

# ENTWURF, KONSTRUKTION UND KALIBRIERUNG EINER KOSTENGÜNSTIGEN 6-KOMPONENTEN-MESSWAAGE

M.Sc. T. Riebl, HS Regensburg, Galgenbergstr. 30, 93053 Regensburg, Deutschland  
Dr.-Ing. S. Lämmlein, HS Regensburg, Galgenbergstr. 30, 93053 Regensburg, Deutschland

## Zusammenfassung

Bei kommerziellen 6-Komponenten-Messwaagen bewegt man sich in Preisregionen um 100.000 €. In zwei Abschlussarbeiten (Diplom und Master) ist eine externe Waage konstruiert, gebaut und kalibriert worden, die deutlich preiswerter ist. Ein Verkaufspreis von einem Fünftel des vorher genannten Betrages ist denkbar. Möglich wird dies durch die weitestgehende Verwendung von Kaufteilen. Durch eine geschickte Wahl der Bauteile besitzt diese Waage die gleiche Anzahl an Bauteilen wie eine bereits vorhandene 3 Komponenten-Waage. Trotz einer Erhöhung der Anzahl der Aufnehmer besitzt die neue Waage eine höhere Steifigkeit. Durch die Kalibrierung der Waage sind ihre messtechnischen Besonderheiten erfolgreich erfasst worden. So zeigen sich teilweise Kennlinien mit Hysterese, welche durch konstruktive Anpassungen reduziert werden konnten. Aufgrund der besonderen Bauform nur schwer vermeidbare nicht-lineare Interferenzen konnten mit Hilfe einer relativ einfachen Auswertealgorithmus bereits sehr gut kompensiert werden. Abschließende Messungen mit einem Modell des Ahmed-Körpers (generisches Fahrzeugmodell) im Windkanal haben ebenfalls zufriedenstellende Ergebnisse geliefert.

## 1. EINLEITUNG

Die Erfassung der aerodynamischen Lasten, die auf einen Prüfkörper wirken, ist eine der Basisaufgaben der Windkanalarbeit. Bei den hierfür meist verwendeten Windkanalwaagen gibt es unterschiedliche Typen. So kann man die Waagen nach der Anzahl der zu messenden Komponenten (1-6 sind möglich) unterscheiden [1]. Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit ist der Ort, an dem die Waage positioniert ist: intern (im Prüfkörper) oder extern [1]. Heute kommen üblicherweise Waagen zum Einsatz, die nach dem Verformungsprinzip arbeiten. Dies beruht darauf, dass sich ein Aufnehmerkörper durch Belastung gezielt verformt und diese Verformung mit DMS (Dehnungsmessstreifen) erfasst wird. Man kann auch noch nach monolithischen Waagen (Waagenkörper aus einem Stück gefertigt) und gebauten Waagen (bestehend aus Einzelteilen) unterscheiden.



BILD 1. Monolithische interne Waage [2]

Bei kommerziellen Waagen bewegt man sich aktuell in

Preisregionen um 100.000 €. In zwei Abschlussarbeiten (Diplom und Master) ist eine externe Waage konstruiert, gebaut und kalibriert worden, die deutlich preiswerter ist. Ein Verkaufspreis von einem Fünftel des vorher genannten Betrages ist denkbar. Möglich wird dies durch die weitestgehende Verwendung von Kaufteilen.

## 2. ENTWURF UND KONSTRUKTION

Im Labor Windkanal/Strömungsmesstechnik (LWS) der Hochschule Regensburg wurde vor der Umsetzung dieser Waage eine externe 3-Komponenten-Messwaage (BILD 2) verwendet. Die drei Kräfte werden von drei kommerziellen Plattformwägezellen erfasst. Diese Aufnehmer sind preislich nicht nur attraktiv, sondern eignen sich auch durch ihre besonderen Eigenschaften für den Bau einer externen Waage.

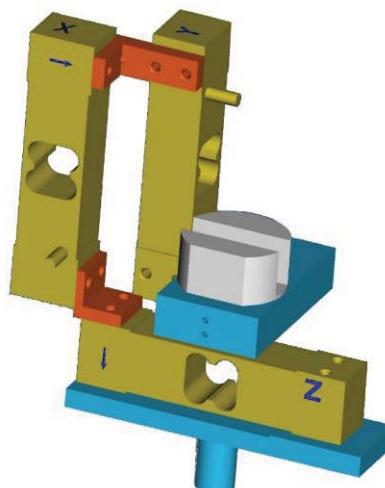


BILD 2. 3-Komponenten-Waage der HS Regensburg

Es gibt nur einen einzigen Lastpfad durch die Waage (mechanische Reihenschaltung der Aufnehmer). Dadurch erspart man sich die Verwendung von aufwändigen, empfindlichen und zum Teil kostenintensiven reibungsarmen Lagern (geringe Losbrechmomente). Deswegen macht die Waage aber prinzipiell nichts anderes als jede Mehrkomponentenwaage: Sie spaltet die am Windkanalmodell wirkenden Lasten in ihre Komponenten auf und erfasst diese getrennt. Auf welche Komponente ein Aufnehmer empfindlich ist, ergibt sich durch seine räumliche Anordnung und die Bauform. Letztere ist auch für die Entkopplung von Interferenzen verantwortlich.

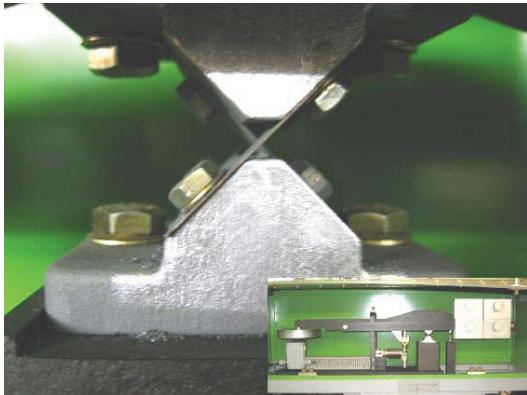


BILD 3. Reibungsarmes Lager zur Umlenkung von Kräften [3]

Nachteil der Reihenschaltung der Aufnehmer ist, dass sich die Verformungen addieren. Deswegen sollte die Gesamtanzahl der Bauteile bei der neuen Waage (6 Komponenten) möglichst nicht erhöht werden. Tatsächlich konnte sie durch eine geschickte Gestaltung der Verbindungselemente (drei Stück) konstant gehalten werden. Diese ohnehin notwendigen Bauteile haben einen Bereich mit einem Kreisquerschnitt erhalten, der durch Applikation von DMS gleichzeitig der Drehmomentmessung dient.

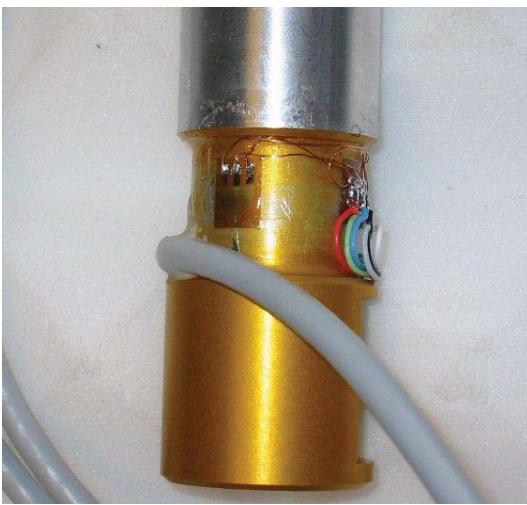


BILD 4. Verbindungselement mit DMS zur Drehmomentmessung (Z-Achse)

In BILD 5 ist die komplett montierte Waage mit Verdeutlichung des Lastpfades dargestellt. Aufgrund der recht einfachen Bauform ist das Prinzip der Waage auch für Unerfahrene relativ leicht zu durchschauen. Dadurch erleichtert die Waage den Studierenden den Zugang zu dieser Thematik und bietet sich für die Lehre an.

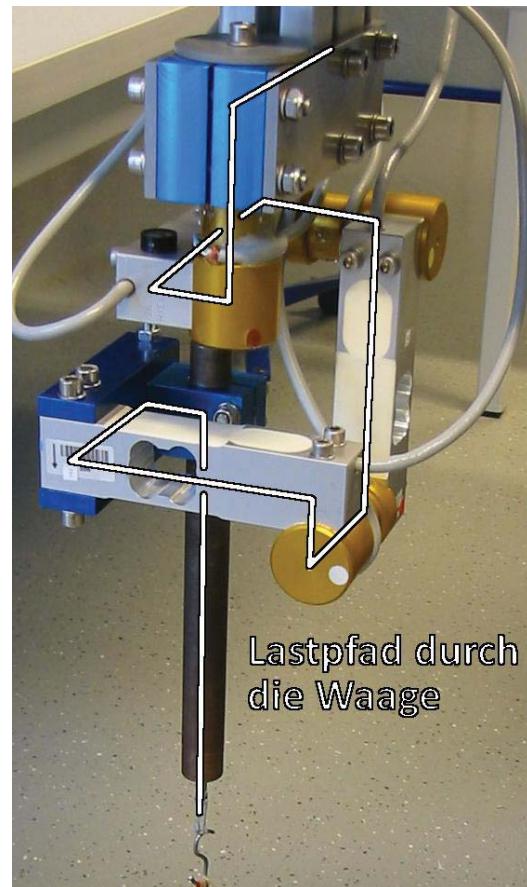


BILD 5. Reihenschaltung der Aufnehmer in der 6-Komponenten-Waage des Regensburg Wind Tunnel (RWT)

Eines der wesentlichen Vorteile wird durch die Verwendung von Schraubverbindungen sichergestellt: Einzelne Aufnehmer können jederzeit, z.B. bei Defekt, ausgetauscht werden. Zur Entlastung der Schrauben sind die Anschlussflächen für die Wägezellen mit Bundstegen versehen (BILD 6).

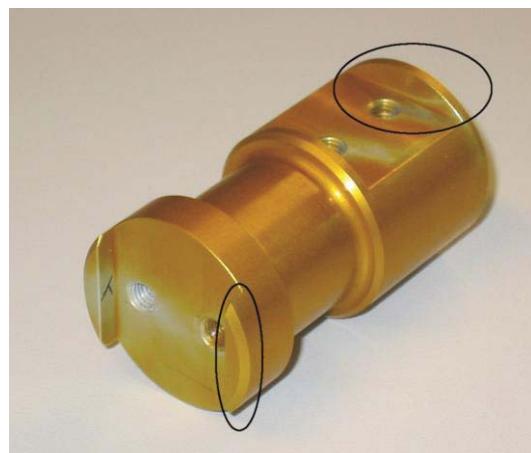


BILD 6. Torsionsstab mit Bundstegen (Markierung)

Die formschlüssige Verbindung ist der kraftschlüssigen Verbindung über die Schrauben bei Scherkräften und -momenten deutlich überlegen. Im weiteren Verlauf wird ersichtlich, dass diese Stege auch beim Thema Hysterese von entscheidender Bedeutung sind.

Diese Bauform der Waage ist modular. So ist beispielsweise auch eine Waage mit zwei Kraftaufnehmern (Widerstand und Auftrieb) und einem Aufnehmer für das Nickmoment denkbar.

Zusammengefasst besitzt die 6-Komponenten-Waage der Hochschule Regensburg folgenden Eigenschaften:

- Reihenschaltung der Aufnehmer
- Verwendung von Kaufteilen (soweit möglich)
- Verbindungselemente zur Drehmomentmessung
- Gutes Preis/Leistungsverhältnis (Materialwert und Fertigung: ca. 5000 € für 6 Komponenten)
- Sehr gute Eignung für die Lehre
- Durch den modularen Aufbau ist eine unterschiedliche Anzahl an Komponenten darstellbar

## 2.1. Wirkprinzip der Wägezelle

Durch die Bauform der Aufnehmer muss die Kraft für eine korrekte Messung nicht in einem speziellen Punkt angreifen, sondern darf in einer relativ großen Fläche liegen. Bei dem verwendeten Wägezellentyp ist diese Fläche  $380 \times 380 \text{ mm}^2$  groß, was in etwa einem Blatt Papier der Größe DIN A3 entspricht. Anders gesagt: die vom DMS erfasste Verformung ist nur von der Größe der Kraft selbst und nicht von der Position des Angriffspunktes abhängig. Weiterhin sind Belastungen, die nicht in Messrichtung wirken, sehr gut kompensiert. Durch diese Eigenschaften sind diese Aufnehmer wie geschaffen für die Verwendung in einer externen Waage. Das zugrundeliegende Prinzip des Doppelbiegebalkens findet man zwar auch in kommerziellen Windkanalwaagen wieder, in Form der Wägezellen erhält man es aber zu einem deutlich niedrigeren Preis (ca. 1000 € für drei Stück).

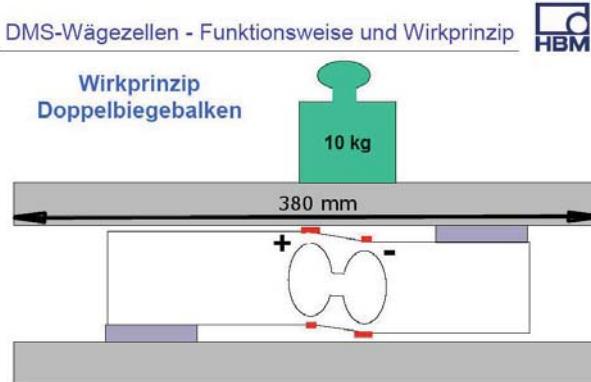


BILD 7. Funktionsweise und Wirkprinzip der Plattform-Wägezelle [4]

Es befinden sich 4 DMS (Wheatstone'sche Vollbrücke) auf dem Aufnehmerkörper (BILD 7). Bei einer Belastung in Messrichtung werden zwei DMS gedehnt (konvexe Krümmung) und zwei gestaucht (konkave Krümmung).

## 2.2. Wirkprinzip der Drehmomentaufnehmer

Ein rein auf Torsion beanspruchter Stab unterliegt einem zweiachsigen Spannungszustand. Die Hauptnormalspannungen verlaufen unter einem Winkel von  $45^\circ$  zu den Mantellinien (Linien parallel zur Stablängsachse) [5]. Hierfür gibt es spezielle DMS mit 2 Messgittern.

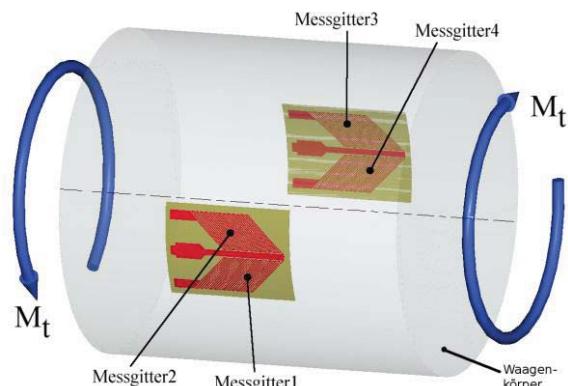


BILD 8. Anordnung der DMS zur Torsionsmessung

Die Gitter liegen zueinander im Winkel von  $90^\circ$  und bezüglich der Symmetrieachse des DMS im Winkel von  $45^\circ$ . Somit verringert sich die Anzahl der möglichen Winkelfehler durch die Applizierung.

Die Empfindlichkeit der Drehmomentaufnehmer lässt sich über die folgenden Parameter beeinflussen:

- Art der Brückenschaltung
- Art und Abmessungen des Querschnitts (polares Flächenträgheitsmoment)
- Werkstoff des Aufnehmerkörpers

## 3. KALIBRIERUNG

Erstes Ziel der Waagenkalibrierung ist die Bestimmung der Messempfindlichkeit. Bei nichtlinearen Abhängigkeiten ist eine Kennlinie aufzunehmen. Man versteht darunter die Darstellung des Anzeigewertes pro zu messender physikalischer Größe. Die Waage wird daher mit möglichst genau definierten Kraftnormalen belastet und die entsprechenden Anzeigewerte notiert.

Eine vollständige Unabhängigkeit der Anzeigewerte von der Belastung senkrecht zur betrachteten Messrichtung kann praktisch nicht erzielt werden. Man spricht von so genannten Waageninterferenzen. Eine sorgfältige Waagenkalibrierung nimmt daher nicht nur die Kennlinie infolge der Belastung der Hauptrichtung auf sondern auch die Interferenz-Anzeigewerte infolge des, wenn auch sehr geringen, Einflusses auf die anderen Wägezellen.

Bei einer industriellen Waagenkalibrierung wird zur vollständigen Beschreibung eine Matrix der Empfindlichkeitskennwerte aufgebaut. Diese Matrix ist dann zu invertieren. Dadurch können die Kräfte unter Berücksichtigung der Interferenzen bestimmt werden. [6]

### 3.1. Waagenkoordinatensystem

Basierend auf den Ergebnissen der Kalibrierung werden die Messsignale in 3 Kräfte und 3 Momente umgerechnet. Bei diesen 6 Komponenten handelt es sich physikalisch betrachtet um Vektoren. Neben den Beträgen der Vektoren ist deswegen auch das verwendete Koordinatensystem, die Lage des Bezugspunktes (für die Kräfte) und der Bezugssachsen (für die Momente) anzugeben. Erst mit diesen Angaben kann man mit den Betragswerten etwas anfangen. Der Waagenbauer gibt die Komponenten im waagerechtenen Koordinatensystem an [7]. Der Angriffspunkt der Kräfte ist im Ursprung des Koordinatensystems und die Momente wirken um die Achsen des Koordinatensystems. Der Koordinatenursprung wird auch Bezugspunkt genannt. In Europa entspricht das verwendete Koordinatensystem dem rechtshändigen Koordinatensystem aus der Mathematik und es wird in den Normen DIN-EN 9300 oder ISO 1151 definiert [1]. Bei der 6-Komponenten-Waage des Regensburg Wind Tunnel (RWT) liegt das Koordinatensystem wie in der folgenden Abbildung dargestellt:

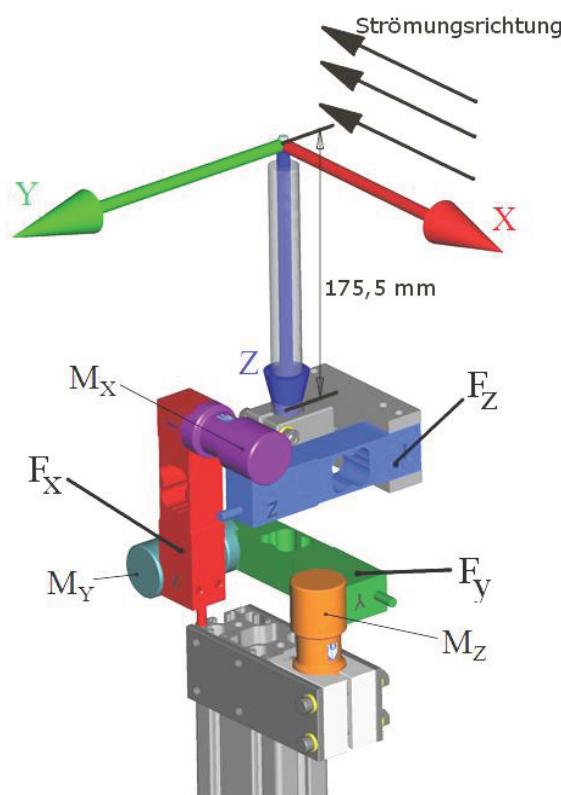


BILD 9. Lage und Ausrichtung des Waagenkoordinatensystems relativ zur Waage und zur Windkanalströmung

### 3.2. Durchführung der Kalibrierung

Zu Beginn wird die Waage am Kalibriergestell befestigt. Damit dessen Verformungen vernachlässigbar klein sind und somit keine Rückwirkung auf die Kalibrierung haben, ist dieser Aufbau sehr steif ausgeführt. Mit Hilfe einer Dosenlibelle und den höhenverstellbaren Füßen des Aufbaus wird die Waage relativ zur Richtung der Erdbeschleunigung ausgerichtet. In Ermangelung von Kraftnormalen wird nämlich mit Massenormalen ge-

arbeitet [6]. Gewichtskräfte wirken aber immer nur in Richtung der Erdbeschleunigung (positive Z-Richtung im Waagenkoordinatensystem). Alle anderen Richtungen lassen sich nicht direkt mit der Gewichtskraft von Massenormalen erzeugen. Die Verwendung von Umlenkrollen mit herkömmlichen Kugellagern hat sich aufgrund der Lagerreibung (Hysterese) verboten. Aus Kosten- und Zeitgründen sind aber auch keine reibungsarmen Lager wie Kreuzfedergelenke oder Schneidenpfannen verwendet worden. Stattdessen wird die Waage entsprechend der gewünschten Ausrichtung relativ zum Erdlot von Hand ausgerichtet.

### 3.3. Kalibrierungsergebnisse

Aufgrund der sehr umfangreichen Ergebnisse soll hier nur auf die interessantesten und für diese Waage typischen eingangen werden. So waren die Kennlinien teilweise deutlich mit einer Hysterese behaftet und ein Teil der Kennlinien ist nicht-linear. Bevor die Kennlinien der Gesamtwaage aufgenommen worden sind, sind auch die einzelnen Aufnehmer jeweils für sich untersucht worden.

#### 3.3.1. Einzelunteruchungen an den Wägezellen

Eingangs ist bei den Wägezellen von einer Plattform gesprochen worden, innerhalb derer die Kräfte korrekt gemessen werden. Durch die Nutzung der Waage als externe Waage liegen die Kräfte aber teilweise außerhalb dieser Fläche (BILD 9). Laut Hersteller verringert sich die noch korrekt zu messende Maximallast beim Verlassen der angegebenen Plattformgröße nach dem Hebelgesetz. Bei doppeltem Abstand (380 statt 190 mm) darf die maximale Last nur noch halb so groß sein.

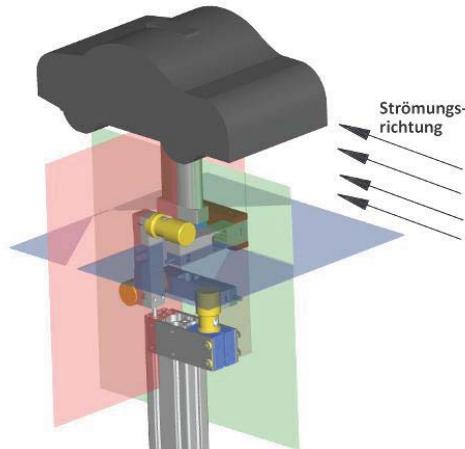


BILD 10. Waage mit der Darstellung der Plattformen (eine pro Wägezelle)

Außerdem werden in der Waage alle Wägezellen nicht nur mit ihrer jeweils zu messenden Kraft sondern auch mit Kräften von nennenswerter Größe in den anderen Richtungen belastet. Dazu kommen noch Torsions- und Biegemomente. Aus Festigkeitsgründen ist deshalb die Nennlast der Aufnehmer deutlich höher als die jeweils zu messende Kraft gewählt worden. Bei der Kalibrierung hat sich schließlich gezeigt, dass diese Entscheidung auch aus messtechnischer Sicht sinnvoll ist.

### 3.3.1.1. Hebel längs zur Wägezelle

In diesem Test ist untersucht worden, ob sich die Empfindlichkeit ändert, wenn die Plattform in Richtung der Längsachse verlassen wird. Dies ist in der Gesamtwaage bei der Wägezelle für die X-Richtung der Fall (BILD 9).

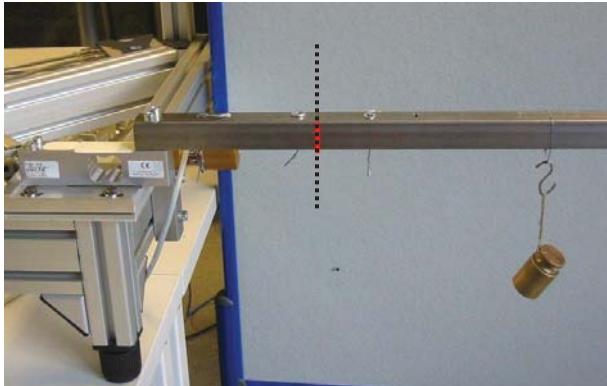


BILD 11. Hebel parallel zur Längsachse ausgerichtet

Die gepunktete Linie im BILD 11 markiert die Außenkannte der Plattform ( $380 \times 380 \text{ mm}^2$ ). Bei dieser Belastung wird die selbe Empfindlichkeit ermittelt wie bei einer Krafteinleitung innerhalb der Plattform. Das Messsignal ist somit durch die Reduzierung der maximalen Last auch bei einem doppelt so großen Abstand immer noch unabhängig von der Position.

### 3.3.1.2. Hebel quer zur Wägezelle

In weiteren Untersuchungen ist ein Hebelarm quer zur Wägezelle angebracht worden (BILD 12). Dies entspricht der Krafteinleitung in den Aufnehmer für die Y-Richtung.

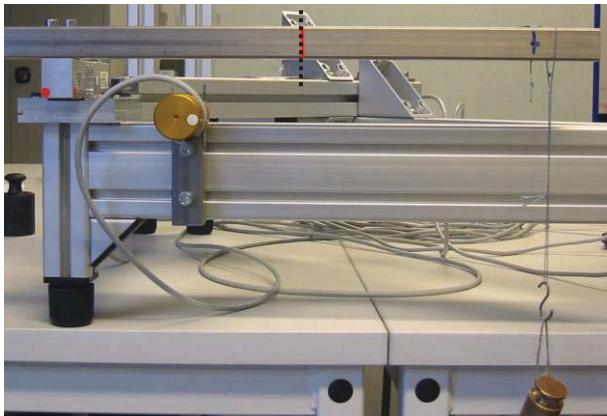


BILD 12. Hebel quer zur Längsachse ausgerichtet

Die Empfindlichkeiten liegen um bis zu 0,07 % unter den Werten, die ohne Hebelarm ermittelten worden sind. Da sich an den aufgebrachten Lasten nichts geändert hat, kann dies nur durch eine Erhöhung der Messsignals zustande kommen. Ein Winkelfehler kann hierfür nicht die Ursache sein, da sich das Messsignal dadurch nur verringern könnte. Folglich gelangt man mit dieser Anordnung bereits an die Grenzen des Prinzips des Doppelbiegebalkens. Die Abweichung an sich ist nicht so entscheidend, da ohnehin die Empfindlichkeit des Aufnehmers im Verbund mit der Waage bestimmt wird. Vielmehr ist es der Umstand, dass offenbar ein Bereich

erreicht ist, bei dem der Abstand einen Einfluss auf die Größe des Messsignals hat und es kann nicht vorhergesagt werden, wo genau die Kräfte am jeweiligen Windkanalmodell angreifen.

### 3.3.2. Verläufe mit Hysterese

Bei der Auswertung der Kalibrierung wird die Steigung der Ausgleichsfunktion durch die Messpunkte bestimmt. Es wird eine lineare Funktion verwendet, bei der der Durchgang durch den Nullpunkt erzwungen wird. Anhand des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  kann eine erste Aussage darüber getroffen werden, wie gut die Anpassung der Funktion an die Datenpunkte ist. Bei allen linearen Kennlinien der Waage liegt  $R^2$  über 0,99 ( $R^2=1$  entspricht einer 100prozentigen Korrelation zwischen den Messpunkten und der Ausgleichsfunktion). Mit diesem Wert ist die Anpassung als sehr gut zu beurteilen [6]. Hysterese bedingte Abweichungen von der ermittelten Kennlinie werden durch dieses Bewertungskriterium aber merklich nicht erfasst. Eine Hysterese entsteht z.B. durch das Zusammenspiel von Reibung und dem monotonen Belasten bzw. dem nachfolgenden monotonen Entlasten. Optisch wird die Hysterese oft erst ersichtlich, wenn man das Diagramm stark vergrößert (BILD 13).

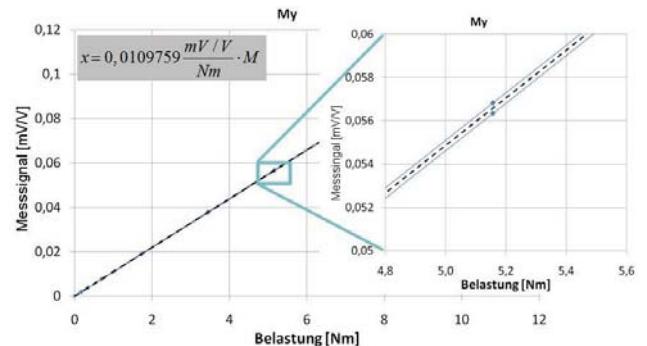
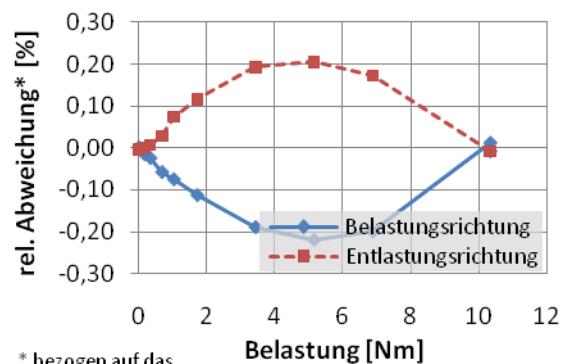


BILD 13. Darstellung der Hysterese (Ausschnitt der Kennlinie vergrößert)

Für eine praktikablere Darstellung wird anhand der Kennliniensteigung aus jedem Belastungswert (X-Achse) ein Wert für das Messsignal (Y-Achse) berechnet. Diese Werte werden dann von den tatsächlich gemessenen Werten abgezogen. Die Differenzwerte werden dann als relative Abweichung in einem Diagramm über der Belastung aufgetragen (BILD 14).



\* bezogen auf das Messsignal bei maximaler Belastung

BILD 14. Abweichungen von der Kennlinie bei  $M_y$

In dieser Darstellung tritt bei  $M_y$  sehr deutlich eine Hysteresis zu Tage (Form einer Zitrone). Bei der Belastung liegen die Messwerte unterhalb der Kennlinie (progressiver Verlauf) und bei der Entlastung oberhalb der Kennlinie (degressiver Verlauf). Das Gleiche ergibt sich beim Drehmomentstab für  $M_x$ . Beim Stab für  $M_z$  ist die Hysteresis deutlich kleiner (ca. eine Größenordnung) als bei den anderen beiden Stäben. Als Ursache hierfür ist die Befestigung der Drehmomentstäbe ausgemacht worden. Die beiden Stäbe mit der starken Hysteresis sind verschraubt und der Stab für  $M_z$  wird geklemmt.

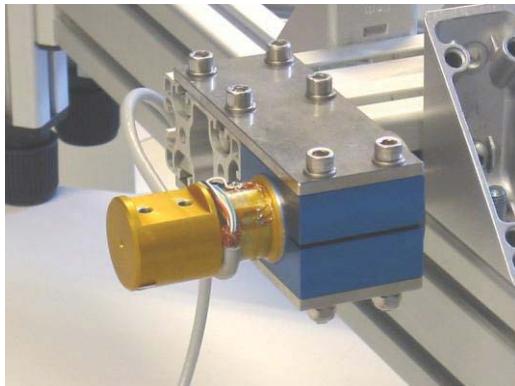


BILD 15. Befestigung Drehmomentstab  $M_z$  über Klemmung

Zwischen den Bundstegen, die ursprünglich aus Festigkeitsgründen angebracht worden waren, und den Wägezellen befindet sich Spiel. Dies ist leider durch Fertigungstoleranzen entstanden und verhindert eine formschlüssige Kraftübertragung.



BILD 16. Befestigung Drehmomentstab  $M_y$  bzw.  $M_x$  über Verschraubung (Darstellung im Einzeltest)

Es erfolgt nur eine reibschlüssige Kraftübertragung über die Schrauben, die deutlich weniger leisten kann als z.B. die Klemmung. An einigen Stellen sind diese Spalte bereits vor der Kalibrierung durch Belegen von Metallstreifen überbrückt worden (BILD 17). Nach den ersten Messungen ist genauer untersucht worden, an welchen Stellen wie viel beigelegt werden muss.

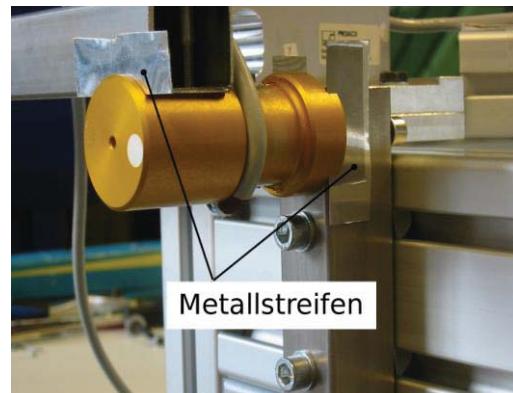


BILD 17. Formschluss zwischen Drehmomentstab und Halterung (Metallstreifen beigelegt)

Wie in BILD 18 zu erkennen ist, hat sich durch Korrekturen bei den Metallstreifen die Breite der Hysterese deutlich reduziert.

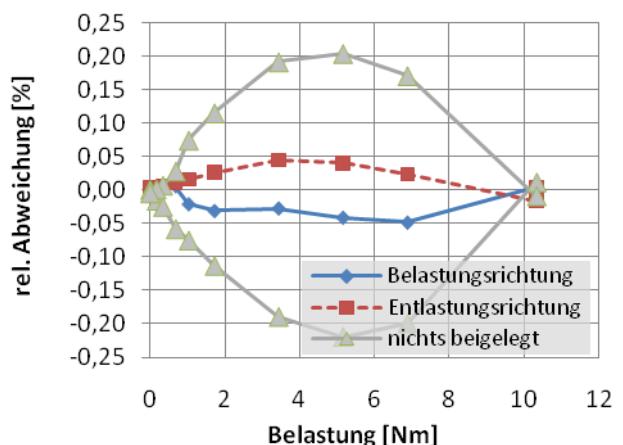


BILD 18. Vergleich der Hysterese-Verläufe (nichts beigelegt und beigelegt)

Die Verwendung von Passschrauben wird hier eine weitere Verbesserung bringen. Sollte dies nicht ausreichen, so kann man die Aufnehmer immer noch miteinander verkleben [7]. Dann können aber einzelne Aufnehmer nicht mehr ausgetauscht (z.B. wegen Defekt) werden. Im jeweiligen Anwendungsfall ist somit eine Abwägung zu treffen, was wichtiger ist.

### 3.3.3. Nicht-lineare Interferenzen

Von einer Interferenz spricht man, wenn eine Belastung bei einem Aufnehmer ein Signal hervorruft, obwohl die Belastung nicht in dessen Messrichtung wirkt. Eine mögliche Ursache hierfür sind Winkelfehler (BILD 19) durch die Fertigung.

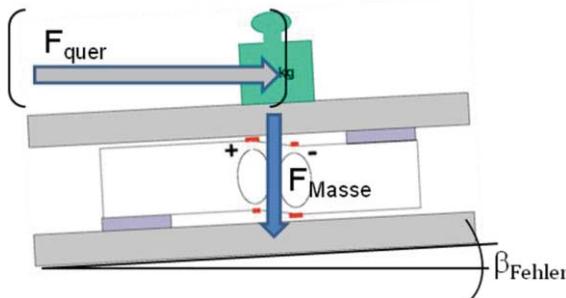


BILD 19. Kräfteplan Winkelfehler

Eine Querkraft führt nach der folgenden Gleichung zu einer angezeigten Kraft in Messrichtung:

$$(1) \quad F_{\text{Messrichtung}} = \sin \beta_{\text{Fehler}} \cdot F_{\text{quer}}$$

Dafür wird die zu messende Kraft nicht vollständig vom Aufnehmer erfasst:

$$(2) \quad F_{\text{Messrichtung}} = \cos \beta_{\text{Fehler}} \cdot F_{\text{Masse}}$$

Ein Fehler dieser Art führt zu linearen Interferenzen. Winkelfehler bei der Applikation der DMS sind eine weitere und häufige Ursache für Interferenzen [7]. Für die Reihenschaltung der Aufnehmer in dieser Waage geradezu typisch sind aber die nicht-linearen Interferenzen, die sich beim Aufnehmer für die Kraft in Z-Richtung zeigen. Diese Interferenz tritt bei der Einleitung einer Kraft in die Waage in X-Richtung ( $F_x$  in BILD 20) auf.

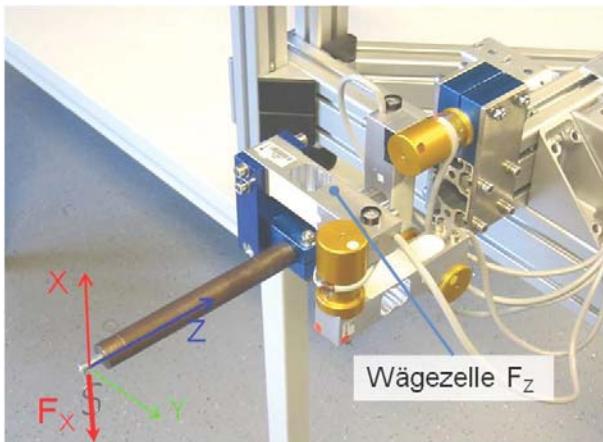


BILD 20. Anordnung der Wägezelle für  $F_z$  und Belastungsrichtung

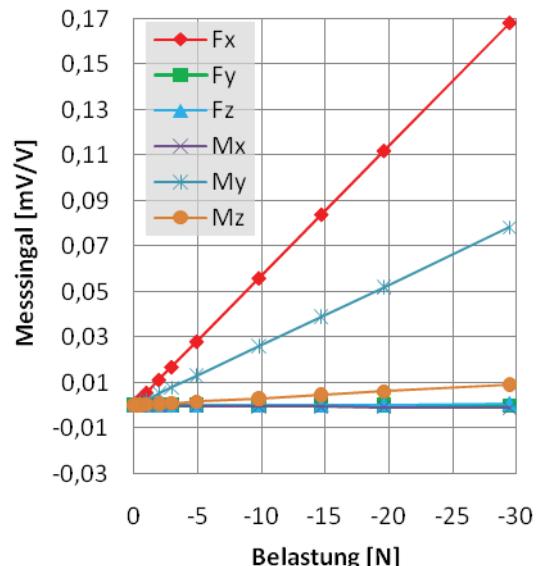


BILD 21. Kennlinien durch eine Kraft in X-Richtung (Krafteinleitung wie in BILD 20)

Erst durch eine Umskalierung der Y-Achse des Diagramms wird der Verlauf des Interferenzsignals ersichtlich (in BILD 22 markiert). Mit einem maximalen Wert von 0,00058 mV/V beträgt es nur ca. 0,35 % des Signals beim Aufnehmer in Messrichtung.

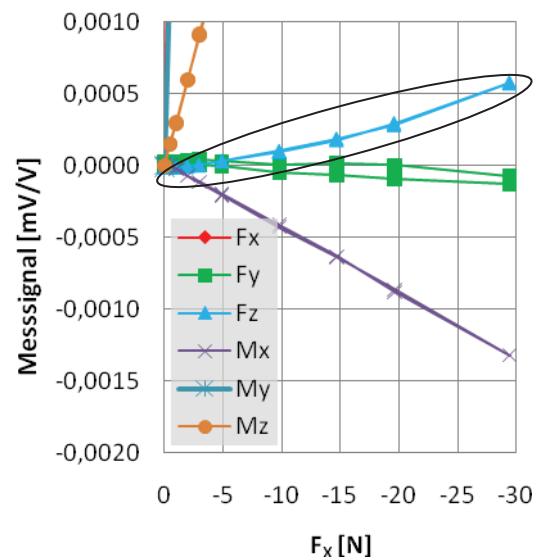


BILD 22. Kennlinien durch eine Kraft in X-Richtung (Interferenz durch Umskalierung der Y-Achse erkennbar)

Die Ursache für diese Interferenz sind Verformungen in der Waage. Der Aufnehmer für  $F_z$  dreht sich aus seiner eigentlichen Belastungsrichtung heraus und hinein in die X-Richtung. Da sich zum einen die Last erhöht, aber auch die Wägezelle immer mehr in diese Richtung ausgerichtet ist, steigt die Kennlinie quadratisch an. Dieser Aufnehmer erfährt die größte Lageänderung, da sich die Verformungen der vorhergehenden Aufnehmer aufgrund der Reihenschaltung addieren.

### 3.4. Messbereich und Empfindlichkeit

Bei den Wägezellen reduziert sich der Messbereich durch den Umstand, dass die Kräfte außerhalb der gedachten Plattform angreifen, die der Hersteller angibt. Letztendlich ergibt er sich so wie bei den Drehmomentaufnehmern durch die Höhe der Belastung bei der Kalibrierung:

- 30 N bei den Kraftaufnehmern
- 8 Nm bei den Drehmomentaufnehmern

Für die Empfindlichkeiten der Aufnehmer ergeben sich die folgenden Werte:

	X	Y	Z
Empfindlichkeit Kraftaufnehmer [N/(mV/V)]	-175,0731	175,0282	-174,2153
Empfindlichkeit Drehmomentaufnehmer [Nm/(mV/V)]	99,59918	101,5903	-120,4686

TAB 1. Empfindlichkeiten der Aufnehmer

Die Vorzeichen entsprechen der Ausrichtung des Waagenkoordinatensystems.

Da heute üblicherweise Messwerte digital verarbeitet werden, ist auch die Auflösung von Interesse, die sich in Kombination mit der A/D-Wandlung ergibt. Das verwendete Messgerät (HBM Quantum X) besitzt einen Messbereich von  $\pm 5 \text{ mV/V}$  und einen A/D-Wandler mit 24 Bit. Damit erhält man für die Auflösungen:

	X	Y	Z
Auflösung Kraftaufnehmer [N/Digit]	0,0001044	0,0001043	0,0001039
Auflösung Drehmomentaufnehmer [Nm/Digit]	0,0000594	0,0000606	-0,0000718

TAB 2. Auflösung der Aufnehmer

Die Kraftaufnehmer können somit in dieser Konstellation bestenfalls einen Unterschied von ca. 10 Milligramm auflösen. Bei den Drehmomentaufnehmern wäre es ein Gewicht von ca. 6 Milligramm, das an einem Hebelarm mit 1 Meter Länge hängt.

### 3.5. Kompensation von Interferenzen

Interferenzen sind nicht das Hauptproblem im Waagenbau. Es ist eher die Reproduzierbarkeit. Wenn die Waage reproduzierbare Eigenschaften hat, dann kann sie auch trotz Interferenzen kalibriert werden [7]. Die Reproduzierbarkeit hat sich durch Verringerung der Hysterese (Metallstreifen beigelegt) deutlich gebessert und ist je nach Aufnehmer gut bis sehr gut.

Es wird eine Korrektur der Interferenzen in  $F_Z$  und  $M_X$  durchgeführt, die sich bei der Einleitung einer Kraft in negativer X-Richtung zeigen. Als Bezugsgröße für die

Korrektur wird das Signal der Wägezelle für  $F_X$  gewählt. Deswegen ist bei der Kalibrierung dafür Sorge getragen worden, dass dieser Aufnehmer seinerseits möglichst Interferenzfrei ist. Zur Bestimmung des Zusammenhangs wird das Interferenzsignal über dem Bezugssignal aufgetragen:

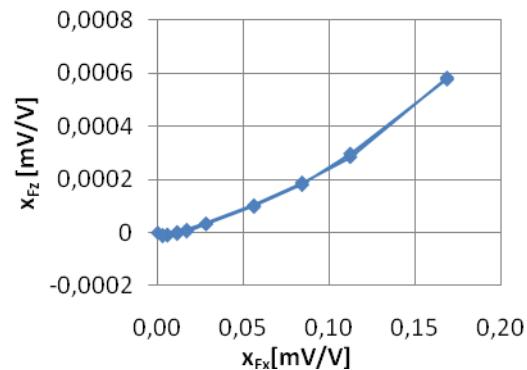


BILD 23. Interferenzsignal bei  $F_Z$  in Abhängigkeit des Messsignals bei  $F_X$

Aus physikalischen Gründen (Verformungseinfluss) wird ein Polynom 2. Grades verwendet. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei einem Wert von 0,997. Die Gleichung lautet:

$$(3) \quad x_{F_z} = 0,01263307 \frac{1}{mV/V} \cdot x_{F_x}^2 + 0,0010582 \cdot x_{F_x}$$

Dieser Wert wird dann im Messprogramm vom gemessenen Wert abgezogen, bevor er mit der Empfindlichkeit multipliziert wird. Das angezeigte Signal bei  $F_X$  reduziert sich durch die Korrektur sehr deutlich:

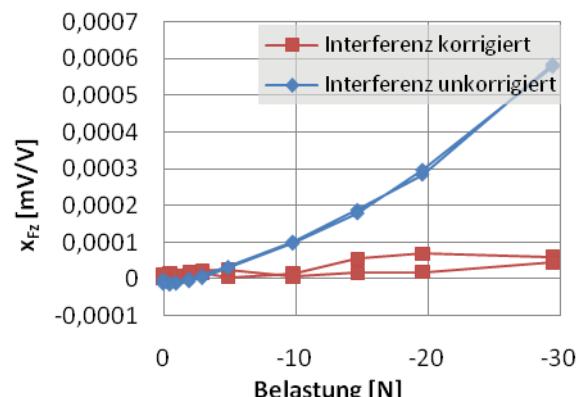


BILD 24. Vergleich der Interferenzsignale bei  $F_Z$  (unkorrigiert und korrigiert)

Der maximale Interferenzwert beträgt nur noch ein Zehntel des unkorrigierten Wertes. Die verbleibenden Abweichungen liegen im Bereich der Hysterese und der Messgenauigkeit der Messkette.

Bei dem Aufnehmer für das Moment um die X-Achse wird analog verfahren mit dem Unterschied, dass hier ein linearer Zusammenhang besteht.

### 3.6. Auswertematrix

Die Ergebnisse aus der Kalibrierung lassen sich zusammen gefasst in der Kalibriermatrix oder in der Auswertematrix (die Inverse der Kalibriermatrix) darstellen. Aufgrund von nicht-linearen Kennlinien ist direkt die Auswertematrix ohne den Umweg über die Kalibriermatrix bestimmt worden.

Der Index ba (=balance) bei den aerodynamischen Komponenten auf der linken Seite steht dafür, dass diese im Waagenkoordinatensystem angegeben werden. Die Hauptdiagonale ist mit den Empfindlichkeiten besetzt. Die einfach unterstrichenen Nebendiagonalelemente dienen der Umrechnung der Momente auf die Achsen des Waagenkoordinatensystems und die doppelt unterstrichenen der Kompensation der Interferenzen bei den Aufnehmern für  $F_z$  und  $M_x$ .

Erläuterungen zu den Elementen in der Gleichung in der gegenüberliegenden Spalte:

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$x_X$ z.B. $X_{F_x}$	$mV / V$	Messsignal (das X im Index hier ist ein Platzhalter für die jeweilige Komponente)
$s_F$	$\frac{N}{mV / V}$	Empfindlichkeit der Kraftaufnehmer
$s_M$	$\frac{Nm}{mV / V}$	Empfindlichkeit der Drehmomentaufnehmer
$k_{M_i(F_j)}$	-	Faktor zur Umrechnung des Momentensignals auf den Bezugspunkt. Das Moment im Index gibt an, auf welche Momentenrichtung (Index i) die Korrektur angewendet wird und die Kraft in der Klammer gibt die Kraftrichtung (Index j) an, durch die das zur korrigierende Momente hervorgerufen wird
$a_{1M_X(F_X)}$	-	Interferenzkoeffizient (Interferenz bei $M_X$ über $F_X$ korrigiert)
$a_{1F_Z(F_X)}$	-	Interferenzkoeffizient (Interferenz bei $F_Z$ über $F_X$ korrigiert)
$a_{2F_Z(F_X)}$	$\frac{1}{mV / V}$	Interferenzkoeffizient (Interferenz bei $F_Z$ über $F_X$ korrigiert)

TAB 3. Erläuterungen zu den Formelzeichen in der Auswertematrix

$$\begin{bmatrix}
 X_{F_X} \\
 X_{F_Y} \\
 X_{F_Z} \\
 \hline
 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix}
 X_{M_X} \\
 X_{M_Y} \\
 X_{M_Z} \\
 \hline
 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}
 s_{F_Z} \\
 -k_{M_X(F_Y)} \cdot s_{M_X} \\
 -k_{M_Y(F_Z)} \cdot s_{M_Y} \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}
 s_{F_Y} \\
 -k_{M_X(F_Y)} \cdot s_{M_X} \\
 -k_{M_Y(F_Z)} \cdot s_{M_Y} \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}
 s_{F_X} \\
 -s_{F_Z} \cdot (a_{2F_Z(F_X)} \cdot X_{F_X} + a_{1F_Z(F_X)}) \\
 -s_{M_X} \cdot a_{1M_X(F_X)} \\
 -k_{M_Y(F_X)} \cdot s_{M_Y} \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}
 F_{X,ba} \\
 F_{Y,ba} \\
 F_{Z,ba} \\
 \hline
 M_{X,ba} \\
 M_{Y,ba} \\
 M_{Z,ba} \\
 \hline
 \end{bmatrix}$$

#### 4. MESSUNGEN IM WINDKANAL

Zur Überprüfung von Windkanälen und der Windkanalmesstechnik ist es üblich, Messungen mit Referenzmodellen durchzuführen. Diese Modelle sind meist bereits in mehreren Kanälen vermessen worden und es gibt somit eine breite Datenbasis. Für diese Arbeit ist die Entscheidung auf den Ahmed-Körper (BILD 25) gefallen. Bei dem Ahmed-Körper handelt es sich um ein Modell, das einem Kraftfahrzeug nachempfunden ist. Zu diesem Zweck ist seine Breite und Höhe im Verhältnis zur Länge hoch (stumpfer Körper), die Front besitzt Abrundungen und am Heck befindet sich eine Schräge. Der originale Ahmed-Körper hat eine Länge von 1044 mm, eine Höhe von 288 mm und eine Breite von 389 mm. Da der Strömungsquerschnitt des RWT nur 600x500 mm<sup>2</sup> beträgt, ist ein Modell des Ahmed-Körpers im Maßstab 1:5 angefertigt worden.



BILD 25. 1:1 Ahmed-Körper am Windkanal der Hochschule der Bundeswehr München [3]

##### 4.1.1. Versuchsaufbau im Windkanal

Das Modell wird mit samt der Waage auf einen Wagen mit Fahrbahn montiert. Diese Einheit wird dann in die Messkabine geschoben und mit Schnellspannern am Flansch des Düsenaustritts befestigt. Die Rollen können zusätzlich gestoppt werden.



BILD 26. Versuchsaufbau in der Messkabine des RWT (¾-offenen Messstrecke, Ahmed-Körper über Haltestiel mit der 6-Komponenten-Waage (unterhalb der Fahrbahn) verbunden

Da der Wagen aus Aluminiumprofilen mit Nuten besteht, kann durch Verstellen der Teile sowohl die Fahrbahn als auch die Waage passenden zur Strömungsrichtung ausgerichtet werden.

##### 4.1.2. Widerstandsbeiwert

Die Widerstandskraft von Ahmed-Körper und Haltestiel ist für die Beiwertbestimmung um den Anteil des Haltestiels korrigiert worden. Somit wird wie in der Quelle [8] der Widerstandsbeiwert des „nackten“ Ahmed-Körpers ermittelt. Hierzu wird eine zusätzliche Messung mit dem Haltestiel alleine durchgeführt. Aufgrund der geringen Versperrung des Querschnitts (ca. 1,4%) werden keine Windkanalkorrekturen angewendet.

Für den Widerstandsbeiwert ergibt sich der folgende Verlauf über der Reynoldszahl (charakteristische Länge 210 mm):

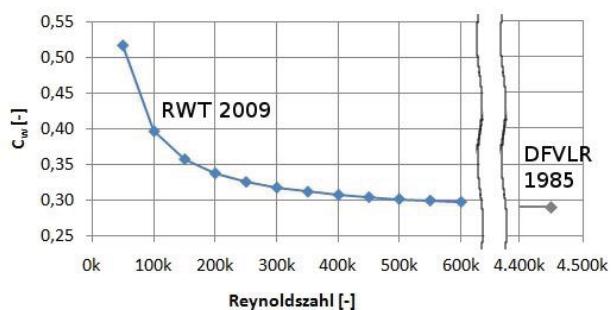


BILD 27. Widerstandsbeiwerte über der Reynoldszahl aufgetragen (charakt. Länge 210 mm)

Im Vergleich zur Messung des DFVLR im Jahr 1985 [8] ist der im RWT bestimmte Widerstandsbeiwert um 2,5% zu groß. In Anbetracht des großen Unterschieds in der Reynoldszahl bleibt ein Vergleich schwierig, mit zunehmender Reynoldszahl sollte der Beiwert aber weiter sinken. Die Größe des Einflusses der vorhandenen Grenzschicht lässt sich momentan nicht abschätzen. Eventuell führen hier zwei gegenläufige Effekte dazu, dass der gemessenen Beiwert nahe an dem Wert der Referenzmessung liegt. Ein Druckgradienteneinfluss längs der ¾-offenen Messstrecke im RWT kann soweit ausgeschlossen werden, da der Ahmed-Körper in einem Bereich positioniert worden ist, in dem der statische Druck praktisch konstant ist [9].

##### 4.1.3. Auftriebsbeiwert

Bei der Messung nur mit Stiel ist zwar ein Auftrieb gemessen worden, dieser röhrt aber von der Überströmung der Stirnfläche des Stiels her. Bei der Messung von Ahmed-Körper und Stiel schließt das Modell direkt an den Stiel an. Somit steht hier diese Fläche gar nicht im Wind. Die Effekte, die zum Auftrieb beim Stiel alleine führen, sind mit Ahmed-Körper deswegen nicht vorhanden. Deshalb wird die Auftriebskraft aus der Messung des Ahmed-Körpers mit Stiel unverändert übernommen.

Für den Auftriebsbeiwert ergibt sich der folgende Verlauf über der Reynoldszahl:

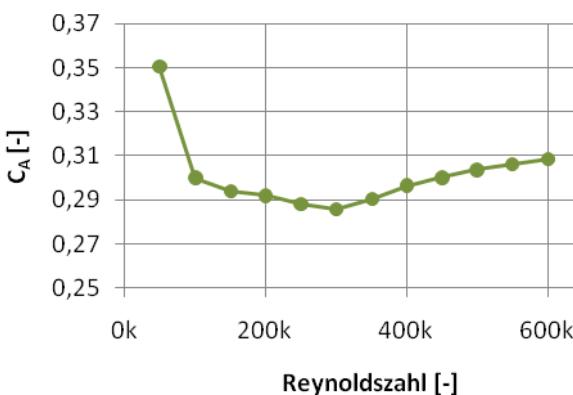


BILD 28. Auftriebsbeiwert über der Reynoldszahl aufgetragen (charakt. Länge 210 mm)

Der aus den Messungen im RWT bei der höchsten Reynoldszahl bestimmte Auftriebsbeiwert fällt um 15,5% kleiner aus, als der in der Referenzmessung bestimmte. Beide Male zeigt die Auftriebskraft aber in dieselbe Richtung (entgegen der Erdbeschleunigung). Da keine Kenntnis über die tatsächlichen Grenzschichtdicken im RWT und im Windkanal, der in der Quelle [8] verwendet worden ist, besteht, wären weitere Erklärungsversuche in dieser Richtung sehr spekulativ. Da der Auftrieb eines Fahrzeugs stark von dessen Nachlauf beeinflusst wird, lässt sich ein Teil der Abweichung durch den Unterschied im Heckneigungswinkel erklären (RWT: 24° und DFVLR: 25°).

#### 4.1.4. Nickmomentenbeiwert

Zur Bestimmung des Nickmomentenbeiwertes sind die sechs Komponenten aus dem Waagenkoordinatensystem ins Fahrzeugkoordinatensystem umgerechnet worden. Die Lage des Fahrzeugbezugspunktes relativ zum Ahmed-Körper ist so gewählt worden, so dass er an der gleichen Position wie bei den Messungen des DFVLR [8] liegt.

Für den Beiwert des Nickmoments ergibt sich dieser Verlauf über der Reynoldszahl:

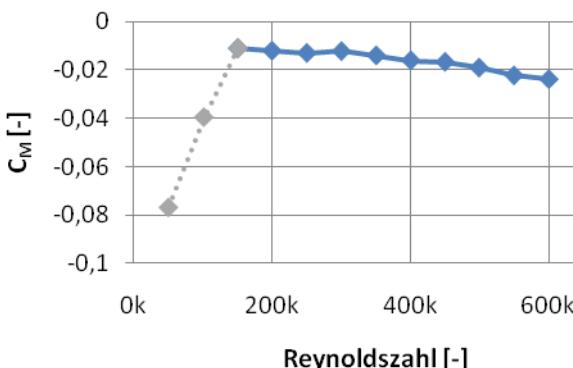


BILD 29. Nickmomentenbeiwert über der Reynoldszahl aufgetragen (charakt. Länge 210 mm)

Der bei einer Reynoldszahl von 600.000 ermittelte Nickmomentenbeiwert liegt mit -0,0238 deutlich unter dem Wert des DFVLR [8]. Dort wurde ein Wert von -0,0719 ermittelt. Wie bei der Auftriebskraft ist das Nickmoment sehr vom Nachlauf und somit auch vom Heckneigungswinkel bestimmt. Die Richtung des Momentes stimmt aber bei beiden Messungen überein.

## 5. FAZIT UND AUSBLICK

Da es sich um eine aus mehreren Teilen gebaute Mehrkomponenten-Waage handelt, können zum einen jederzeit defekte Aufnehmer ausgetauscht und zum anderen unterschiedliche Komponentenanzahlen dargestellt werden. Dies ist neben der weitestgehenden Verwendung von Kaufteilen ein entscheidender Faktor zur Reduzierung der Gesamtkosten. In der Kalibrierung konnten die Interferenzen und ihre Ursachen sauber herausgearbeitet werden. Auch ist bei den Kalibrierungsmessungen die sehr gute Reproduzierbarkeit der Werte nachgewiesen worden. Dies ermöglicht eine rechnerische Kompensation der Interferenzen über die Auswertematrix. Hier konnten mit einem einfachen Ansatz bereits sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Sollte dies nicht ausreichen, so muss die Anzahl der Lastkombinationen (bisher 60) deutlich erhöht werden (400-500). Durch diese vielfältigen Kombinationen kann besser herausgearbeitet werden, wodurch eine Interferenz verursacht wird. Diese Informationen erlauben dann eine vollständigere Besetzung der Auswertematrix. Es müssen Kombinationen aus Lasten mit unterschiedlichen Richtungen (z.B.  $F_x$  und  $F_z$ ) aufgebracht werden. Da dies nicht allein durch eine Drehung der Waage möglich ist, sind wieder Kraftumlenkungen notwendig, die möglichst reibungsfrei sein müssen (Kreuzfederlenke oder Schneidenpfannen).

- [1] TROPEA, C., YARIN A. L. und FOSS J. F. (Hrg.): Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Berlin, Heidelberg: Springer 2007Schrifttum
- [2] <http://www.aerotech-ate.com/cgi-bin/home.pl?page=products#top> (Sichtung am 26.02.2009)
- [3] DALLMAIER J.: Bilder, die beim Vororttermin der FEP-Gruppe (HS Regensburg) im WS 2008/09 am Windkanal der Hochschule der Bundeswehr in München gemacht wurden
- [4] DIVERSE VERFASSER: HBM On Tour CD. Vorträge 2006 (HBM = Hottinger Baldwin Messtechnik)
- [5] HOFFMANN, K.: Eine Einführung in das Messen mit Dehnungsmessstreifen. PDF-Dokument auf <http://www.hbm.com>
- [6] LÄMMLEIN, S.: Unterlagen zum PMT-Versuch KW. HS Regensburg 2008
- [7] HUFNAGEL, K. (TU Darmstadt): „Private Kommunikation“
- [8] WENDEKAMM, W.: Kraftmessungen an einem Kraftfahrzeugmodell  
Versuchsbericht DFVLR (IB 19111-84CO4), Braunschweig 1985
- [9] STÖCKL Q., WILHELM F., SCHWANZER W., DAMDINDORJ B.: Einarbeitung gängiger Windkanalkorrekturverfahren für die offene, 3/4-offene und geschlossene Messstrecke des Regensburg Wind Tunnel (RWT). Forschungs- und Entwicklungsprojektarbeit im Masterstudiengang, HS Regensburg 2009, Bericht LWS-TN-09/56