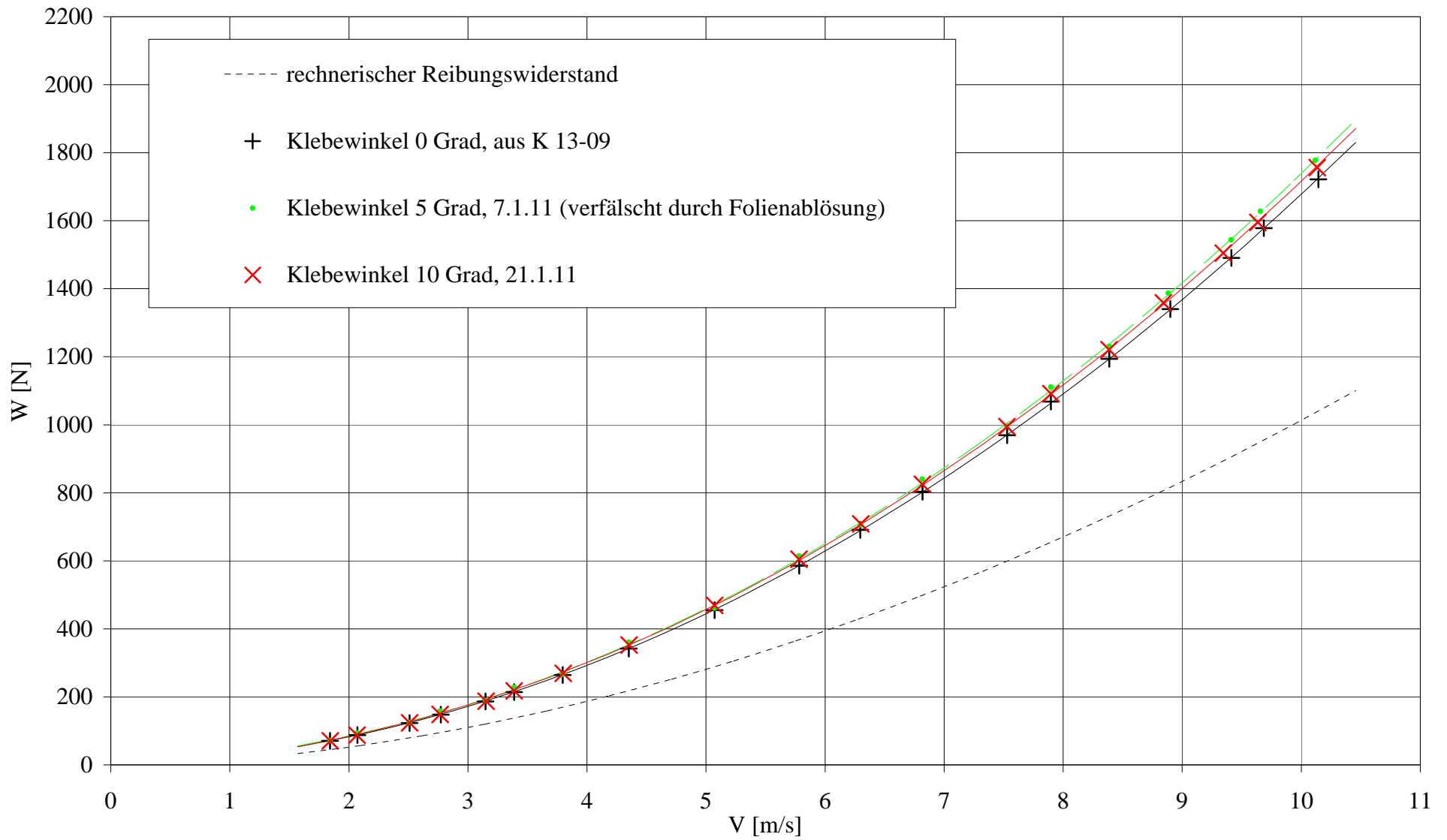


Abb. 2: Gesamt-Körperwiderstand in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit neben dem Körper



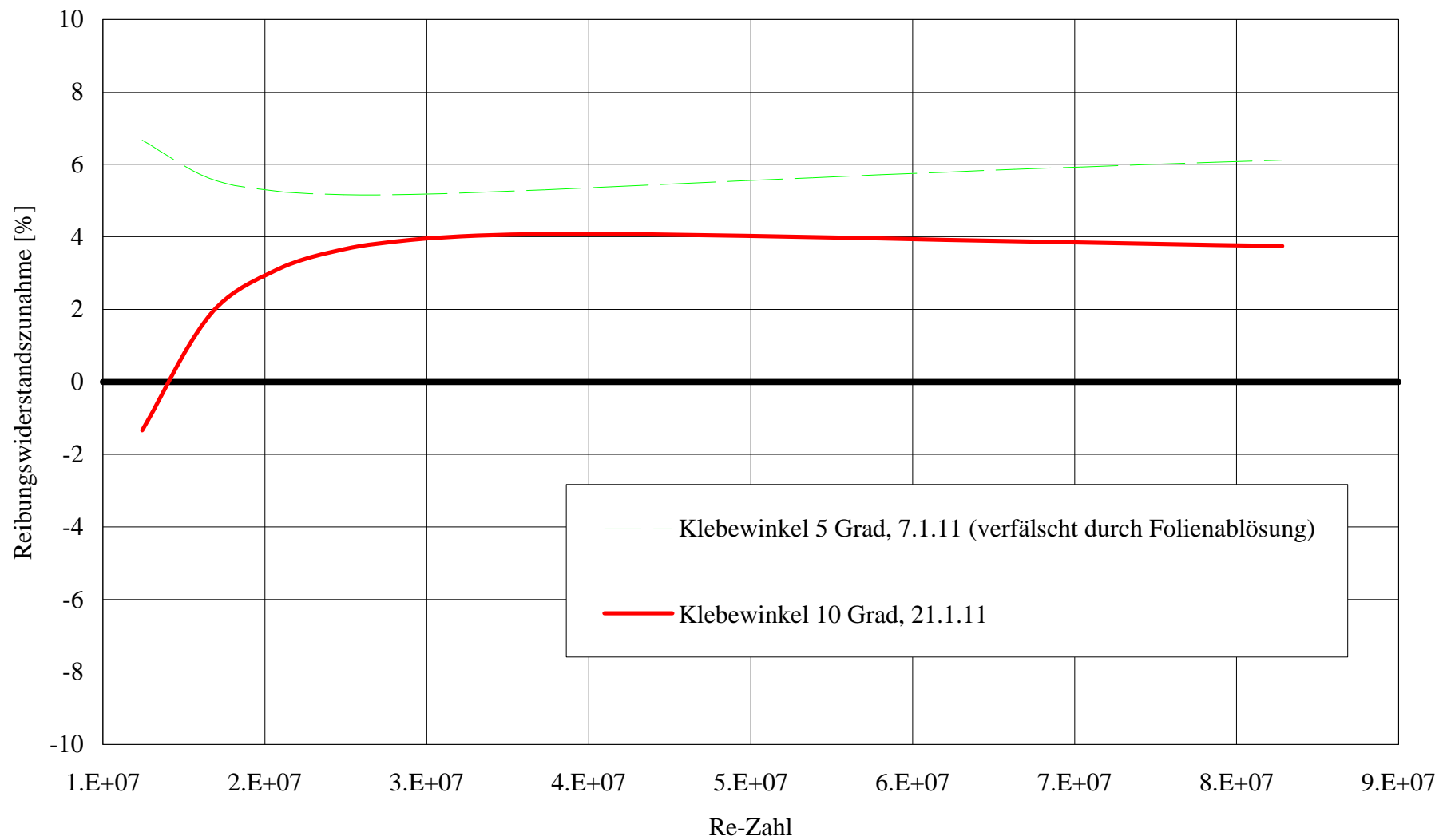


Abb. 3: Reibungswiderstandsveränderung gegenüber dem Körper mit Folien-Klebewinkel 0 Grad