



Auslegung und Konstruktion eines Messaufbaus zur
Reduktion der Grenzschichtdicke am
Messstreckenboden eines Windkanales

Diplomarbeit

vorgelegt von

Christian Sauer Moser

Studium des Maschinenbaus

Energie- und Umwelttechnik

Technische Universität Graz

Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung

Unter der Betreuung von

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Walter Meile

Graz im Mai 2013

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 15. Mai 2013

.....

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, am 15. Mai 2013

.....

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich während meiner Studienzzeit unterstützt haben. Dabei denke ich zuallererst an meine ganze Familie, die stets an mich glaubte und dabei immer äußerst geduldig blieb.

Besonderer Dank geht an das Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung der TU Graz, an dem ich diese Arbeit durchführen konnte. Insbesondere an Herrn Ass. Prof Dipl.-Ing. Dr. techn. Walter Meile, der durch seine fachliche Betreuung wesentlich zur erfolgreichen Bearbeitung der Aufgabenstellung beigetragen hat. Außerdem möchte ich ihm sowie dem Vorstand des Instituts, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Brenn, für die genaue Korrektur danken.

Weiters danke ich noch den Mitarbeitern der Werkstätte für die praktische Unterstützung während der Konstruktionsphase sowie im Anschluss für die präzise Fertigung.

Dem weiteren wissenschaftlichen Personal des Instituts sei an dieser Stelle für die zahlreichen Fachgespräche und inspirierenden Diskussionen zu danken, die mitunter bis in die späten Abendstunden geführt wurden.

Ich danke auch Herrn DI Feichtinger (qpunkt GmbH), der in Zusammenarbeit mit dem TERA dieses Diplomarbeitenthema anregte und somit diese Abschlussarbeit erst ermöglichte.

Nicht zuletzt danke ich auch allen Freunden, Studienkollegen sowie sonstigen Wegbegleitern, die mir während meiner Studienzzeit dabei geholfen haben, auch die außeruniversitären Aktivitäten mit entsprechendem Engagement zu betreiben.

KURZFASSUNG

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Konstruktion einer Zusatzkomponente für einen Prüfstand zur experimentellen Untersuchung aerodynamischer Eigenschaften von Fahrzeugen. Ziel klassischer Windkanalexperimente ist die direkte Messung der auf ein Fahrzeug wirkenden Kräfte und Momente. Dazu wird in der Regel ein Modell in verkleinertem Maßstab verwendet. Wichtig ist, die am realen Fahrzeug herrschenden Bedingungen im Versuchsaufbau möglichst gut nachzubilden. Für Windkanäle mit festem Messstreckenboden muss besonders auf die entstehende Bodengrenzschicht in der Messstrecke geachtet werden. Diese kann die Umströmung von Fahrzeugen mit geringer Bodenfreiheit, insbesondere jene um verkleinerte Modelle, stark verändern, da viele Komponenten dieser Fahrzeuge innerhalb dieser Grenzschicht liegen.

Für den 2m-Windkanal am Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung der Technischen Universität Graz wurde eine Vorrichtung konstruiert, die den Einfluss entstehender Bodengrenzschichten in der Windkanalmessstrecke reduziert. Dazu dient eine erhöhte Plattform, die über der Grenzschicht des eigentlichen Messstreckenbodens installiert wird. Mit einer beweglichen Klappe an der Hinterseite dieses Zwischenbodens kann der Winkel der Zuströmung im vorderen Bereich der Messstrecke verändert werden, um eine parallele Anströmung des Prüflings zu realisieren. Gleichzeitig galt es auch, eine verstellbare Aufspannung für Modelle gängiger Fahrzeuge in den Maßstäben 1 : 4 bzw. 1 : 5 zu realisieren. Die Modellaufspannung wurde mit gegeneinander verschiebbaren Montageschienen verwirklicht. Dadurch ist es möglich, Radstände und Spurweiten stufenlos einzustellen. In Verbindung mit der notwendigen Abdeckung resultiert ein effektiv umsetzbarer Einstellbereich für den Radstand von $440\text{ mm} < L_{RS} < 720\text{ mm}$ bzw. für die Spurweite von $210\text{ mm} < L_{SP} < 490\text{ mm}$. Ferner ist der gesamte Aufbau im Winkelbereich von $-30^\circ < \beta < +30^\circ$ in Schritten von $\Delta\beta = 2,5^\circ$ verdrehbar ausgeführt.

Die Funktionsfähigkeit des neu konstruierten Versuchsstandes wurde zuerst mit einem Modell des FENNEK, einem Niedrigenergiefahrzeug des Team Eco Racing Austria (TERA) der TU Graz, im Maßstab 1 : 2 überprüft. Hierzu liegen Vergleichsdaten aus früheren Messungen vor. Bei diesen Untersuchungen wurde eine deutliche Abhängigkeit des Widerstandsbeiwerts von der Klappenstellung an der Zusatzmessstrecke erkannt, was auf die Veränderung der Strömungsrichtung im

Zuströmbereich zurückzuführen ist. Dieses Verhalten konnte auch bei den Versuchen am Panther (Modell im Maßstab 1 : 3), einem weiteren Konzeptfahrzeug von TERA, festgestellt werden. Für dieses Modell sollten die aerodynamischen Kräfte und Momente an verschiedenen Ausführungen ermittelt werden, um den Einfluss von Optimierungsmaßnahmen beurteilen zu können. Ausgehend vom Originalkonzept wurde eine verbreiterte Spurweite an der Vorderachse getestet und die Auswirkungen von Radverkleidungen an den Rädern der Vorderachse untersucht. Zusätzlich wurde versucht, den Einfluss des zur sicheren Aufspannung notwendigen Spaltes unter den Rädern zu quantifizieren.

ABSTRACT

The present diploma thesis is concerned with the construction of special equipment for a test rig for the experimental investigation of aerodynamic characteristics of vehicles. The target of classic wind tunnel experiments is the direct measurement of forces and moments appearing on a vehicle. For that purpose generally a model at reduced scale is used. Important is to replicate the prevailing conditions on the real vehicle in the experiment as closely as possible. Particular attention must be paid to wind tunnels with a stationary ground because of the resulting boundary layer in the test section. This can change the flow around vehicles with low ground clearance and especially small scale models, since many components of these vehicles are within this boundary layer.

For the 2m wind tunnel at the Institute of Fluid Mechanics and Heat Transfer of Graz University of Technology a device was constructed which reduces the influence of the emerging boundary layer on the test section floor of the wind tunnel. For this purpose, an elevated platform is installed above the boundary layer of the test section ground. A movable flap on the rear edge of this additional ground plane influences the angle of the oncoming flow at the front of the platform. Thus, a parallel flow on the test body can be achieved. There is also an adjustable clamping for models of popular vehicles in a scale of 1:4 or 1:5 realized. The model clamping was realized with slideable mounting rails. The rails allow the track and the wheelbase to be adjusted continuously. In combination with the required coverage, an effective setting of $440\text{ mm} < L_{RS} < 720\text{ mm}$ for the wheelbase and $210\text{ mm} < L_{SP} < 490\text{ mm}$ for the track width is achieved. Furthermore, the entire structure is rotatable in steps of $\Delta\beta = 2,5^\circ$ for an angular range of $-30^\circ < \beta < +30^\circ$.

The functionality of the new designed test rig was verified with a model of the FENNEK in a scale of 1:2. The Fennek is a low-fuel-consumption vehicle of the Team Eco Racing Austria (TERA) at Graz University of Technology. As reference there was an already existing data base from previous measurements available. In these studies, a significant dependency of the drag coefficient on the flap angle at the rear of the auxiliary platform was detected. This is due to the change of the flow direction of the oncoming flow. This behavior was also observed in the experiments on the Panther, another concept car of TERA (model scale 1:3). For this model, the aerodynamic forces and moments of different configurations were determined in order to assess the

influence of optimizations. Starting with the original concept, a wider track width on the front axle was tested and the effects of casings on the front wheels were examined. In addition, an attempt was made to quantify the influence of the gap underneath the wheels which is necessary for the safe clamping of the model.

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Windkanäle | 4 |
| 2.1 | Grundlagen der Windkanaltechnik | 4 |
| 2.1.1 | Bauweisen | 5 |
| 2.1.2 | Wichtige Baugruppen von Windkanälen | 6 |
| 2.1.2.1 | Düse | 6 |
| 2.1.2.2 | Messstrecke | 7 |
| 2.1.2.3 | Kollektor | 8 |
| 2.1.3 | Methoden zur Geschwindigkeitsmessung..... | 9 |
| 2.2 | Der 2m-Windkanal am ISW..... | 11 |
| 3 | Grundlegende Betrachtungen | 13 |
| 3.1 | Strömungsmechanische Grundlagen | 13 |
| 3.1.1 | Aerodynamische Kräfte und Momente | 15 |
| 3.1.2 | Grenzschichten..... | 19 |
| 3.1.3 | Strömungsablösung..... | 20 |
| 3.2 | Ähnlichkeitsgesetze..... | 22 |
| 3.3 | Strömungsbild am bewegten Fahrzeug | 24 |
| 4 | Konstruktion Messaufbau | 28 |
| 4.1 | Konzeptfindung..... | 28 |
| 4.1.1 | Anforderungen an den Messaufbau | 28 |
| 4.1.2 | Bestimmung der Hauptabmessungen..... | 28 |
| 4.2 | Detailkonstruktion..... | 32 |
| 4.2.1 | Korpus..... | 33 |
| 4.2.2 | Aufspannung | 36 |

| | |
|---|---------------|
| 4.2.3 Drehscheibe..... | 38 |
| 5 Messungen | 41 |
| 5.1 Messgeräte..... | 41 |
| 5.2 Messverfahren | 43 |
| 5.3 Versuchsaufbau | 45 |
| 5.3.1 Modell Fennek | 47 |
| 5.3.2 Modell Panther..... | 50 |
| 6 Ergebnisse..... | 54 |
| 6.1 Fennek..... | 56 |
| 6.1.1 Widerstandskräfte | 56 |
| 6.1.2 Auftriebskräfte | 58 |
| 6.1.3 Unterschied der Aufspannungen..... | 60 |
| 6.2 Panther..... | 62 |
| 6.2.1 Widerstands- und Auftriebskräfte der Originalversion..... | 63 |
| 6.2.2 Widerstands- und Auftriebskräfte der optimierten Version..... | 64 |
| 6.2.3 Einfluss der vorderen Radverkleidungen..... | 66 |
| 6.2.4 Strömungsvisualisierungen | 68 |
| 7 Zusammenfassung | 72 |
| LITERATURVERZEICHNIS..... | 76 |
| ANHANG A..... | i |
| ANHANG B..... | xxix |
| ANHANG C..... | xxxiii |

LISTE DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN

Lateinische Buchstaben:

| Symbol | Einheit | Bedeutung |
|--------|-------------|----------------------------|
| a | m/s | Schallgeschwindigkeit |
| A | m^2 | Fläche |
| A | N | Auftriebskraft |
| c | - | Beiwert |
| d, D | m | Durchmesser |
| e | mm | Bodenfreiheit |
| f | Hz | Frequenz |
| g | m/s^2 | Erdbeschleunigung |
| H | m | Fahrzeughöhe |
| k | - | Düsenfaktor |
| L | m | Fahrzeuglänge |
| M | Nm | Moment |
| Ma | - | Machzahl |
| Re | - | Reynoldszahl |
| S | N | Seitenkraft |
| SP | - | Staupunkt |
| T | $^{\circ}C$ | Temperatur |
| Tu | - | Turbulenzgrad |
| U, u | m/s | Strömungsgeschwindigkeit |
| u' | m/s | Geschwindigkeitsschwankung |
| W | N | Widerstandskraft |

Griechische Buchstaben:

| Symbol | Einheit | Bedeutung |
|---------------|-------------------|------------------------|
| α | ° | Anstellwinkel |
| β | ° | Schiebewinkel |
| γ | ° | Diffusorwinkel |
| δ | mm | Grenzschichtdicke |
| λ | - | Schlankheitsgrad |
| μ | Pas | dynamische Zähigkeit |
| ν | m ² /s | kinematische Zähigkeit |
| ρ | kg/m ³ | Dichte |
| τ | N/m ² | Schubspannung |
| φ | - | Versperrungsverhältnis |

Abkürzungen:

| | |
|------|--|
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| DVK | Düsenvorkammer |
| GS | Grenzschicht |
| ISW | Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung |
| TERA | Team Eco Racing Austria |

Indizes:

| Index | Bedeutung |
|--------------|-----------------------------------|
| ∞ | Umgebungs- |
| A | Auftriebs- |
| DVK | Düsenvorkammer |
| $krit$ | kritisch |
| m | Modell- |
| mg, g | Giermoment- |
| mn, n | Nickmoment- |
| mr, r | Rollmoment- |
| N | Düsenaustritt |
| P | Druck- |
| pr | projiziert |
| R | Reibungs- |
| RS | Radstand |
| S | Seiten- |
| $stat$ | statisch |
| SP | Spurweite |
| tot | total |
| $VR-0$ | Vorderrad bis Koordinatenursprung |
| w | Wand |
| W | Widerstands- |

1 Einleitung

Die Aerodynamik ist ein zentraler Bestandteil der Automobilentwicklung. Hierbei ist eine Vielzahl von Faktoren maßgeblich, seien es die Senkung des Fahrwiderstandes und die daraus resultierende Kraftstoffeinsparung oder das Erreichen von Höchstgeschwindigkeiten und Richtungsstabilität sowie die Sicherstellung von ausreichend Kühlluft und die Vermeidung von Verschmutzungen. Allerdings resultiert die äußere Form eines Autos nicht nur aus den Gegebenheiten seiner Umströmung. Vielmehr ist es die Aufgabe der Automobilaerodynamik, vorgegebene Formen unter Berücksichtigung der zum Teil bereits genannten Kriterien zu optimieren. Diese Optimierungen werden meist rechnergestützt mit entsprechenden Computerprogrammen durchgeführt. Obwohl diese Simulationen immer zuverlässiger, schneller und kostengünstiger werden, liegt die benötigte Rechenzeit noch im Bereich mehrerer Tage. Dadurch ist es bis heute üblich, Detailoptimierungen mit Versuchen in einem Windkanal durchzuführen. Solche Tests erfolgen je nach Fahrzeugtyp bzw. den zur Verfügung stehenden Einrichtungen entweder an einem verkleinerten Modell oder am Fahrzeug im Originalmaßstab. Durch die Komplexität der auftretenden Strömungsfelder und den damit verbundenen Aufwand bei Simulationen können Windkanalexperimente oft schneller und kostengünstiger zum Ziel führen als die Anwendung numerischer Berechnungsverfahren.

Um aus Experimenten, insbesondere an Modellen verkleinerten Maßstabs, vernünftige Ergebnisse zu erzielen sind einige Rahmenbedingungen unbedingt einzuhalten. Neben der Einhaltung der Ähnlichkeitsgesetze ist bei bodengebundenen Fahrzeugen der Einfluss der Fahrbahn auf die Umströmung zu beachten. Entsprechende Bedingungen lassen sich auf unterschiedliche Art und Weise erfüllen wobei besonders die Auswirkungen der Bodengrenzschicht eine Herausforderung darstellen. Ziel ist es, mit geeigneten Maßnahmen die Einflüsse dieser Grenzschicht in Windkanalversuchen möglichst zu eliminieren bzw. naturgemäß nachzubilden.

Am Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung (ISW) ist es von Interesse, möglichst realitätsnahe Messungen an Fahrzeugen durchführen zu können. Zwar existieren am Institut bereits diverse Aufbauten für solche Messungen, allerdings fehlt derzeit noch eine gewisse Flexibilität hinsichtlich der Aufspannmöglichkeiten (zentral, 2-, 3- oder 4-Punkt). Die jetzigen Aufbauten sind für jeden Messauftrag individuell gestaltet und zum Teil nur mit großem Aufwand anzupassen. Aufgrund der vielen

unterschiedlichen Messaufgaben ist es notwendig die entsprechenden Aufbauten schnell und flexibel zu realisieren. Nur so können der Windkanal optimal ausgelastet und unnötig lange Leerlaufzeiten vermieden werden. So werden neben Grundlagenforschung und diversen Übungsveranstaltungen für Studierende auch die Modelle verschiedener Rennteams der TU Graz im Windkanal des ISW untersucht.

Eines dieser erwähnten Teams ist das Team Eco Racing Austria, kurz TERA. Dabei handelt es sich um eine Gruppe von Studenten, die es sich zum Ziel gesetzt haben, ein möglichst energieeffizientes Fahrzeug zu entwickeln. Gerade für Fahrzeuge dieser Art kann die genaue Kenntnis der aerodynamischen Eigenschaften über Erfolg oder Misserfolg mitentscheidend sein. Hierbei ist nicht nur der Luftwiderstand als maßgebliche Größe zu nennen, sondern auch das Verhalten des Fahrzeuges bei Seitenwind und dessen Beeinflussung der Fahrstabilität.

Bislang existieren zwei unterschiedliche Fahrzeugkonzepte, mit denen das TERA-Team regelmäßig zu Vergleichswettkämpfen mit Studententeams von Universitäten aus der ganzen Welt antritt. FENNEK - der erste Prototyp des TERA-Teams - wurde im Jahr 2010 erstmals vorgestellt und seither stetig weiter entwickelt. Der Antrieb dieses ersten Modells erfolgte noch über einen bürstenlosen Gleichstrommotor, der die Energie aus einer Wasserstoff-Brennstoffzelle bezieht. Zur Zeit werden Lithium-Ionen-Akkus als Energiequelle eingesetzt.



Bild 1.1: Fennek 2010; aus [19]

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden allerdings am Modell aus dem Jahr 2010 (Bild 1.1) durchgeführt, da hierfür bereits Vergleichswerte aus früheren Windkanalmessungen sowie numerische Berechnungen vorliegen.

Auf der Internetseite des TERA [19] ist das zweite Modell beschrieben, der PANTHER – ein „straßentaugliches Elektrofahrzeug, ein Urban Concept Car“ (Bild 1.2). Auch der Panther wurde bereits in Vergleichskämpfen eingesetzt, allerdings steht für dieses Konzeptfahrzeug nicht mehr nur die Energieeffizienz alleine an oberster Stelle des Pflichtenhefts. Aus Designgründen und um ein höheres Maß an Komfort zu erreichen, wurden Abstriche in der Aerodynamik gemacht, insbesondere beim Luftwiderstand.

Wie bei den neuen Fennek Modellen wird die Energie aus einem Lithium-Ionen-Akku bereitgestellt.

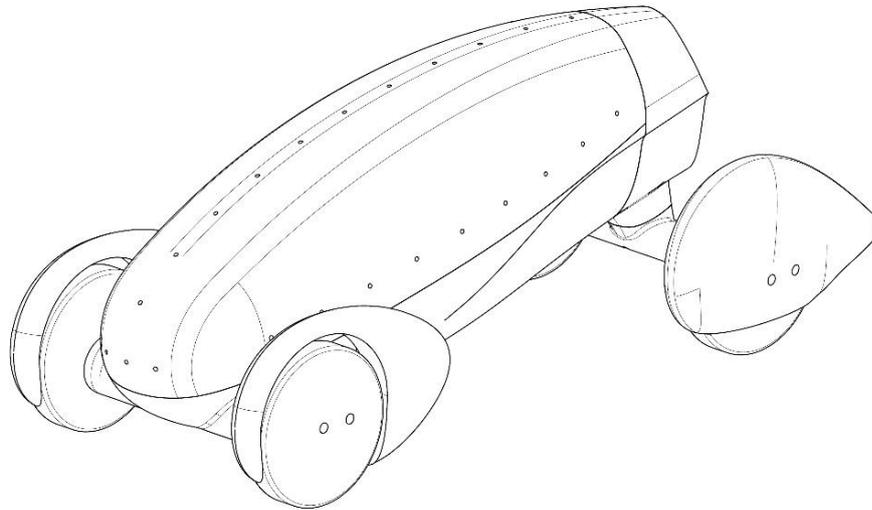


Bild 1.2: CAD Modell des TERA Panther

Die vorliegende Arbeit ist in drei Abschnitte gegliedert. Der erste Abschnitt befasst sich mit der Auslegung und der Konstruktion eines geeigneten Messaufbaus zur Reduktion der Auswirkungen der unvermeidlichen Bodengrenzschichten in der Windkanalmessstrecke. Die Konstruktion soll aber nicht ausschließlich für Fahrzeuge des TERA konzipiert sein, sondern ein variables Konzept zur Analyse unterschiedlichster Fahrzeugtypen darstellen. Vorab wird in einem theoretischen Abschnitt erläutert, warum solche speziellen Messeinrichtungen überhaupt nötig sind und welche unterschiedlichen Ausführungsmöglichkeiten existieren. Aufgabe des zweiten Teiles ist es, den bereits in einer Diplomarbeit vermessenen FENNEK aus dem Jahr 2010 mit dem neukonstruierten Zwischenboden zu untersuchen. Diese Messungen dienen in erster Linie dazu, den neuen Messaufbau zu kalibrieren und dessen Verhalten bezüglich der veränderten Aufspannung sowie der Fahrzeugposition in der Messstrecke zu erfassen. Im abschließenden dritten Abschnitt werden die Kraft- und Momentenbeiwerte für ein PANTHER-Modell im Maßstab 1:3 gemessen und zusätzlich einige Variationen der vorderen Radabdeckungen sowie der vorderen Spurweite untersucht.

2 Windkanäle

2.1 Grundlagen der Windkanaltechnik

Die Hauptaufgabe von Untersuchungen in Windkanälen ist die experimentelle Nachbildung von natürlichen Strömungsproblemen. Die nachzubildenden Verhältnisse können sich stark voneinander unterscheiden. Beispielsweise sind die Randbedingungen für Versuche an Flugkörpern im Vergleich zu jenen für Fahrzeuge in Bodennähe komplett verschieden. Ziel der Windkanaltechnik ist es, die realen Bedingungen zu reproduzieren, wofür möglichst realistische Versuchsanordnungen erstellt werden müssen. Um diese komplexen Anforderungen zu erfüllen, wurden neben den klassischen Windkanälen zur Messung von aerodynamischen Kräften und Momenten auch aeroakustische bzw. Klimawindkanäle zur Untersuchung von Geräusentwicklung bzw. klimatischer Bedingungen ausgeführt.

Durch den Einfluss des natürlichen Windes und das dadurch bedingte instationäre Strömungsfeld ist es insbesondere in der Automobilaerodynamik schwierig, die realen Gegebenheiten auf die Versuchsanlage zu übertragen. Hinzu kommt, dass sich ein Auto in der Realität relativ zum Untergrund bewegt, während sich im Windkanal das Modell nicht bewegt. Um den Bodeneinfluss bei Automobilen zu simulieren wird großer Aufwand betrieben, da dynamische, kinematische und geometrische Ähnlichkeit zwischen Experiment und Realität gewährleistet sein müssen, um aussagekräftige Ergebnisse erzielen zu können. Die Bedeutung der Ähnlichkeitsgesetze und deren reale Anwendung wird in Abschnitt 3.2 noch genauer behandelt.

In der vorliegenden Arbeit werden Windkanalexperimente im klassischen Sinne - zur Ermittlung der wirkenden Kräfte - durchgeführt. Im folgenden Abschnitt werden die für einen Windkanal wesentlichen Bestandteile und deren Besonderheiten erläutert, wobei jedoch nur auf die wichtigsten Faktoren eingegangen wird. Für eine detaillierte Beschreibung und Auslegung aller Windkanalkomponenten verweist Hucho [8] auf weiterführende Literatur (z. B. [16], [2]). Darüber hinaus wird der 2m-Windkanal am ISW kurz vorgestellt.

2.1.1 Bauweisen

Grundsätzlich existieren zwei verschiedene Bauarten. Der Unterschied dieser beiden Ausführungen liegt in der Luftführung und ist in Bild 2.1 dargestellt. Die erste Art (Teilbild (b)) wurde von Gustave Eiffel gebaut und ist auch nach diesem benannt. Hier wird kontinuierlich frische Umgebungsluft angesaugt und nach Durchströmen der Messstrecke wieder an die Umgebung abgegeben. Somit hat die Luft in der Messstrecke in der Regel den Zustand der Umgebung. Wenn das nicht erwünscht ist, muss die angesaugte Luft entsprechend konditioniert werden, was mitunter einen erheblichen Aufwand und somit höhere Kosten bedeutet. Zudem sind die Zuströmverhältnisse zur Ansaugvorrichtung zu beachten, da diese stark von den lokalen Windverhältnissen abhängen. Auch die Strömung aus dem Kanal zurück in die Umgebung kann mitunter Auswirkungen auf die Umgebung haben und muss bei der Auslegung berücksichtigt werden. Nicht zuletzt entsteht durch die offene Bauweise eine erhebliche Lärmbelastung für die Umwelt. Ähnlich dem Eiffel-Kanal sind noch Freistrahls-Kanäle, wie in Bild 2.1 (a) zu sehen, bekannt. Diese haben aber keine Relevanz in Versuchen zur Fahrzeugaerodynamik.

Bei der von Ludwig Prandtl in Göttingen entworfenen Anlage wird die Luft in einem Kreislauf geführt, man spricht von einem Kanal in Göttinger Bauweise. Die Vorteile dieser Anordnung liegen hauptsächlich im geringeren Energieverbrauch sowie in der abgeschlossenen und somit von äußeren Einflüssen ungestörten Bauart. Nachteil dieser Bauform ist die Erwärmung der Luft innerhalb des Kreislaufs. Kann der Temperatureinfluss nicht vernachlässigt werden, muss die Luft gekühlt werden, was mit entsprechendem Aufwand verbunden ist.

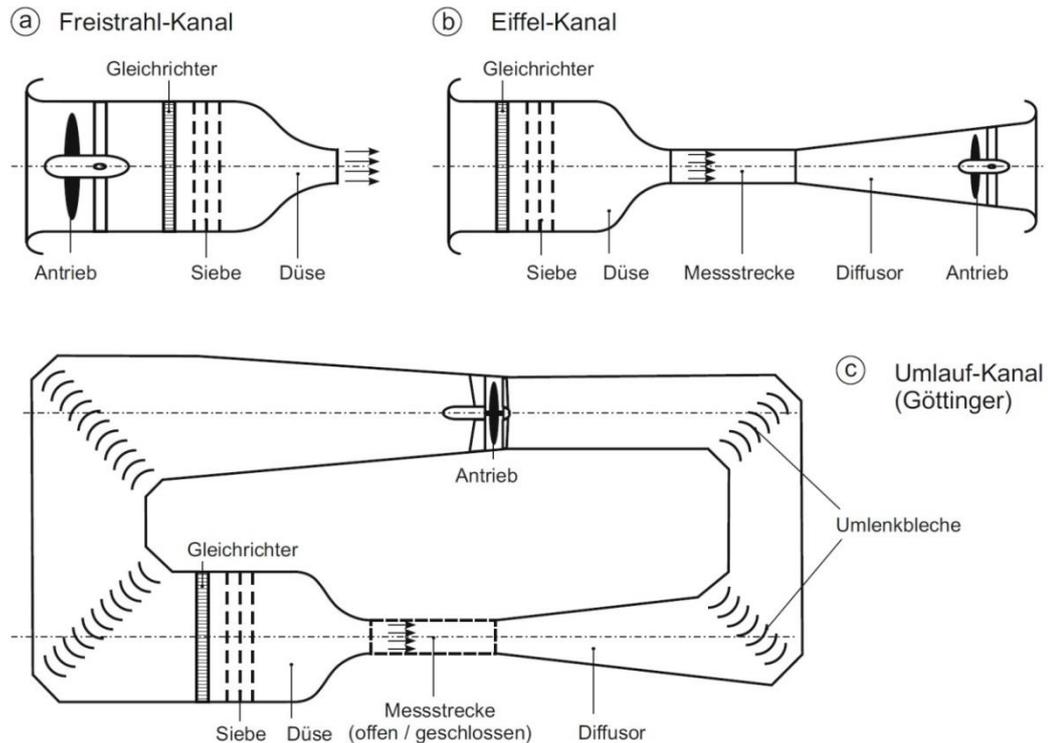


Bild 2.1: Unterschiedliche Bauarten von Windkanälen; aus [12]

2.1.2 Wichtige Baugruppen von Windkanälen

Unabhängig von der Bauform sollten bei allen Windkanälen einige Richtlinien beachtet werden. Können diese nicht eingehalten werden müssen die erhaltenen Messdaten entsprechend korrigiert oder zumindest mit Vorbehalt behandelt werden. Ein Windkanal, egal ob Göttinger- oder Eiffel-Bauart, besteht im Wesentlichen aus drei Hauptkomponenten: der Düse, der Messstrecke und dem Kollektor. Um das verlässliche Funktionieren des Windkanales zu gewährleisten, müssen diese Baugruppen sorgfältig aufeinander abgestimmt werden.

2.1.2.1 Düse

In der Düse wird die in der Düsenvorkammer beruhigte und vergleichmäßigte Strömung auf die geforderte Strahlgeschwindigkeit beschleunigt. Eine sorgfältige Auslegung ist von großer Bedeutung, um die geforderte Strahlgüte zu erreichen. Nach Hucho [8] sind typische Anforderungen an die Strahlqualität:

- maximale Geschwindigkeitsabweichung vom Mittelwert

$$\frac{\Delta u}{U_\infty} = \frac{(u - U_\infty)}{U_\infty} \leq 0,5\%, \quad (2.1)$$

wobei u die lokale Geschwindigkeit bezeichnet, und U_∞ die Anströmgeschwindigkeit,

- maximale Abweichung der Strömungsachse von der Kanalachse (mit Anstellwinkel α und Schiebewinkel β)

$$\alpha, \beta \leq \pm 0,2^\circ. \quad (2.2)$$

Hucho [8] und Katz [10] beispielsweise stellen fest, dass bereits geringe Abweichungen von Anstell- und Schiebewinkel zu teils erheblichen Änderungen der Auftriebs- sowie der Widerstandsbeiwerte führen.

- gleichmäßige Turbulenz (homogen und isotrop) über den Strahlquerschnitt

$$Tu = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_\infty} \leq 0,5\% \quad (2.3)$$

Darüber hinaus darf die Strömung in der Düse in keinem Betriebszustand ablösen. Diese Forderungen können durch entsprechende Anpassungen von Querschnitt, Kontraktionsverhältnis und Düsenlänge erreicht werden.



(a)



(b)

Bild 2.2: (a): Düse des 2 m-Windkanales am ISW; (b): Seiferth-Flügel

2.1.2.2 Messstrecke

Die Messstrecke ist jener Bereich des Windkanales, in dem sich das Modell befindet. Zu unterscheiden sind zwei fundamentale Ausführungen. Die geschlossene Messstrecke ist an allen Seiten mit Wänden eingeschlossen, während die einzige Abgrenzung der offenen Messstrecke der Boden ist (deshalb auch $\frac{3}{4}$ -offene Messstrecke). Bild 2.2 zeigt die $\frac{3}{4}$ -offene-Messstrecke des 2m-Windkanales am ISW. Diese Unterschiede wirken

sich unterschiedlich auf die Strömung aus. In Bild 2.3 sind die Stromlinien um einen stumpfen Körper für beide Varianten dargestellt. In Teilbild (a) (geschlossene Messstrecke) verengt sich der Strahl und die Strömung wird beschleunigt. In der offenen Messstrecke (Teilbild (b)) tritt genau das Gegenteil ein. Aufgrund der Querschnittserweiterung verringert sich die Strömungsgeschwindigkeit. Beide Ausführungen verfälschen im Vergleich zur Realität die Messergebnisse, da der Raum um das Fahrzeug als unendlich anzusehen ist. Zur Minderung dieser Störungen wurden optimierte Wandformen (z. B. stromlinienförmig, verstellbar, geschlitzt, etc) entworfen.

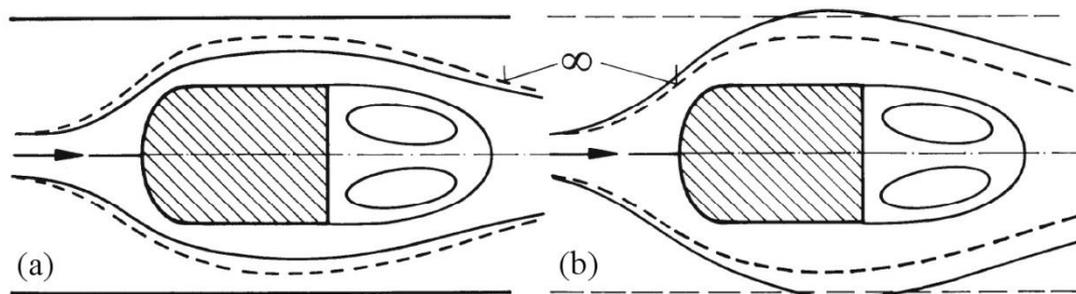


Bild 2.3: Einfluss der Strahlberandung (a): Stromlinien bei geschlossener Messstrecke; (b): Stromlinien bei offener Messstrecke; aus [9]

Eine gangbare Möglichkeit, um den Einfluss der Messstreckenbegrenzung klein zu halten, ist die Einhaltung eines entsprechenden Versperrungsverhältnisses. Die Versperrung φ ist definiert mit $\varphi = A / A_N$ mit der Fahrzeugstirnfläche A und der Düsenaustrittsfläche A_N . Erfahrungen haben gezeigt, dass die Versperrung nicht größer als $\varphi = 10(20)\%$ sein sollte, wobei die Realisierung des größeren Wertes bereits besonderer Maßnahmen zur Korrektur bedarf (vgl. [8]).

2.1.2.3 Kollektor

Nach der Messstrecke muss die Strömung wieder so in den Rücklauf geführt werden, dass die Umströmung des Modells stromaufwärts möglichst wenig beeinflusst wird. Dazu wird ein Auffangtrichter verwendet, der sogenannte Kollektor. Die Öffnung des Kollektors ist so anzupassen, dass der statische Druck längs der Strahlachse im hinteren Bereich möglichst konstant ist. Durch die Wechselwirkung des Freistrahls mit der Umgebung (Scherschicht) entstehen schlauchartige Wirbel um den Strahl, die beim Auftreffen auf den Kollektorrand den Strahl „zerdrücken“ und so zu sogenannten Pumpschwingungen führen können. Eventuell zu viel in den Kollektor eintretende Luft kann außerdem zum „Umkehren“ gezwungen werden, was ähnliche Auswirkungen haben kann. Zum einen verfälschen diese Vorgänge Druck- und Kraftmessungen, zum anderen werden durch akustische Resonanz Schallmessungen beeinträchtigt. Abhilfe schaffen hier ein günstig geformter Kollektormund sowie Öffnungen in den Wänden

des Kollektors (siehe Bild 2.4). Die effektivste Methode ist aber, das Entstehen der Scherschicht a priori zu verhindern. Dazu werden sogenannte Seiferth-Flügel (siehe Bild 2.2) am Düsenaustritt montiert. Diese Maßnahmen sind so aufeinander abzustimmen, dass der statische Druck entlang der Messstrecke konstant bleibt und möglichst dem Druck der Umgebung entspricht.



Bild 2.4: Kollektor des 2m-Windkanales am ISW; gut zu erkennen sind die Öffnungen, aus denen überschüssige Luft entweichen kann, sowie der halbkreisförmige Kollektormund

2.1.3 Methoden zur Geschwindigkeitsmessung

Da das Modell die Strömung und somit die lokale Geschwindigkeitsverteilung im Strahl beeinflusst, ist die Bestimmung der Geschwindigkeit direkt in der Messstrecke problematisch. Es hat sich als praktisch erwiesen, die Strömungsgeschwindigkeit indirekt über den Differenzdruck zwischen Düsenvorkammer und der Düse (Düsenmethode) oder der Umgebung (Plenumsmethode) zu ermitteln. In Bild 2.5 sind die Messpunkte der beiden Messprinzipien dargestellt. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei offenen Messstrecken die Plenumsmethode besser geeignet ist als die Düsenmethode. Der Vorteil liegt darin, dass die Druckmessstellen vom Modell unbeeinflusst bleiben. Bei der Düsenmethode konnte eine Abhängigkeit der Druckverteilung von der Fahrzeugposition in der Messstrecke nachgewiesen werden, (vgl. [4]).

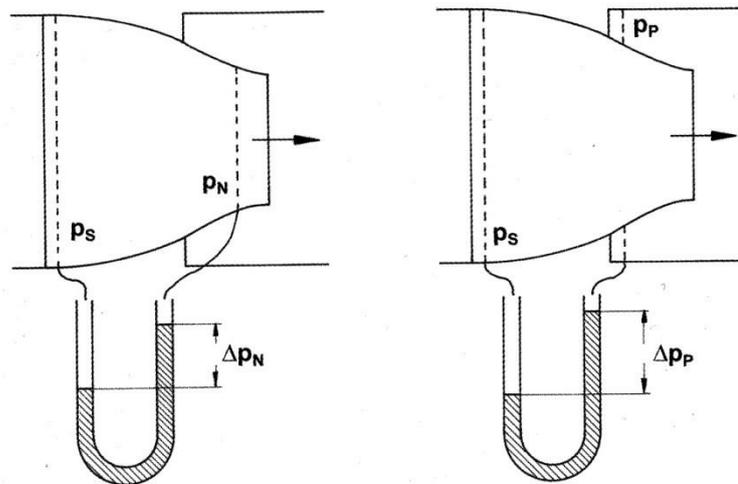


Bild 2.5: Methoden zur Geschwindigkeitsmessung in der Messstrecke; aus [8]

Stellt man die Bernoulligleichung für einen Stromfaden aus der Düsenvorkammer (DVK) bis zur Messstrecke auf und beachtet, dass in dieser der Umgebungsdruck p_∞ herrscht, folgt:

$$p_{DVK} + \frac{\rho}{2} U_{DVK}^2 = p_\infty + \frac{\rho}{2} U_\infty^2. \quad (2.4)$$

Nimmt man für die Fläche des Strahlquerschnitts jene des Düsenaustrittsquerschnitts A_N an, folgt mit der Kontinuitätsgleichung:

$$U_{DVK} \cdot A_{DVK} = U_\infty \cdot A_N. \quad (2.5)$$

Aus (2.4) und (2.5) folgt für die Druckdifferenz:

$$p_{DVK} - p_\infty = \frac{\rho}{2} U_\infty^2 \left[1 - \left(\frac{A_N}{A_{DVK}} \right)^2 \right]. \quad (2.6)$$

Für eine idealisierte DVK, in der die Strömung ruht, wird die Querschnittsfläche unendlich groß und somit der Term $(A_N/A_{DVK})^2$ in (2.6) gleich null. Die Tatsache, dass aber eine Strömungsgeschwindigkeit vorhanden ist, wird mit dem Düsenfaktor

$$k = \frac{q_\infty}{p_{DVK} - p_\infty}, \quad (2.7)$$

$$q_\infty = \frac{\rho}{2} U_\infty^2 \quad (2.8)$$

korrigiert, wobei Glg. (2.8) den dynamischen Druck im Strahl beschreibt. Der Düsenfaktor wird experimentell durch entsprechende Kalibrierung ermittelt. Somit sind auch alle zuvor vernachlässigten Strömungsverluste korrekt berücksichtigt. Wird die

Luft zudem als ideales Gas betrachtet, folgt unter Verwendung der Zustandsgleichung idealer Gase (2.9) aus (2.7) und (2.8) für die Strömungsgeschwindigkeit U_∞ :

$$\frac{p}{\rho} = R \cdot T, \text{ mit } p = p_\infty \quad (2.9)$$

$$U_\infty = \sqrt{2RT \cdot k \cdot \left(\frac{p_{DVK}}{p_\infty} - 1 \right)} \quad (2.10)$$

2.2 Der 2m-Windkanal am ISW

Der Windkanal am Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung ist nach Göttinger Bauform ausgeführt und für klassische aerodynamische Versuche konzipiert. Das heißt zur Ermittlung von Kräften und Momenten. Die gesamte Anlage wurde am Institut geplant, konstruiert und gefertigt. In Bild 2.1 ist eine Schnittzeichnung des Windkanales abgebildet.

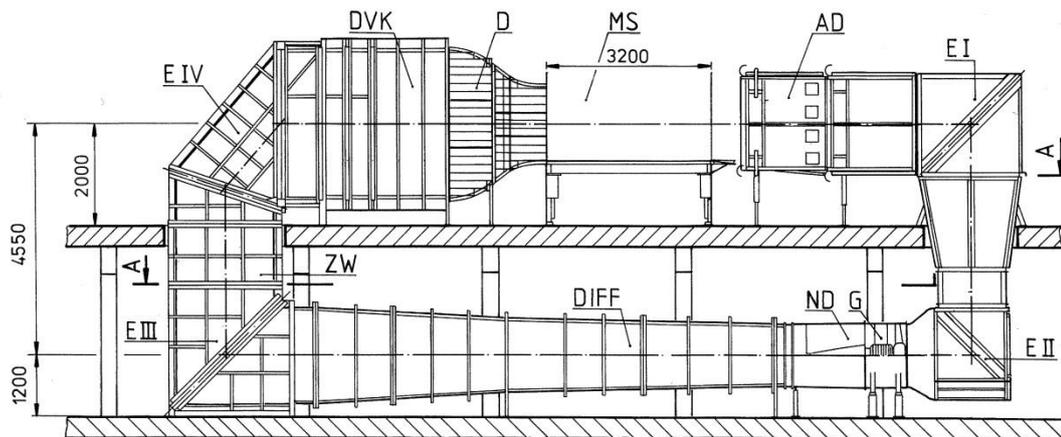


Bild 2.1: 2m-Windkanal am ISW; aus [6]

Wie aus [6] zu entnehmen ist, ist die Düsenvorkammer $3,2\text{ m}$ lang und weist einen Querschnitt von $2,6 \times 2,91\text{ m}$ auf. Zur Beruhigung der Strömung sind vier Turbulenzsiebe in der DVK eingebaut. Die an die Vorkammer anschließende Düse verjüngt sich auf $2 \times 1,46\text{ m}$ wodurch sich ein Kontraktionsverhältnis von $K = 5,58$ und eine Düsenaustrittsfläche von $A_N = 2,92\text{ m}^2$ ergibt. In der Düse befinden sich ein Pt100 Temperaturfühler und ringförmig angeordnete Druckmessstellen. Zudem sind am Austritt die bereits beschriebenen Seiferth-Flügel angebracht (siehe Bild 2.2). Diese Konfiguration ermöglicht eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von rund $41,5\text{ m/s}$, im Dauerbetrieb sind 40 m/s möglich. Bestimmt wird diese nach der Plenumsmethode. Der Antrieb erfolgt mit drei Axialgebläsen mit einer Leistung von

jeweils 50 kW . Bei der Messstrecke handelt es sich um eine $\frac{3}{4}$ -offene Ausführung mit einer Länge von $3,2\text{ m}$. Der Kollektor ist zweiteilig und verstellbar gestaltet, auch hier wurden die in 2.1.2.3 beschriebenen Maßnahmen zur Vermeidung von Pumpschwingungen realisiert. So wird eine maximale Abweichung der Geschwindigkeit vom Mittelwert von deutlich unter 1% erreicht. Der longitudinale Turbulenzgrad wurde im Mittel mit $Tu = 0,13\%$ gemessen. Genauere Informationen sind bei Gretler und Meile [6] nachzulesen.

Die aerodynamischen Kräfte werden mit einer ebenfalls am ISW konstruierten Sechskomponenten-Plattform-Windkanalwaage ermittelt. Die weiteren Messeinrichtungen sowie die entsprechende Datenverarbeitung werden in 5.1 genauer beschrieben.

3 Grundlegende Betrachtungen

3.1 Strömungsmechanische Grundlagen

Im Gebiet der Automobilaerodynamik liegen die erreichten Geschwindigkeiten – auch bei Rennfahrzeugen – meist unter $u = 100 \text{ m/s} = 360 \text{ km/h}$ und somit deutlich unter der Schallgeschwindigkeit a von Luft, $a = 340 \text{ m/s}$. Das Verhältnis der lokalen Strömungsgeschwindigkeit u zur Schallgeschwindigkeit a wird als Machzahl Ma bezeichnet:

$$Ma = \frac{u}{a} \quad (3.1)$$

Sind in Strömungen die Machzahlen kleiner als $Ma \approx 0,3$, kann die Strömung als inkompressibel betrachtet werden. Das heißt, die auftretenden Änderungen von Druck und Temperatur sind so gering, dass die entsprechenden Dichteänderungen vernachlässigt werden können. Wie bereits erwähnt ist das für die Fahrzeugaerodynamik der Fall. Einzig bei Versuchen an kleinen Modellen ist dies nicht immer zutreffend. Näheres dazu folgt in Abschnitt 3.2 über Ähnlichkeitsgesetze.

Fluide übertragen, sofern sie in Bewegung sind, aufgrund innerer Reibungseffekte Schubspannungen. Experimente haben gezeigt, dass die Größe dieser Spannungen eine Funktion des Geschwindigkeitsgradienten, $\tau = f(\nabla \vec{v})$, ist. Für Schubspannungen τ_{xy} Newtonscher Fluide gilt der Zusammenhang:

$$\tau_{xy} = \mu \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right). \quad (3.2)$$

Der Proportionalitätsfaktor μ wird als dynamische Viskosität oder Scherzähigkeit bezeichnet. Ein Newtonsches Fluid liegt dann vor, wenn dieser Faktor unabhängig vom Geschwindigkeitsgradienten ist. Neben der dynamischen Zähigkeit spricht man noch von der kinematischen Zähigkeit ν , die aus der Division $\nu = \mu/\rho$ hervorgeht. Strömt das Fluid entlang einer Wand, bewegen sich die Fluidteilchen direkt an der Wand aufgrund der Haftbedingung nicht. Der Term dv/dx in der Klammer von Glg. (3.2) wird null, und es folgt für die Wandschubspannung ($y = 0$):

$$\tau_w = \mu \left. \frac{du}{dy} \right|_w \quad (3.3)$$

Die Geschwindigkeit steigt mit zunehmender Entfernung von der Wand an, bis sie den Wert der ungestörten Außenströmung erreicht hat. Daraus resultiert ein charakteristisches Geschwindigkeitsprofil. Näheres über Grenzschichten folgt in Abschnitt 3.1.2.

Ein Phänomen, das bei Strömungsproblemen auftritt ist die Turbulenz. Bei vielen technischen Strömungsproblemen handelt es sich um turbulente Strömungen. Im Gegensatz zur Schichtenströmung treten in turbulenten Strömungen stochastische Querbewegungen in allen Richtungen auf. Aufgrund dieser Schwankungen erfolgt ein Energietransport in Richtung der Wände, wodurch das Geschwindigkeitsprofil deutlich völliger wird (vgl. Bild 3.1). Dies bedingt auch einen größeren Geschwindigkeitsgradienten an der Wand als bei laminarer Strömung, und daraus resultiert nach Glg. (3.2) ein Anstieg der Schubspannungen in Wandnähe. Dies wiederum bedingt eine größere Reibungskraft und damit höheren Widerstand (vgl. Abschnitt 3.1.1).

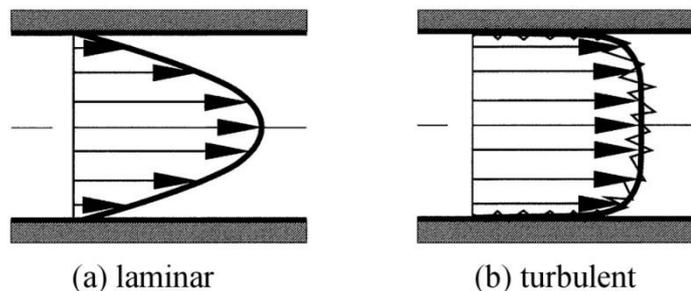


Bild 3.1: Geschwindigkeitsprofil einer laminaren (a) und turbulenten (b) Rohrströmung; aus [13]

Der Umschlag von laminarer zu turbulenter Strömung (Transition) wird maßgeblich vom Verhältnis zwischen Trägheits- und Zähigkeitskräften bestimmt. Dies wird durch die sogenannte Reynoldszahl Re zum Ausdruck gebracht:

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (3.4)$$

wobei U und L eine charakteristische Geschwindigkeit bzw. Länge des Strömungsproblems darstellen. Kleine Störungen in der Strömung bewirken den Beginn der Transition. In Strömungen mit kleinen Reynoldszahlen dominieren die Zähigkeitskräfte und dämpfen diese Störungen, die Strömung bleibt laminar. Steigt die Reynoldszahl, reicht die Dämpfung nicht mehr aus und es kommt zum Übergang in die turbulente Strömung. (vgl. [13]).

Der Turbulenzgrad Tu gilt als Maß für die Turbulenzintensität und kann allgemein angegeben werden wie folgt:

$$Tu = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}}{U_\infty} \quad (3.5)$$

Sind die Schwankungsgeschwindigkeiten in alle Richtungen gleich – $\overline{u'} = \overline{v'} = \overline{w'}$ – spricht man von isotroper Turbulenz. Dafür folgt:

$$Tu_{is} = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_\infty}. \quad (3.6)$$

Als homogene Turbulenz wird eine Strömung bezeichnet, an der an jeder Stelle der gleiche Turbulenzgrad herrscht. Wie in Abschnitt 2.1.2.1 bereits erwähnt, ist in Windkanälen eine homogene und isotrope Turbulenz erwünscht, die möglichst klein ist. (vgl. [9])

3.1.1 Aerodynamische Kräfte und Momente

Bei der Umströmung eines Körpers wirken auf diesen der Druck p , aufgeprägt von der äußeren Strömung, und die Wandschubspannung τ_w . Auch die resultierenden Kräfte werden in Druck- und, den durch die Wandschubspannung verursachten, Reibungswiderstand unterteilt. Der gesamte Widerstand W ergibt sich aus der Summe der Projektionen dieser Kräfte auf die Richtung der Anströmung:

$$W = W_R + W_P \quad (3.7)$$

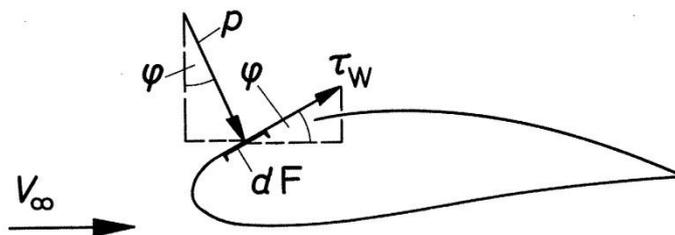


Bild 3.2: Druck p und Wandschubspannung τ_w bei Umströmung eines Tragflügels; aus [8]

Für den Reibungswiderstand W_R und den Druckwiderstand W_P gelten somit folgende Zusammenhänge:

$$W_R = \oint \tau_w \cos \varphi \cdot dO \quad (3.8)$$

$$W_P = \oint p \sin \varphi \cdot dO \quad (3.9)$$

Mit der Unterscheidung zwischen schlanken und stumpfen Körpern kann die Art des Strömungswiderstandes abgeschätzt werden. Die Abgrenzung zwischen stumpf und schlank ist allerdings nicht genau definiert, kann aber nach verschiedenen Gesichtspunkten eingengt werden. Hucho [9] kreist den Begriff anhand der Geometrie, des Strömungsbildes um den Körper, der wirkenden Kräfte und der Wirkung des Körpers auf sein Umfeld ein. Die Geometrie wird charakterisiert anhand des Schlankheitsgrads λ :

$$\lambda = \frac{L}{D}. \tag{3.10}$$

Stumpfe Körper weisen im Vergleich zur Länge eine große Dicke auf. Für schlanke Formen gilt das Gegenteil. Das Strömungsbild wird durch die wirkenden Kräfte bestimmt. Strömungen um stumpfe Körper sind geprägt von Ablösungen. Es entsteht ein Totwasser, das zu großem Druckwiderstand führt. Bei schlanken Körpern hingegen bildet sich ein Nachlauf aus, die Druckkräfte sind wesentlich geringer, und somit ist die Reibungskraft für den Großteil des Widerstands verantwortlich. Weitere Einzelheiten dazu folgen in Abschnitt 3.1.3. Die letzte Möglichkeit zur Unterscheidung stellt der Einfluss auf die Umgebung dar. Ein stumpfer Körper übt sehr viel mehr Einfluss auf seine Umwelt aus als ein schlanker. So wird beispielsweise ein Zug als stumpf bezeichnet obwohl seine Längenmaße viel größer sind als die Breite.

Wie stark sich die Form auf die Art des Widerstands auswirkt zeigt Bild 3.3. Es sei noch angemerkt, dass der Druckwiderstand im Vergleich zum Reibungswiderstand verhältnismäßig groß ist.

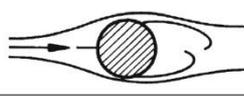
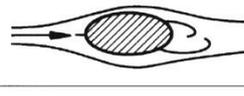
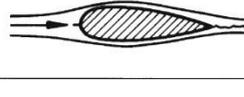
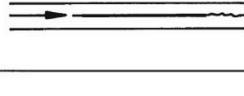
| Körper | Widerstand | |
|---|------------|---------|
| | Druck | Reibung |
|  | 100% | 0% |
|  | 90% | 10% |
|  | 60% | 40% |
|  | 10% | 90% |
|  | 0% | 100% |

Bild 3.3: Widerstandsanteile bei stumpfen und schlanken Körpern; aus [9]

Der Unterschied zwischen schlanken und stumpfen Körpern spiegelt sich auch in der Wahl des Koordinatensystems wieder. In der Regel werden die resultierenden Kräfte schlanker Körper in einem windfesten Koordinatensystem zerlegt, für stumpfe hingegen in einem körperfesten Koordinatensystem. In Bild 3.4 sind beide Möglichkeiten gegenübergestellt.

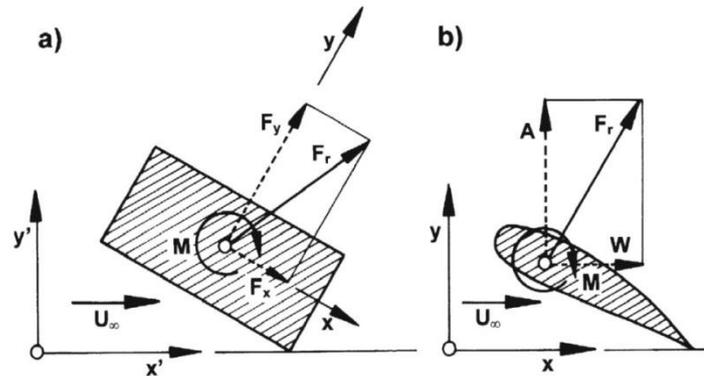


Bild 3.4: Arten der Zerlegung resultierender Kräfte (a): körperfestes Koordinatensystem; (b): windfestes Koordinatensystem; aus [9]

In der Automobilaerodynamik hat man es, bis auf wenige Ausnahmen, größtenteils mit stumpfen Körpern zu tun. Aus diesem Grund wird auf eine genauere Darstellung der windfesten Zerlegung verzichtet, zumal auch bei schlanken Fahrzeugen ein modellfestes Koordinatensystem angewendet wird. In Bild 3.5 sind die wirkenden Kräfte und Momente sowie die entsprechenden Koordinatensysteme, wie sie in der Fahrzeugaerodynamik üblich sind, dargestellt. Es ist auch zu erkennen, dass für Kräfte und Momente unterschiedliche Koordinatensysteme verwendet werden.

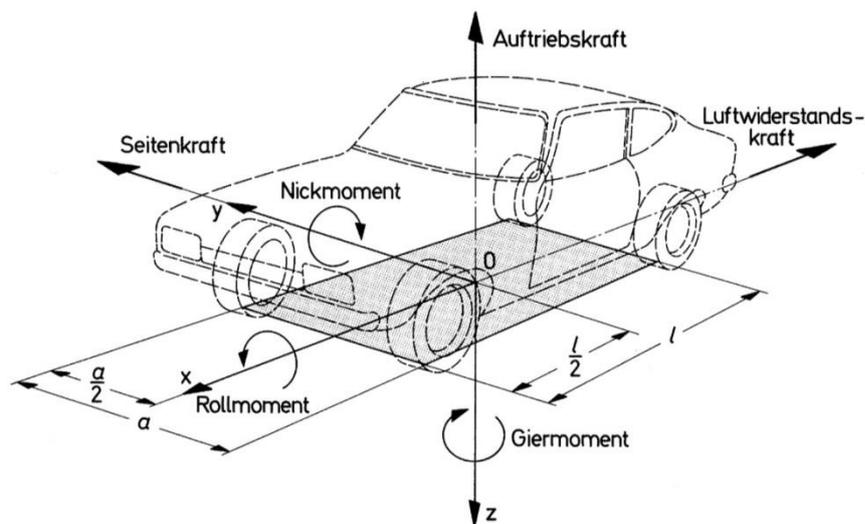


Bild 3.5: Übliche Koordinatensysteme für Kraftfahrzeuge; aus [7]

Die resultierenden Kräfte werden zerlegt in (Luft-) Widerstand W , Auftrieb A und Seitenkraft S , die Momente in Rollmoment M_r , Nickmoment M_n und Giermoment M_g .

Ursprung beider Systeme ist meist die Mitte des Radstandes sowie der Spurweite. Um Strömungen zu beschreiben bedient man sich in der Regel dimensionsloser Darstellungen, so auch in diesem Fall. Bezogen werden die Beiwerte auf den dynamischen Druck der ungestörten Anströmung und auf eine charakteristische Fläche bzw. bei Momenten zusätzlich einer charakteristische Länge. Als Fläche dient durchwegs die bei gerader Anströmung projizierte Stirnfläche, wobei diese Fläche auch als Bezug bei schräger Anströmung verwendet wird. Für die charakteristische Länge in den Momentenbeiwerten wird die Fahrzeuglänge oder der Radstand eingesetzt. Demnach lauten die Kraftbeiwerte:

$$c_W = \frac{W}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 A_{pr}}, \quad (3.11)$$

$$c_A = \frac{A}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 A_{pr}}, \quad (3.12)$$

$$c_S = \frac{S}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 A_{pr}}, \quad (3.13)$$

und die Beiwerte der Momente:

$$c_{mr} = \frac{M_r}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 A_{pr} L}, \quad (3.14)$$

$$c_{mg} = \frac{M_g}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 A_{pr} L}, \quad (3.15)$$

$$c_{mn} = \frac{M_n}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 A_{pr} L}. \quad (3.16)$$

Bereits erwähnt wurde, dass es sich bei Automobilen durchwegs um stumpfe Körper handelt, bei denen der Druckwiderstand überwiegt. Aber nicht nur für den Widerstand sondern auch für den Auftrieb ist die genaue Druckverteilung von besonderem Interesse. Der Differenzdruck zwischen lokalem Druck p und Umgebungsdruck p_∞ , bezogen wiederum auf den dynamischen Druck der ungestörten Anströmung, ergibt den Druckbeiwert c_p :

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2} \quad (3.17)$$

3.1.2 Grenzschichten

Technische Strömungen sind durchwegs mit hohen Reynoldszahlen verbunden. Dadurch erreicht man mit der Annahme der Reibungsfreiheit eine bereits gute Näherung. In der Nähe von Wänden versagt diese Vereinfachung allerdings, hier sind die Zähigkeitskräfte von der Größenordnung der Trägheitskräfte und somit nicht mehr vernachlässigbar. In Grenzschichten (GS) können, wie in Strömungen ohne Wandeinfluss, ebenso laminare und turbulente Strömungsformen auftreten (vgl. [17])

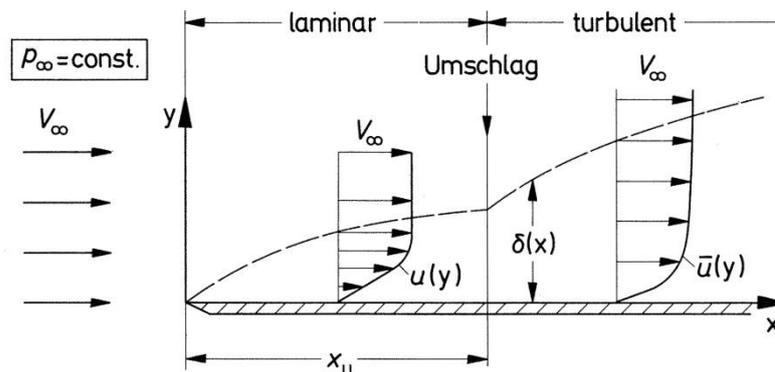


Bild 3.6: Grenzschicht an ebener Platte; aus [7]

Bild 3.6 zeigt die Entwicklung der Grenzschicht an einer parallel angeströmten, ebenen Platte. Darin ist das unterschiedlich starke Anwachsen der laminaren und turbulenten Wandschicht qualitativ zu erkennen, sowie das völligeres Geschwindigkeitsprofil $\bar{u}(y)$ in turbulenten Grenzschichten. Im Allgemeinen ist die Grenzschicht umso dünner, je größer die Reynoldszahl ist, und wird mit der Lauflänge zusehends dicker, zu sehen in Glg. (3.18). Für die Grenzschichtdicke δ in laminarer Strömung kann nach einer Größenordnungsabschätzung folgender Zusammenhang gefunden werden:

$$\delta \sim \sqrt{\frac{\nu L}{U_\infty}} \quad (3.18)$$

und für die turbulente Grenzschicht:

$$\delta \sim \left(\frac{\nu}{U_\infty}\right)^{\frac{1}{5}} \cdot x^{\frac{4}{5}}. \quad (3.19)$$

Der Umschlag von laminarer zu turbulenter GS erfolgt bei einer kritischen Reynoldszahl Re_{krit} die für die ebene Platte nach Schlichting [17] im Bereich zwischen $2 \cdot 10^5 < Re_{krit} < 6 \cdot 10^5$ liegt. Die Grenzschichttheorie nach Prandtl basiert auf der Annahme, dass die Dicke des reibungsbehafteten Bereichs im Vergleich zur Lauflänge sehr klein und die Reynoldszahl entsprechend groß ist:

$$\delta \ll L$$

$$Re \gg 1$$

Mit dieser fundamentalen Einschränkung ist es möglich, aus den Navier-Stokes-Gleichungen die sogenannten Prandtl'schen Grenzschichtgleichungen für den stationären Fall abzuleiten (eine genaue Herleitung dieser Gleichungen findet sich beispielsweise in [17]), wobei hier nur zweidimensionale Strömungen betrachtet sind:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.22)$$

Aus der stark vereinfachten Gleichung für den y-Impuls (Glg. (3.21)) geht hervor, dass sich der Druck p in y-Richtung nicht verändert – er wird von der reibungsfreien Außenströmung aufgeprägt.

Mit diesen Gleichungen ist eine mathematische Beschreibung gegeben und es können dadurch Phänomene wie die Strömungsablösung an ebenen Flächen erklärt werden (siehe Abschnitt 3.1.3).

3.1.3 Strömungsablösung

Grundsätzlich sind im Zusammenhang mit Strömungsablösung drei Begriffe zu unterscheiden, die entsprechende Auswirkungen auf Körper zeigen. Es sind dies die Ablösung aufgrund eines Druckanstiegs entlang einer Körperkontur, der Strömungsabriss an scharfen Kanten und das glatte Abströmen. Der Geschwindigkeitsverlauf in der Grenzschicht für den ersten Fall, das Ablösen, ist in Bild 3.7 dargestellt.

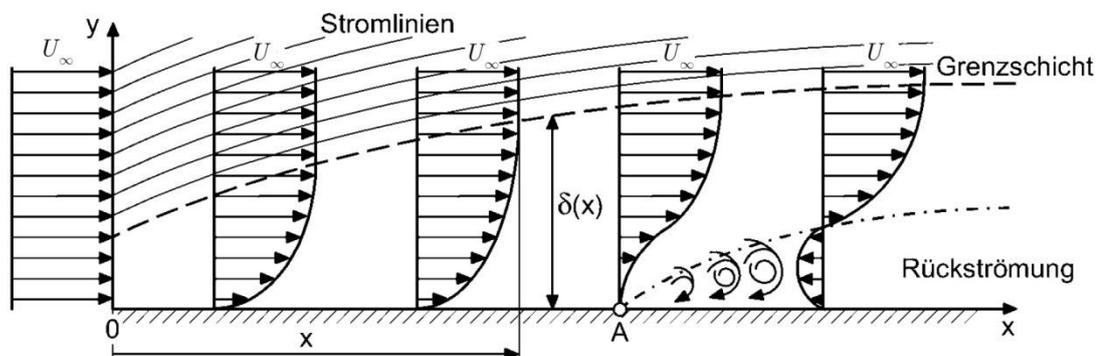


Bild 3.7: Verlauf der Grenzschicht bei Strömung gegen Druckanstieg; angelehnt an [18]

Darin sind drei unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile zu erkennen, wobei das Profil im Punkt A das Grenzprofil, also das Profil, bei dem die Strömung noch gerade nicht ablöst, darstellt. In diesem Punkt verschwinden der Geschwindigkeitsgradient und daraus resultierend auch die Wandschubspannung. Das sind die Bedingungen für eine Ablösung an einer ebenen Platte nach Prandtl:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} = 0 \quad \text{bzw.} \quad \tau_w = 0$$

Werden die Grenzschichtgleichungen (Glg. (3.20) bis (3.22)) hinsichtlich der Krümmung des Geschwindigkeitsprofils ausgewertet, erhält man für einen negativen Druckgradienten $dp/dx < 0$, das heißt eine Strömung mit abfallendem Druck, keinen Wendepunkt im Geschwindigkeitsverlauf – die Strömung liegt an. Für eine Strömung gegen steigenden Druck $dp/dx > 0$ hingegen tritt ein Wendepunkt auf, die Strömung löst ab (Bild 3.7 rechts).

Turbulente Grenzschichten können aufgrund des völligeren Geschwindigkeitsprofils gegen einen wesentlich größeren Druckanstieg strömen ohne abzulösen. Dies kann sogar dazu führen, dass der Gesamtwiderstand mit steigender Reynoldszahl sinkt, obwohl dadurch der Reibungswiderstand steigt. Diesen Umstand macht man sich bei technischen Anwendungen zu Nutze, indem der laminar-turbulente Umschlag mit speziellen Mitteln erzwungen wird, bevor dieser von selbst eintritt. (vgl. [9])

Der Strömungsabriss bezeichnet ein Ablösen an scharfen Kanten der Körperkontur. In diesem Fall kann die Strömung der Körperform trägheitsbedingt nicht mehr folgen. Es kommt zum Ausbilden eines sogenannten Totwassers, in dem Unterdruck gegenüber dem Umgebungsdruck herrscht. Bei Körpern, an denen die Strömung abreißt ist der Druckwiderstand die dominante Widerstandsart. Da das Abreißen an einer definierten Stelle erfolgt, ist auch durchwegs keine Abhängigkeit des Widerstands von der Reynoldszahl gegeben. Bei stumpfen Körpern sind Strömungsabriss die Hauptursache des Widerstands (siehe Bild 3.3).

Beim glatten Abströmen kommt es weder zur Ablösung noch zum Abriss, sondern es fließen zwei Grenzschichten zusammen und es bildet sich ein Nachlauf (Bild 3.8). Abströmen tritt meist bei der Umströmung schlanker Formen wie Tragflügeln (bei geringer Anstellung) auf, deren Widerstand von der Reibung geprägt ist.

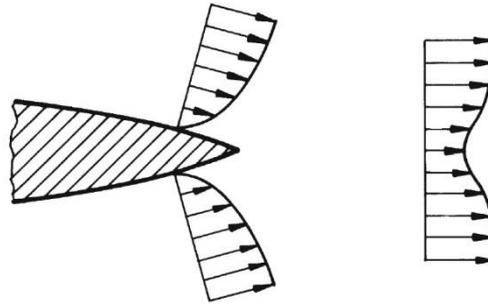


Bild 3.8: Abströmen und Nachlauf an einem schlanken Körper; aus [9]

3.2 Ähnlichkeitsgesetze

Führt man Experimente an verkleinerten Modellen durch, muss gewährleistet werden, dass sich die Strömung um das Modell gleich verhält wie um die Originalausführung. Dazu müssen geometrische, dynamische und kinematische Ähnlichkeit gegeben sein. Um die geometrische Ähnlichkeit zu erfüllen, muss die Abbildung im detailgetreuen Maßstab eingehalten werden. Die kinematische Ähnlichkeit ist gegeben, wenn sich die Stromlinienbilder gleichen, und die dynamische, wenn die auftretenden Kräfte im gleichen Verhältnis stehen. Charakterisiert werden diese Eigenschaften durch dimensionslose Kennzahlen, die die wirkenden Kräfte zueinander ins Verhältnis setzen. Die Bildung dieser Kenngrößen erfolgt anhand problemrelevanter, charakteristischer Größen. Werden Modellversuche durchgeführt, müssen die dafür relevanten Kennzahlen am Modell gleich jenen der Großausführung sein und darüber hinaus sind diese mit den gleichen charakteristischen Größen zu bilden. Im Folgenden werden die relevanten Kenngrößen angegeben, wobei gesagt werden muss, dass im allgemeinen Fall noch weitere Größen existieren. Dabei bezeichnen U und L eine charakteristische Geschwindigkeit bzw. eine charakteristischen Länge. In der Fahrzeugaerodynamik handelt es sich dabei meist um die Anströmgeschwindigkeit und um die Fahrzeuglänge. Mitunter wird aber auch der Radstand als charakteristische Längenabmessung herangezogen.

Reynoldszahl Re :

$$Re = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Zähigkeitskraft}} \qquad Re = \frac{UL}{\nu} \qquad (3.23)$$

Froudezahl Fr :

$$Fr = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Schwerkraft}} \qquad Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \qquad (3.24)$$

Machzahl Ma :

$$Ma = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{elastische Kraft}} \qquad Ma = \frac{U}{a} \qquad (3.25)$$

Eulerzahl Eu :

$$Eu = \frac{\text{Druckkraft}}{\text{Trägheitskraft}} \qquad Eu = \frac{p}{\rho U^2} \qquad (3.26)$$

Strouhalzahl Sr :

$$Sr = \frac{\text{lokale Trägheitskraft}}{\text{konvektive Trägheitskraft}} \qquad Sr = \frac{fL}{U} \qquad (3.27)$$

mit der charakteristischen Frequenz f , meist die Wirbelablösefrequenz f_w .

Die Einhaltung der Gleichheit aller relevanten Kennzahlen ist im Allgemeinen nicht möglich. Deshalb wird versucht, zumindest die für das Strömungsproblem essentiellen Ähnlichkeiten einzuhalten. Im Falle von Versuchen mit inkompressiblen Medien, von dem bei Versuchen in der Automobilaerodynamik ausgegangen wird (vgl. 3.1), ist im Wesentlichen die Übereinstimmung der Reynoldszahlen maßgebend:

$$Re_{Original} = Re_{Modell}$$

$$\left(\frac{UL}{\nu} \right)_{Original} = \left(\frac{UL}{\nu} \right)_{Modell}$$

In der Regel wird in Windkanälen mit dem gleichen Medium wie im Original, nämlich Luft, gearbeitet. Das heißt, die kinematische Zähigkeit ν ändert sich nicht und die benötigte Anströmgeschwindigkeit im Modellversuch beträgt:

$$U_{Modell} = U_{Original} \cdot \frac{L_{Original}}{L_{Modell}}. \qquad (3.28)$$

Daraus wird ersichtlich, dass bei kleinen Modellmaßstäben die geforderte Strömungsgeschwindigkeit groß wird. Das kann zu Problemen führen, da diese Geschwindigkeiten in Windkanälen oft nicht mehr erreicht werden können oder aber der Einfluss der Dichte wird tragend. Somit könnte nicht mehr von einer inkompressiblen Strömung ausgegangen werden und die Machzahl muss berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit, die Reynolds-Ähnlichkeit bei kleinen Modellen trotzdem einzuhalten ist, den Modellversuch mit einem anderen Medium mit geringerer kinematischer Viskosität durchzuführen.

3.3 Strömungsbild am bewegten Fahrzeug

Werden Windkanalversuche durchgeführt, müssen die realen Strömungsverhältnisse möglichst genau nachgebildet werden. Dafür ist es aber notwendig, diese zu kennen und Konzepte für deren Nachbildung zu entwickeln. Neben den bereits beschriebenen Einschränkungen in Windkanälen (vgl. Abschnitt 2.1) sowie den einzuhaltenden Ähnlichkeitsgesetzen (vgl. Abschnitt 3.2) wird hier auf die Besonderheiten der Fahrzeugumströmung unter realen Bedingungen eingegangen. In diesem Zusammenhang sind besonders das Geschwindigkeitsprofil unter dem Fahrzeug zu erwähnen sowie die Umströmung der Räder.

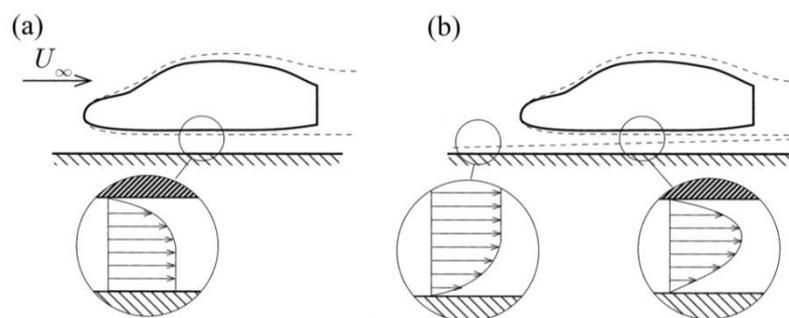


Bild 3.9: Geschwindigkeitsprofil am (a) realen Fahrzeug und (b) im Windkanal; aus [10]

In der Realität bewegt sich das Fahrzeug durch die annähernd ruhende Luft, es findet somit eine Relativbewegung zwischen Automobil und Fahrbahn statt. Es bildet sich keine charakteristische Grenzschicht am Boden (Straße) aus, zu sehen in Bild 3.9 (a). Es gilt zu beachten, dass sich in diesem Teilbild das Bezugssystem des Betrachters mit dem Fahrzeug bewegt. Dadurch erscheint es, als stehe das Automobil still und die Fahrbahn bewegt sich. Im Windkanal findet ohne entsprechende Vorkehrung diese Relativbewegung nicht statt, was zum Geschwindigkeitsprofil in (b) führt. Da die Luftströmung an den Windkanalkomponenten anliegt, bildet sich eine Grenzschicht aus, die nach Glg. (3.18) stetig anwächst und somit Einfluss auf Messungen ausübt. Besonders große Fehler treten auf, wenn es sich um Versuche an kleinen Modellen handelt oder bei Rennfahrzeugen mit sehr geringer Bodenfreiheit. In diesen Fällen kann es vorkommen, dass das Modell in die Grenzschicht eintaucht und dadurch eine verfälschte Anströmung entsteht. Dies kann die resultierenden Kräfte, besonders den Auftrieb, erheblich beeinflussen. Bearman et al. [1] haben den Einfluss der Bodensimulation an einem generischen Fahrzeugmodell mit variablem Heckdiffusor untersucht. Die Fahrbahn wurde mit einem Laufband dargestellt, die Ergebnisse sind in Bild 3.10 angeführt. Daraus geht hervor, dass besonders der Auftrieb durch die Bodengrenzschicht stark verändert wird.

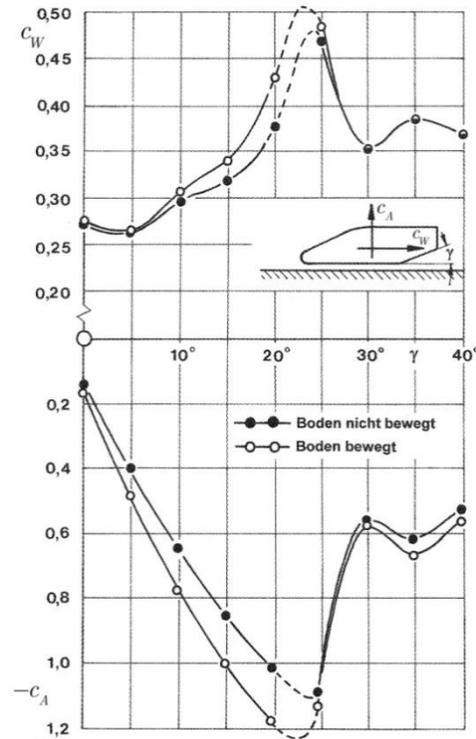


Bild 3.10: Widerstands- und Auftriebsbeiwert mit und ohne Bodensimulation; aus [8]

Neben der Simulation der Fahrbahn ist auch der Strömung um die Räder Aufmerksamkeit zu schenken. Durch die für die Messung mit der Windkanalwaage notwendige Entkoppelung von Modell und Fahrbahn entsteht ein Spalt unter den Rädern. Dieser durchströmte Spalt bewirkt eine Saugspitze und verursacht dadurch negativen Auftrieb (Abtrieb). Je kleiner dieser Spalt ist, desto stärker ausgeprägt ist diese Unterdruckspitze (vgl. [8]). Steht das Rad allerdings ohne Abstand auf dem Boden, entsteht vor dem Rad ein Überdruck und dadurch Auftrieb. Einen weiteren Einfluss auf das Auftriebsverhalten stellt die Raddrehung dar. Wie in Bild 3.11 ersichtlich, kann der Unterschied zwischen drehendem und stehendem Rad entscheidend dafür sein, ob am Rad Auf- oder Abtrieb herrscht. Der Widerstandsbeiwert hingegen zeigt nur geringe Abhängigkeit vom Bodenabstand. Außerdem ist auch der Unterschied zwischen stationärem und rotierendem Rad nicht so stark ausgeprägt. Mit sinkendem Bodenabstand nähert sich der Widerstandsbeiwert beider Fälle an, bis praktisch identische Werte auftreten. Ausführliche Untersuchungen zu der Umströmung von Rädern wurden beispielsweise von Cogotti [3] (zitiert in [8]) durchgeführt.

Ein Strömungsbild zu simulieren, das der realen Umströmung eines Fahrzeugs entspricht, erweist sich als aufwendige Herausforderung. Aus dem bereits Genannten geht hervor, dass eine Nachbildung der Fahrbahn genauso unerlässlich erscheint wie die Berücksichtigung der Raddrehung. Hucho [8] räumt der Radsimulation einen besonders

hohen Stellenwert in der Modellversuchstechnik ein. Demnach liegt großes Potential für weitere Luftwiderstandsreduktionen an einer verbesserten Strömung unter dem Fahrzeug und dadurch auch an der Radumströmung. Allerdings wird die Raddrehung bei Modellversuchen meist vernachlässigt.

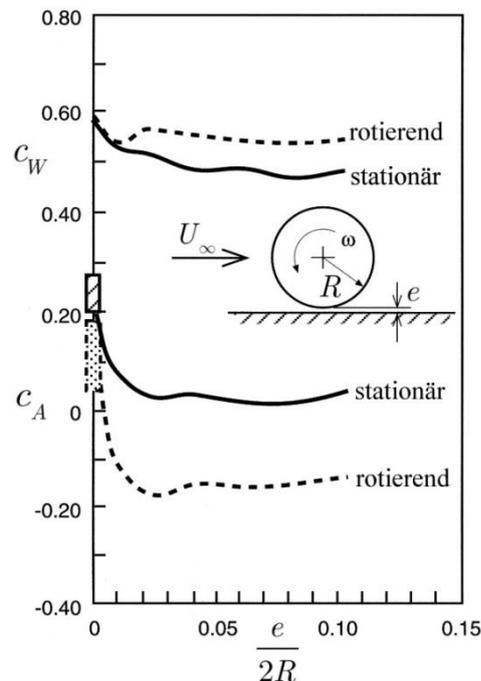


Bild 3.11: Widerstands- und Auftriebsbeiwerte in Abhängigkeit vom Bodenabstand; angelehnt an [10]

Die Raddrehung lässt sich ohne großen technischen Aufwand nicht realisieren. Will man drehende Räder bei Windkanalversuchen berücksichtigen, muss auch nach Bild 3.11 die Abhängigkeit des Bodenabstands beachtet werden. Stehen die Räder still, kann ein Spalt unter diesen einfach mit einem Schaumstoffblock oder mit Papierstreifen geschlossen werden. Aufwändiger ist das bei rotierenden Rädern. Dabei kommen Walzen oder kleine Laufbänder zum Einsatz, an denen der Reifen abrollt und über diese meistens auch in Drehung versetzt wird. Dadurch ist das Fahrzeug bzw. die Windkanalwaage aber nicht mehr von der Messstrecke entkoppelt und die Messungen werden verfälscht. Das heißt, dass die Räder wiederum vom restlichen Fahrzeug abgekoppelt werden müssen. Wie ein moderner Prüfstand aufgebaut sein kann, ist von Potthoff [14] dargestellt.

Der Einfluss der Fahrbahn hingegen kann bereits mit wesentlich einfacheren Mitteln simuliert werden. In Bild 3.12 sind grundlegende Methoden zur Grenzschichtbeeinflussung dargestellt. Ein Manko ist nach Hucho [8] der Umstand, dass sich alle diese Varianten auf die Abbildung des Geschwindigkeitsprofils unter dem Fahrzeug konzentrieren und eine mögliche Änderung des Strömungsfelds an anderen Stellen, besonders im Totwasserbereich, nicht berücksichtigt wird. In Teilbild (a) ist

eine zusätzliche, erhöhte Messstrecke dargestellt. Diese ist über der Grenzschicht der eigentlichen Messstrecke zu installieren, wobei die Position des Modells im vorderen Bereich liegen sollte. Es entwickelt sich zwar eine Grenzschicht, durch die kurze Lauflänge von der Vorderkante bis zum Modell ist diese aber wesentlich dünner als jene auf dem eigentlichen Messstreckenboden. In den Teilbildern (b) bis (d) sind verschiedene Varianten von Ausblasen und Absaugen der Grenzschicht dargestellt.

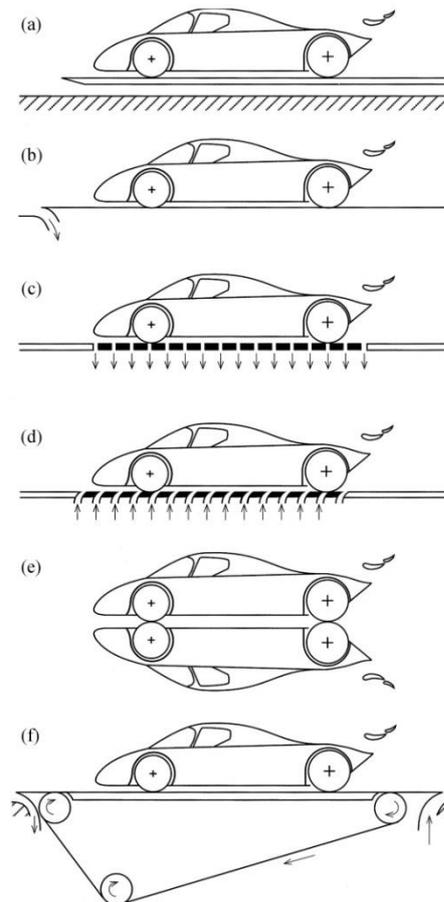


Bild 3.12: Möglichkeiten der Grenzschichtreduktion im Windkanal; (a): erhöhte Bodenplatte; Grenzschichtabsaugung (b) vor und (c) unter Fahrzeug; (d): tangenciales Ausblasen; (e): Spiegeln des Modells; (f): Laufband mit Absaugung und Ausblasen; aus [10]

Eine theoretisch (in reibungsfreier Strömung) perfekte ebene Fläche, dargestellt durch eine ebene Stromfläche, erhält man durch Spiegelung des Modells, siehe Bild 3.12 (e). Durch den Nachteil eines zweiten benötigten Modells sowie das Versagen der Theorie bei zäher Strömung wird diese Variante nicht mehr angewendet. Teilbild (f) zeigt den heutigen Stand der Technik mit einer Kombination aus Laufband, Absaugung und tangentialem Ausblasen. Eine ausführliche Beschreibung aller Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, kann aber in der Literatur nachgeschlagen werden (z.B. bei [8]).

4 Konstruktion Messaufbau

Wie bereits in Abschnitt 3.3 beschrieben, existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Möglichkeiten, die Grenzschicht in der Messstrecke eines Windkanales zu beeinflussen. Einerseits lassen sich nicht alle für den Einsatz in jedem Windkanal adaptieren, andererseits wäre der finanzielle Mehraufwand dafür eventuell nicht zu rechtfertigen. Die Anforderungen an den Versuchsaufbau und dessen Konstruktion werden im folgenden Abschnitt erläutert, wobei nur auf konstruktive Besonderheiten eingegangen wird. Detaillierte Konstruktionszeichnungen sind im Anhang A zu finden.

4.1 Konzeptfindung

4.1.1 Anforderungen an den Messaufbau

Der neue Versuchsaufbau muss folgenden Kriterien entsprechen:

- Die Reduktion der Grenzschicht soll mittels erhöhten Messstreckenbodens realisiert werden.
- Flexible Aufspannmöglichkeiten für gängige Fahrzeugmodelle in einem entsprechenden Modellmaßstab (1 : 4 bis 1 : 5), insbesondere aber für die Modelle des TERA, sind zu realisieren.
- Ausführung einer drehbaren Aufspannung zur Variation des Anströmwinkels von $\beta = \pm 30^\circ$ mit einer Schrittweite von $\Delta\beta = 2,5^\circ$.
- Die Achse der Windkanalwaage soll mit der Fahrzeughochachse möglichst deckungsgleich sein.
- Die Möglichkeit, Modelle an einer zentralen Halterung aufzuspannen muss gegeben sein.
- Der Messaufbau soll möglichst mit den Mitteln der am ISW vorhandenen Werkstätte gefertigt werden.

4.1.2 Bestimmung der Hauptabmessungen

Die äußeren Abmessungen des gesamten Messaufbaus sind im Wesentlichen an die Maße der Windkanalmessstrecke gebunden. Auch dessen Positionierung in der Messstrecke ist weitgehend vorgegeben und wurde, genauso wie die Längen- und

Breitenabmessungen, vom bereits vorhandenen Messaufbau übernommen. Mit dem Ziel deckungsgleicher Hochachsen in z-Richtung von Modell und Windkanalwaage wurden die restlichen Abmessungen bestimmt. Eine weitere Einschränkung stellt der Abstand zur Düse dar. Nach Gretler und Meile [6] ist der statische Druckverlauf längs der Messstrecke ab einem Düsenabstand von einem Meter konstant. Durch die Anforderungen, den Versuchsstand drehbar und dabei variabel bezüglich gängiger Radstand-Spurweiten-Kombinationen zu konstruieren, war das Resultat eine im Vergleich zur vorhandenen Zwischenmessstrecke höhere Ausführung. In Bild 4.1 ist der konstruierte Zwischenboden im Windkanal abgebildet. Die Hauptabmessungen des neu konstruierten Messaufbaus sind Bild 4.2 zu entnehmen.

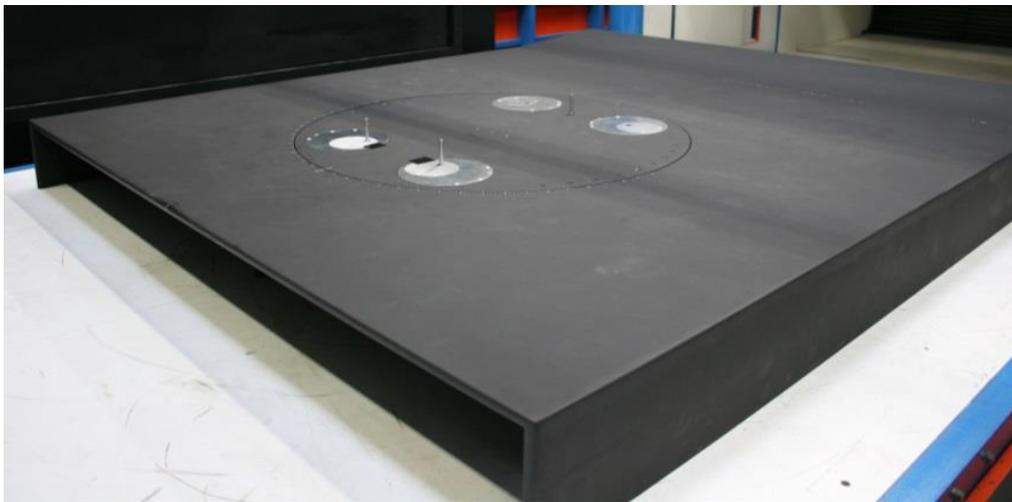


Bild 4.1: Zwischenboden in der Messstrecke des 2m-Windkanales am ISW

Die eigentliche Herausforderung der Konstruktionsarbeit lag an einer einfachen und trotzdem variablen Aufspannungsmöglichkeit. Hauptaugenmerk sollte dabei auf die Kompatibilität des Messaufbaus mit den Modellen des TERA gelegt werden, deren Abmessungen in Tabelle 4.1 aufgelistet sind.

Tabelle 4.1: Abmessungen der TERA-Modelle Fennek und Panther

| Hersteller | Modell | Originalmaße | | Maßstab | Modellmaße | |
|------------|---------|-----------------------------|-------------------|---------|---------------------------|-------------------|
| | | Spurweite in mm | Radstand in mm | | Spurweite in mm | Radstand in mm |
| TERA | FENNEK | 540 | 1600 | 1 : 2 | 270 | 800 |
| | PANTHER | vorne: 1060 hinten: 1036 | 2000 | 1 : 3 | vorne: 353 hinten: 345 | 667 |

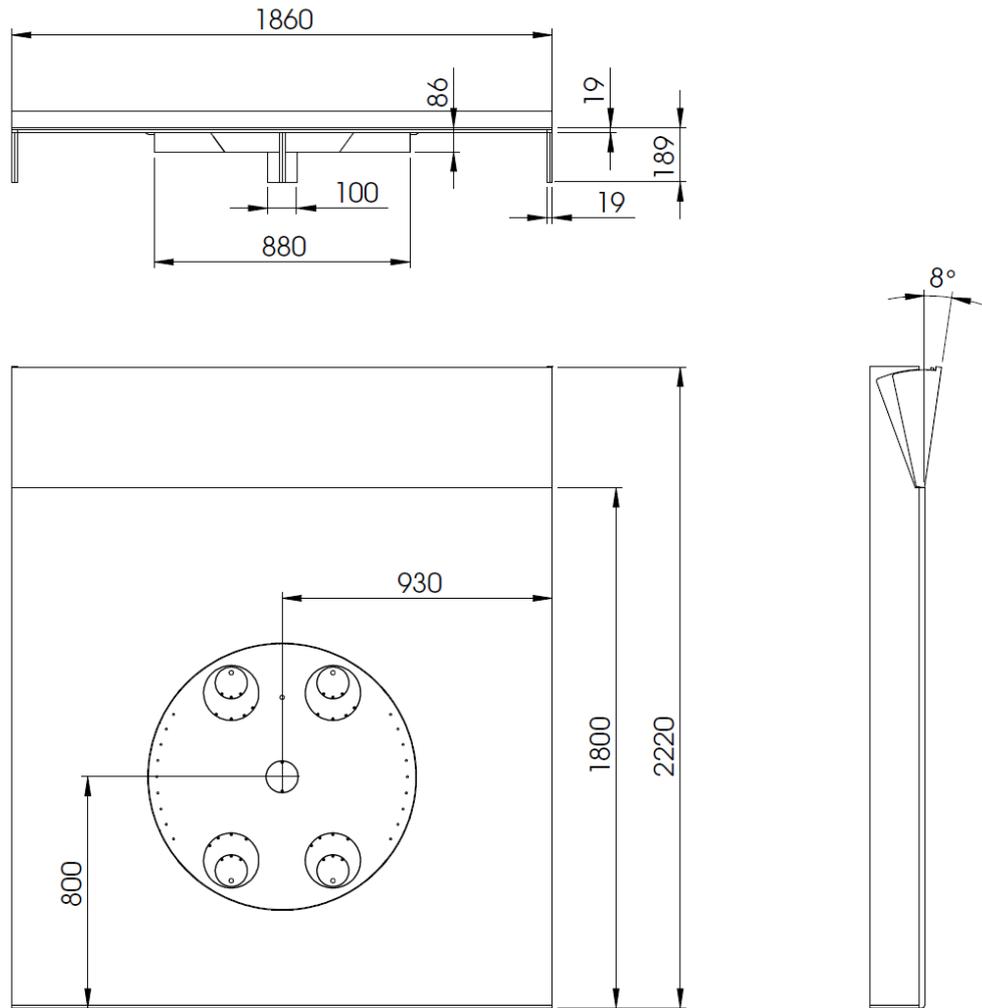


Bild 4.2: Festgelegte Hauptabmessungen (in mm) des neuen Messaufbaus

Um Windkanalexperimente mit einer möglichst großen Bandbreite unterschiedlicher Fahrzeugmodelle abdecken zu können, wurden die üblichen Fahrzeugabmessungen verschiedener Fahrzeugtypen und Hersteller erhoben. Diese Abmessungen wurden im Anschluss auf windkanaltypische Modellgrößen (Maßstab 1 : 4 bzw. 1 : 5) umgerechnet und sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.2: Original- und Modellabmessungen unterschiedlicher Fahrzeugtypen

| Hersteller | Modell | Originalmaße | | Maßstab 1 : 4 | | Maßstab 1 : 5 | |
|------------|----------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| | | Spurweite in mm | Radstand in mm | Spurweite in mm | Radstand in mm | Spurweite in mm | Radstand in mm |
| Audi | A8 | 1644 | 3122 | 411 | 781 | 329 | 624 |
| | Q7 | 1681 | 3002 | 420 | 751 | 336 | 600 |
| | A1 | 1471 | 2469 | 368 | 617 | 294 | 494 |
| BMW | 520d | 1600 | 2968 | 400 | 742 | 320 | 594 |
| | Z4 | 1559 | 2496 | 390 | 624 | 312 | 499 |
| | X5 | 1650 | 2933 | 413 | 733 | 330 | 587 |
| VW | Multivan | 1628 | 3000 | 407 | 750 | 326 | 600 |
| Toyota | iQ | 1460 | 2000 | 365 | 500 | 292 | 400 |
| Smart | fortwo | 1283 | 1867 | 321 | 467 | 257 | 373 |
| Mini | one | 1467 | 2467 | 367 | 617 | 293 | 493 |
| Ferrari | F12 | 1665 | 2720 | 416 | 680 | 333 | 544 |

Um dem Anspruch der Flexibilität gerecht zu werden, wurde als Lösung eine Konstruktion gewählt, die auf der Verdrehung zweier exzentrisch ineinander gelegten Scheiben basiert. Mit diesem einfachen Prinzip lassen sich innerhalb eines festgelegten Bereichs nahezu alle möglichen Konfigurationen realisieren. Der entsprechende Einstellbereich wurde anhand der Daten aus den Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 ausgewählt. In Bild 4.3 (a) sind die Spurweiten-Radstand-Kombinationen der Fahrzeuge aus den oben angeführten Tabellen dargestellt. Der Kreismittelpunkt entspricht dabei dem Ursprung der Fahrzeugkoordinaten und liegt auf der vertikalen Achse der Windkanalwaage. Der Einstellbereich - innerhalb der voll durchgezogenen Linie - wurde so gewählt, dass jedes Fahrzeug durch zumindest einen Modellmaßstab abgedeckt ist. Daraus folgt die Größe der eingelegten Scheiben - dargestellt als strichlierte Kreise - und in weiterer Folge die Größe der gesamten Drehscheibe (Teilbild (b)). Ferner zeigt Bild 4.3 (b) die Öffnung für Aufspannungen mit einem zentralen Stiel sowie die benötigte Bohrung für den Bolzen, auf dem das Hinterrad des Fennek fixiert wird. Die Bild 4.3 (c) und (d) zeigen einerseits den maximalen bzw. minimalen Radstand bei entsprechender Spurweite und andererseits die maximale bzw. minimale Spurweite bei entsprechendem Radstand.

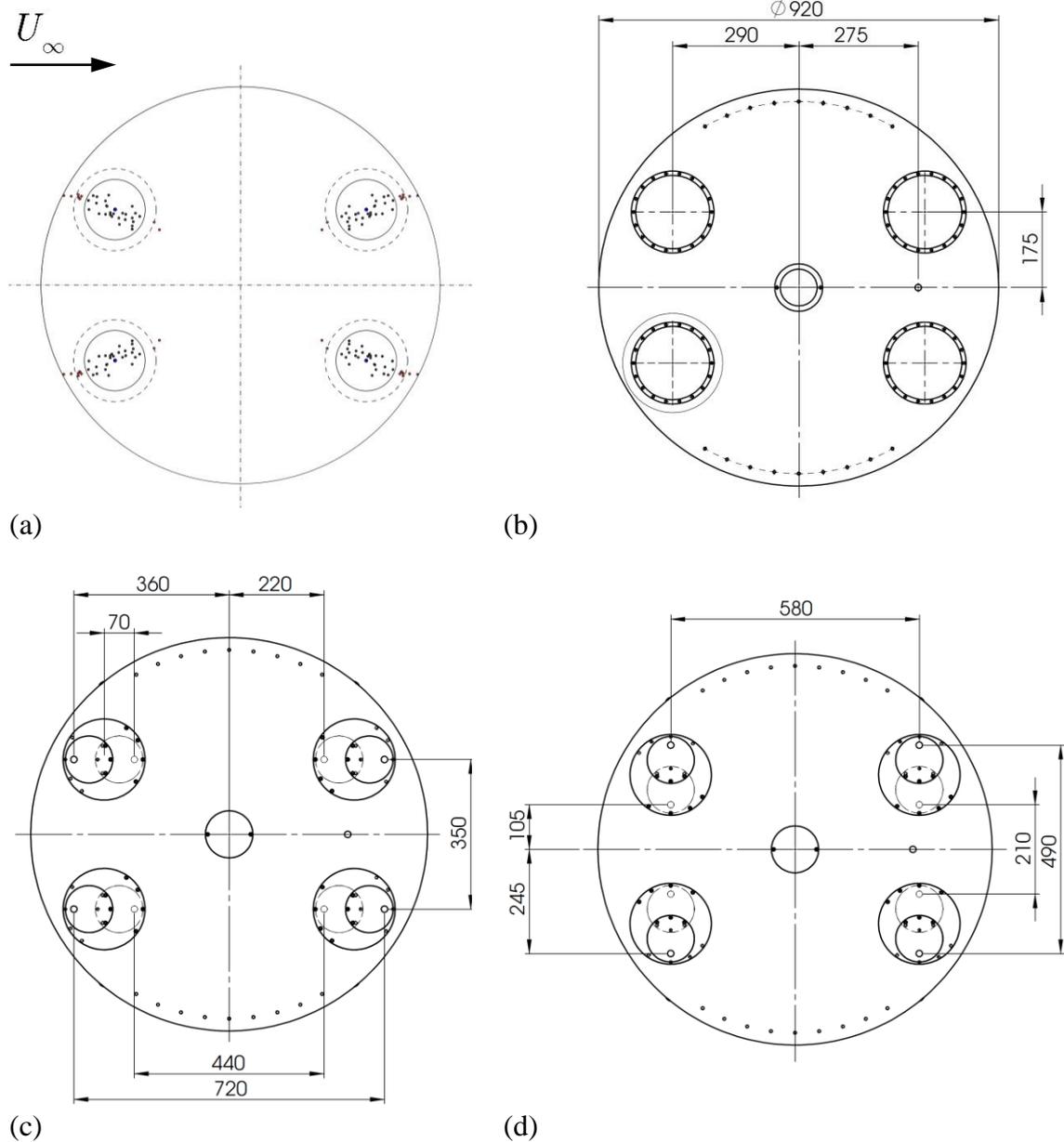


Bild 4.3: (a): Radaufstandspunkte gängiger Fahrzeugtypen im Modellmaßstab; (b): festgelegte Abmessungen der Drehscheibe; (c): maximal und minimal realisierbarer Radstand; (d): maximal und minimal realisierbare Spurweite; in mm

4.2 Detailkonstruktion

Die Konstruktion wurde in drei Hauptkomponenten eingeteilt:

- Korpus
- Aufspannung/Schienenkonstruktion
- Drehscheibe

4.2.1 Korpus

Der mit der Messstrecke fix verschraubte Korpus stellt jenen Grundkörper dar, in dem alle weiteren Komponenten entweder direkt verbaut sind oder zumindest abgedeckt werden. In einem Kasten auf der Unterseite des Korpus ist eine Schienenkonstruktion verbaut (vgl. Bild 4.4). Eine runde Platte dient dabei als Abdeckung der Aufspannvorrichtung. Am Ende wirkt eine verstellbare Klappe wie ein Diffusor und steuert so den Luftstrom zwischen dem eigentlichen Messstreckenboden und dem erhöhten Zusatzboden.

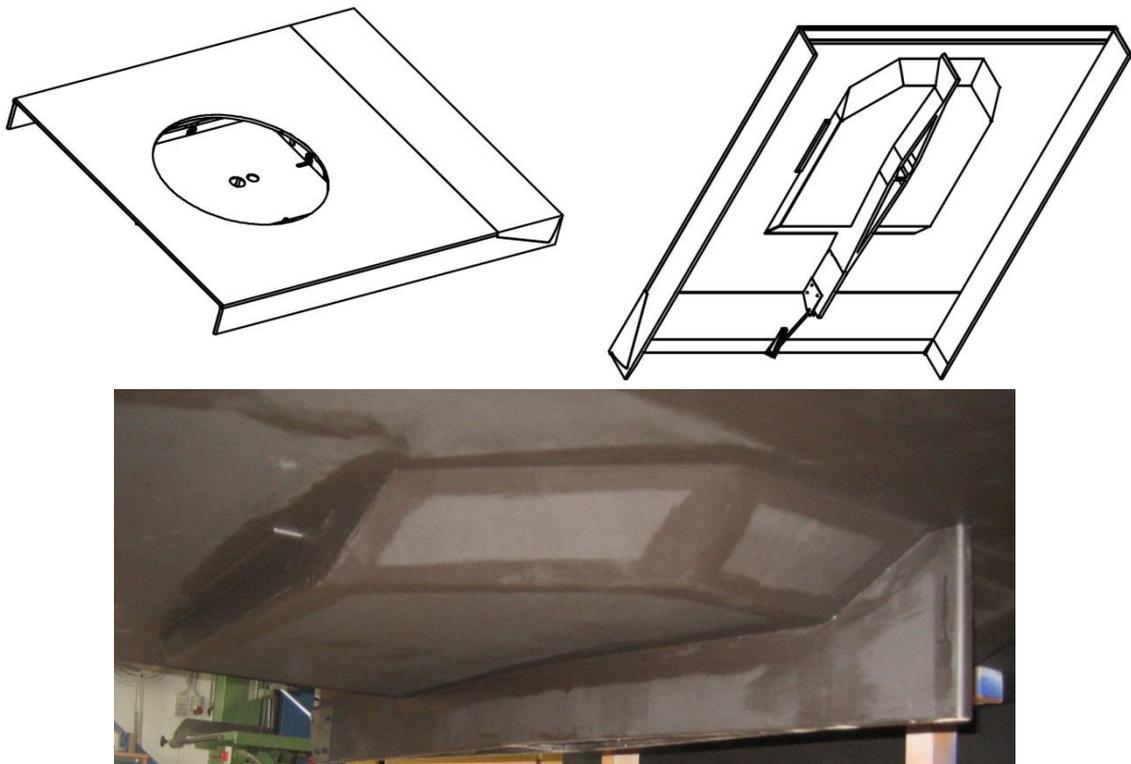


Bild 4.4: Gesamtansichten des Korpus

Die in Bild 4.5 dargestellten Abmessungen sind einerseits durch die Größe der Windkanalmessstrecke eingeschränkt und andererseits durch die Konstruktion der notwendigen Aufspannung.

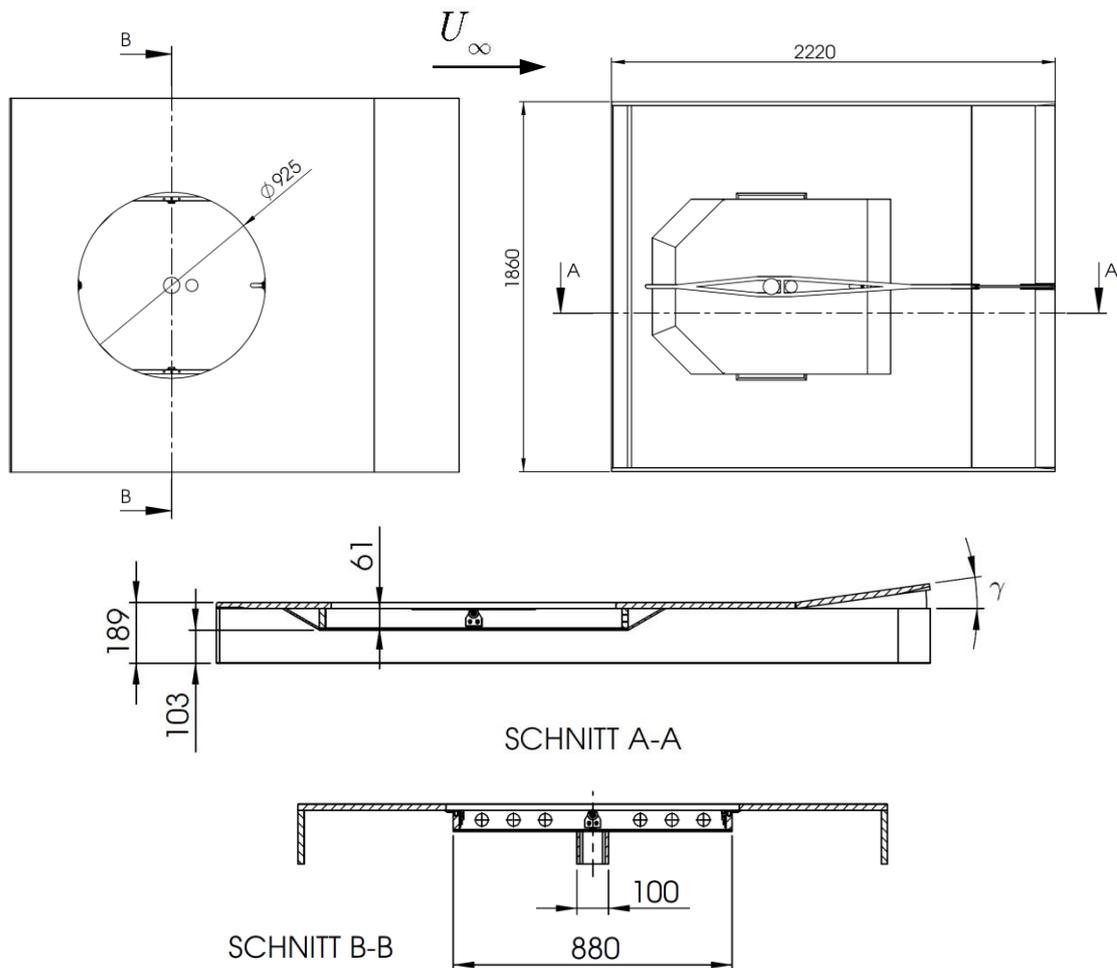


Bild 4.5: Abmessungen des Korpus (in mm)

Aufgrund der Tatsache, dass der zusätzliche Messstreckenboden einen Widerstand im Windkanal darstellt und somit die Strömung beeinflusst, ist am hinteren Ende eine Klappe vorgesehen, mit der die Durchströmung des Unterbaus verändert werden kann. Wie bereits oben erwähnt, fungiert die am Ende des Korpus angebrachte Klappe als Diffusor, mit dem die Strömungsgeschwindigkeit (der Volumenstrom) unter dem Korpus bis zu einem gewissen Grad gesteuert werden kann. Dies wird durch die Strömungsbeeinflussung des zusätzlichen Messstreckenbodens notwendig. Der grundsätzlich erhöhte Widerstand lenkt die Stromlinien nach oben ab, wodurch das Modell nicht mehr parallel angeströmt wird, sondern unter einem Anstellwinkel α . Dies kann die Messergebnisse beeinflussen (vgl. Abschnitt 2.1.2). Der Diffusoröffnungswinkel muss nun so gewählt werden, dass das Modell parallel angeströmt wird (vgl. Abschnitt 5.3). Die Einstellung des Diffusoröffnungswinkels muss stufenlos möglich sein und darf sich auch bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten nicht verändern. Jener Verstellmechanismus, der dies ermöglicht, ist in Bild 4.6 (a) zu sehen.

Werden Messungen unter schräger Anströmung durchgeführt, wird die gesamte Aufspannvorrichtung mit dem Modell entsprechend gedreht. Das bedeutet gleichzeitig, dass die Drehscheibe, die den Kasten, in der die Aufspannung liegt, abdeckt, ebenso mitgedreht werden muss. Damit ein Verdrehen leichtgängig möglich ist, sind im Inneren des Kastens vier kugelgelagerte PU-Rollen montiert. Auf diesen wird die abdeckende Drehscheibe aufgesetzt und durch entsprechende Bohrungen in der Scheibe sowie im Korpus mit Schrauben bei der gewünschten Winkeleinstellung fixiert. Zudem sind die Rollen höhenverstellbar, wodurch gewährleistet wird, dass die Drehscheibe plan mit der Oberfläche des Korpus abschließt. Bild 4.6 (b) zeigt eine der vier Rollen und jene Bohrungen, mit der die Scheibe gegen Verdrehen gesichert wird, im Detail. Der gesamte Kasten, in dem sich die Schienenkonstruktion der Aufspannung befindet, ist in Bild 4.6 (c) ohne Abdeckung zu sehen.

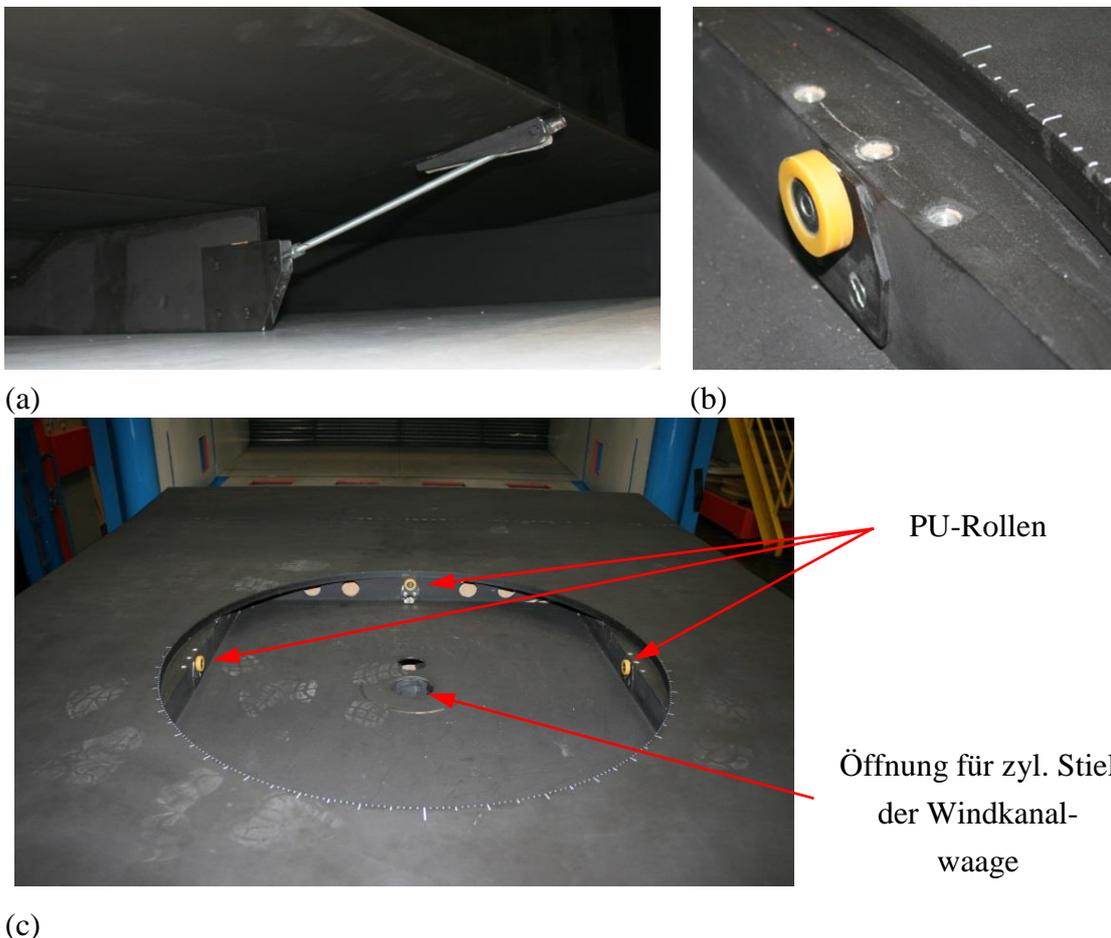


Bild 4.6: (a): Diffusorverstellung; (b): Lagerrolle der Drehscheibe und Fixierbohrungen;

(c): Gesamtansicht des Kastens in dem die Aufspannvorrichtung untergebracht ist

Der gesamte Korpus besteht aus MDF-Platten und wurde, bis auf die zugekauften Rollen, in der Werkstätte des ISW hergestellt. Damit sich die Bohrungen im Holz durch

mehrmaliges Ein- bzw. Ausdrehen der Schrauben nicht abnutzen, sind Gewindeeinsätze aus Metall eingeschraubt.

4.2.2 Aufspannung

Die Aufgabe der Aufspannung ist die Verbindung zwischen Windkanalwaage (vgl. Abschnitt 5.1) und dem Modell. Dabei muss die Ausführung möglichst steif gestaltet werden, sodass die auftretenden aerodynamischen Kräfte am Modell direkt auf die Waage übertragen werden. Ferner sind Schwingungen des Aufbaus zu verhindern, um dadurch verursachte systematische Messfehler ausschließen zu können. Im Gegensatz zur Steifigkeit steht das Verlangen nach einer möglichst geringen Bauhöhe der Konstruktion, um den Anforderungen an die maximale Höhe des Zwischenbodens zu entsprechen. Um eine Minimierung der Stirnfläche der nötigen Verkleidung bzw. des zusätzlichen Widerstandes zu erreichen, muss neben der Bauhöhe auch auf die seitlichen Abmessungen geachtet werden.

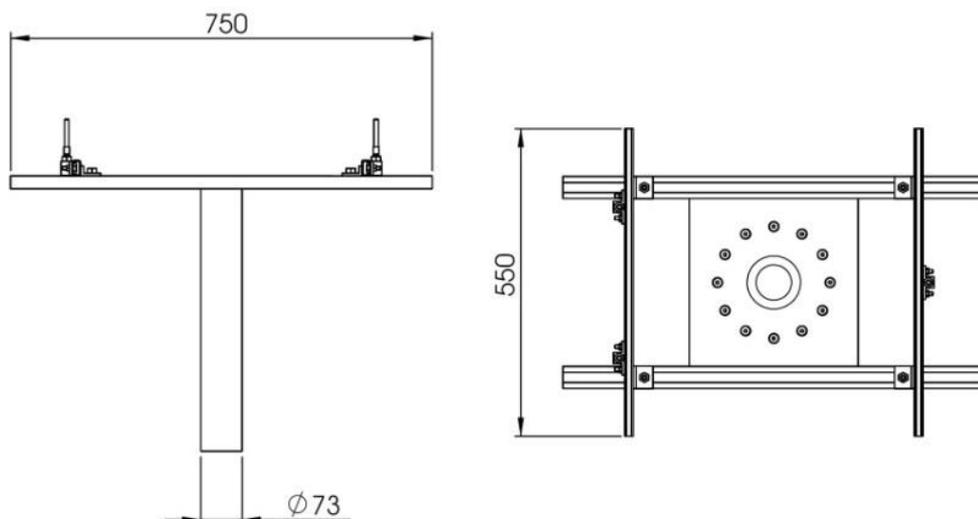


Bild 4.7: Hauptabmessungen der Aufspannung (in mm)

Diese Anforderungen wurden mit einer Schweißkonstruktion unter Verwendung von Montageschienen (Halfenschienen) gelöst. Der zylindrische Stiel der Waagenaufspannung wird dabei durch den eigentlichen Messstreckenboden und den Mittelsteg des Korpus hindurch in den entsprechenden Kasten für die Aufspannung geführt. Auf diesen wird die Schienenkonstruktion mit einer entsprechenden Zentrierung angeflanscht. Die eigentliche Aufspannung besteht aus zwei mit einer Zentrierplatte verschweißten Längsschienen (HALFEN HM40/22) und zwei um 90° verdrehten, frei verschiebbaren Querschienen (HALFEN HM28/15) (Bild 4.8). An diesen sind - wiederum frei verschiebbar - die Aufnahmen für die Bolzen angebracht, auf denen letztendlich das Modell montiert wird. Entscheidend ist, dass die gesamte

Aufspannung weder den Korpus noch die exzentrischen Einlegescheiben in keiner Messkonfiguration berührt.

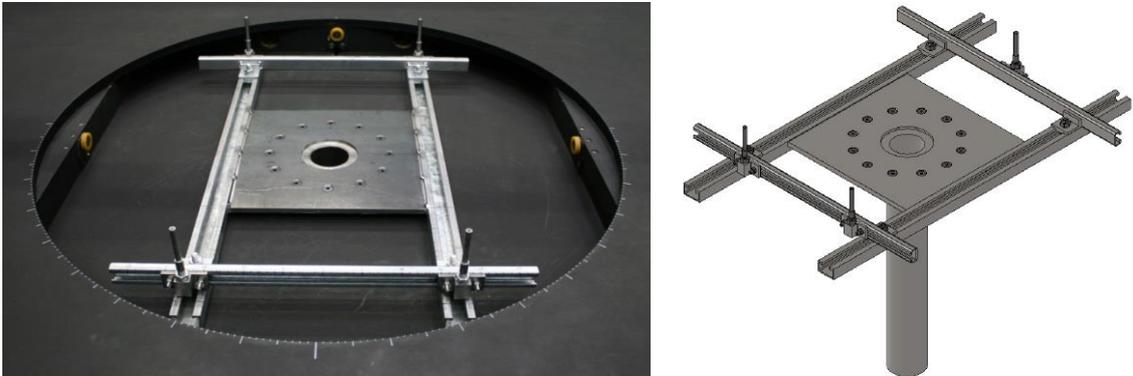


Bild 4.8: Original und CAD-Modell der Schienenkonstruktion

Die Einstellung des Radstands erfolgt durch Verschieben der Querschienen entlang der Längsschienen. Dadurch könnten theoretisch Radstände bis maximal $L_{RS} = 750 \text{ mm}$ stufenlos eingestellt werden. In Kombination mit der Drehscheiben-Abdeckung ist allerdings der maximale Radstand auf $L_{RS} = 720 \text{ mm}$ begrenzt, (Bild 4.3(c)). Die Spurweite wird durch Verschieben der Bolzenaufnehmer (Bild 4.9) entlang der Querschienen eingestellt, wobei die maximale Spurweite bei $L_{SP} = 490 \text{ mm}$ liegt. Fixiert werden die Schienen (wie auch die Aufnehmer) mit eigens gefertigten Führungen und passenden Hammerkopfschrauben. Die einstellbare Position der Bolzen muss dabei die gleichen Radaufstandspunkte erreichen wie die möglichen Konfigurationen der Drehscheibe. Auch die Aufspannung wurde bis auf die Montageschienen in der Werkstätte des ISW hergestellt.

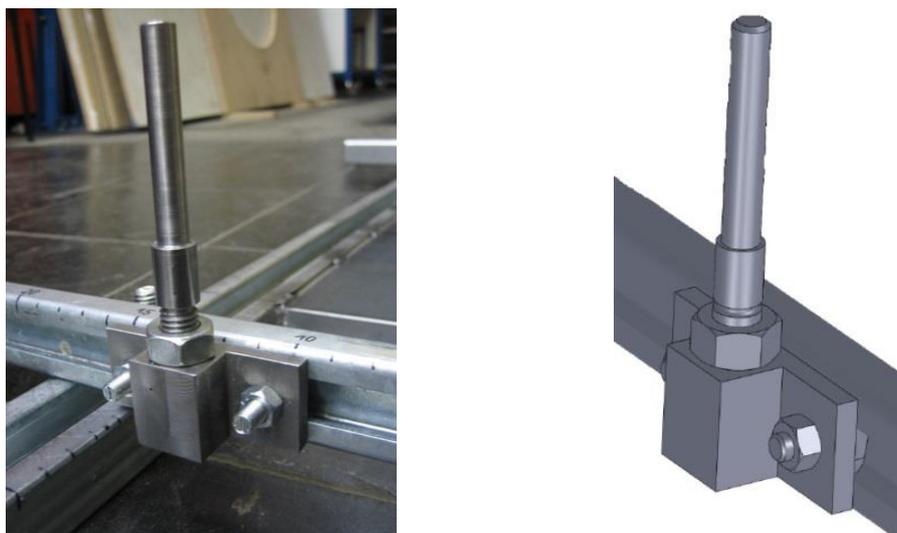


Bild 4.9: Original und CAD-Modell des Bolzens mit entsprechendem Aufnehmer

Mit dieser Konstruktion aus Montageschienen konnte eine sehr niedrige Bauhöhe von 51 mm realisiert werden. Der Kasten, der die Aufspannung vor der Strömung schützt, hat eine Höhe von 67 mm . Entsprechende Abmessungen sind in Bild 4.10 dargestellt.

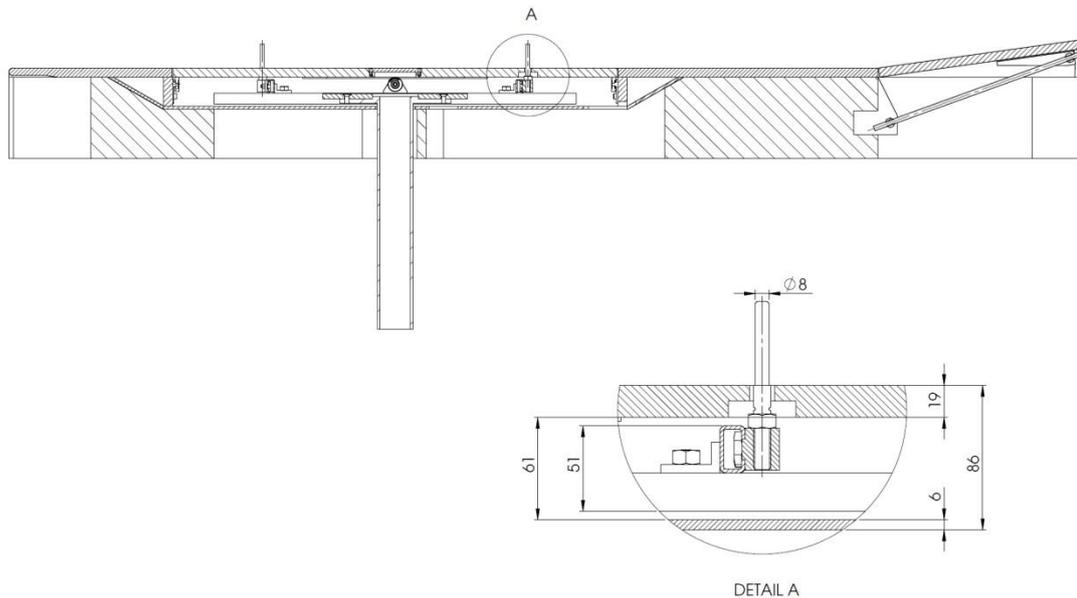


Bild 4.10: Längsschnitt durch den Messaufbau (in mm)

4.2.3 Drehscheibe

Die dritte Hauptkomponente ist die Drehscheibe, die als Abdeckung des Kastens im Korpus fungiert, in dem die Konstruktion der Aufspannung untergebracht ist. Zudem werden in dieser Scheibe die exzentrischen Einlegeplatten befestigt, durch welche die Bolzen der Aufspannung geführt werden. Bild 4.11 stellt das Prinzip anhand einer Explosionsansicht anschaulich dar. Es sind auch die 18 Bohrungen, die zur Fixierung des Schiebewinkels dienen, erkennbar. Durch verschiedene Kombinationen mit den sechs Bohrungen am Korpus (vgl. Bild 4.6 (b)) kann der geforderte Schiebewinkelbereich von $-30^\circ < \beta < +30^\circ$ mit einem Inkrement von $\Delta\beta = 2,5^\circ$ realisiert werden.

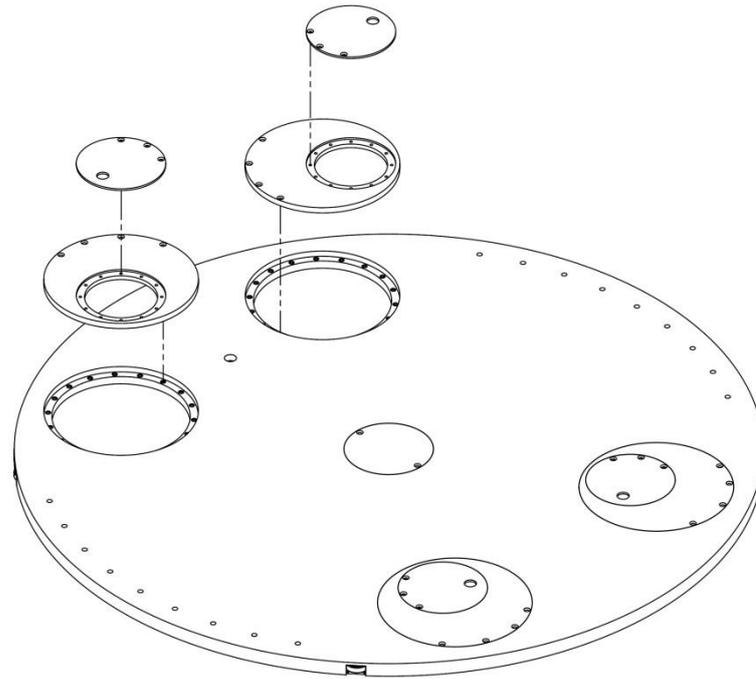


Bild 4.11: Explosionsdarstellung der Drehscheibe

Durch die ungleiche Teilung der Bohrungen in den Exzentrerscheiben (Bild 4.12) existieren 2663 Konfigurationsmöglichkeiten zur Positionierung der Durchgangsöffnung des Bolzens, von denen sich 1297 voneinander unterscheiden. Diese Varianten liegen alle innerhalb eines Kreises mit einem Durchmesser von $D = 140 \text{ mm}$ wobei die Öffnung, durch die der Bolzen ($d = 8 \text{ mm}$) geführt wird, einen Durchmesser von $D = 15 \text{ mm}$ aufweist. Dadurch entsteht weiterer Spielraum und es kann für jeden Punkt innerhalb dieses Kreises eine passende Konfiguration gefunden werden. Die Einstellungsmöglichkeiten sind in Anhang B dargestellt.

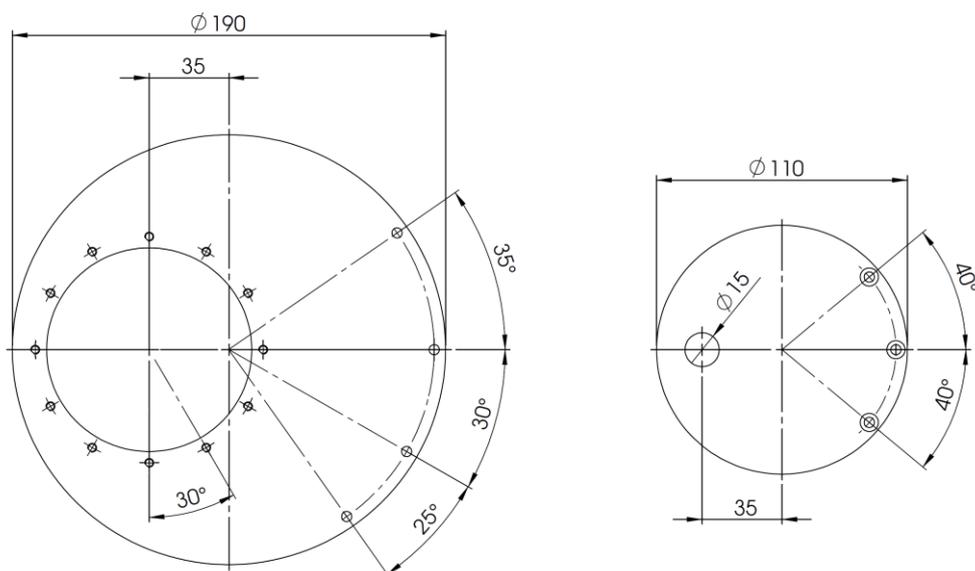


Bild 4.12: Exzentrische Einlegescheiben (in mm)

Damit sich die komplette Konstruktion (Aufspannung und Drehscheibe) leichtgängig drehen lässt, wird die aus einer MDF-Platte gefertigte Drehscheibe wie bereits beschrieben auf Rollen gelagert (vgl. Bild 4.6 (b)). Mit weiteren vier Rollen, verteilt über den Umfang der Scheibe, wird diese in der Öffnung des Korpus zentriert (vgl. Bild 4.13 (b)).

Für den Fall einer Modellaufspannung an einem zentralen Stiel ist im Mittelpunkt der Scheibe eine Öffnung vorgesehen. Zusätzlich macht die Konstruktion des Fennek mit drei Rädern eine sogenannte Dreipunktaufspannung notwendig. Dazu ist eine weitere Öffnung in der Mittelebene vorgesehen, durch die der Aufspannbolzen für das hintere Rad ragt (Bild 4.13 (a)).

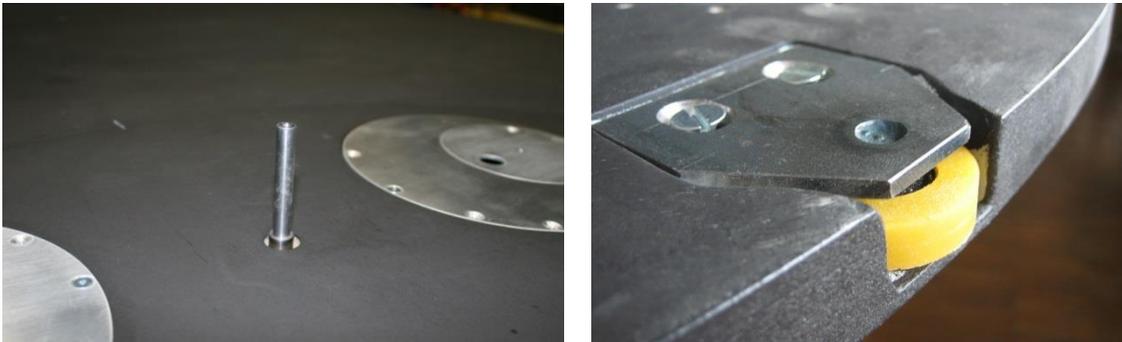


Bild 4.13: (a): Loch für die Aufspannung des Fennek; (b): eine von vier Zentrierrollen der Drehscheibe

5 Messungen

Die im 2m-Windkanal des ISW durchgeführten aerodynamischen Untersuchungen sowie der dazu notwendige Messaufbau werden in diesem Abschnitt beschrieben.

5.1 Messgeräte

Die für die aerodynamischen Untersuchungen relevanten Größen sind Luftdruck, Temperatur, Druck (in DVK und Plenum) und die von der Windkanalwaage erfassten Kräfte und Momente. Druck sowie die Temperatur dienen nach Glg. (2.10) zur Berechnung der „ungestörten“ Anströmgeschwindigkeit.

Die Druckmessungen in der Düsenvorkammer erfolgen mittels ringförmig angeordneter Druckmessstellen, die im Anschluss in einer Sammeldose zusammengeführt werden. In einer Relativdruckmessdose (bdsensors, Typ DMP 343i) wird die Druckdifferenz aus dem gemittelten DVK-Druck der Sammeldose und dem ebenfalls erfassten Absolutdruck im Plenum ermittelt. Der Nenndruck des Druckmessumformers liegt bei $1000 Pa$ bei einem Messfehler von $\pm 1\%$ des Endwerts. Für die Temperaturmessung ist in der Windkanaldüse ein Pt100 Widerstandsthermometer angeordnet, dessen Signal, sowie das der Druckmessung, an einen Messverstärker (HBM, Typ MGCplus) geleitet wird.

Die Messung der wirkenden Luftkraftkomponenten erfolgt mit einer Sechskomponenten-Plattformwindkanalwaage. Diese ist unter der Messstrecke positioniert, und das Modell ist direkt dieser Waage verbunden. Wichtig dabei ist, dass die Verbindung Waage-Modell zu keinem Zeitpunkt von äußeren Störungen beeinflusst wird. Die Messung der Kräfte erfolgt mit sechs Kraftmesszellen (Typ Z6H3) der Firma HBM mit einem Nennmessbereich von $200 kg$ und einer Messgenauigkeit von $\pm 0,05\%$ bezüglich des Endwerts. Auch diese Messsignale werden an den Messverstärker weitergeleitet. In Bild 5.1 sind im oberen Teil die am Modell angreifenden Kräfte und Momente des Modells mit entsprechendem Koordinatensystem (vgl. Bild 3.5) dargestellt, während der untere Teil die sechs von der Waage gemessenen Komponenten zeigt. Dabei bezeichnet der Index M das Koordinatensystem der Momente und der Index F das Koordinatensystem der Kräfte. Der

Koordinatenursprung befindet sich 1078 mm über dem effektiven Waagenzentrum und 740 mm über dem Messstreckenboden.

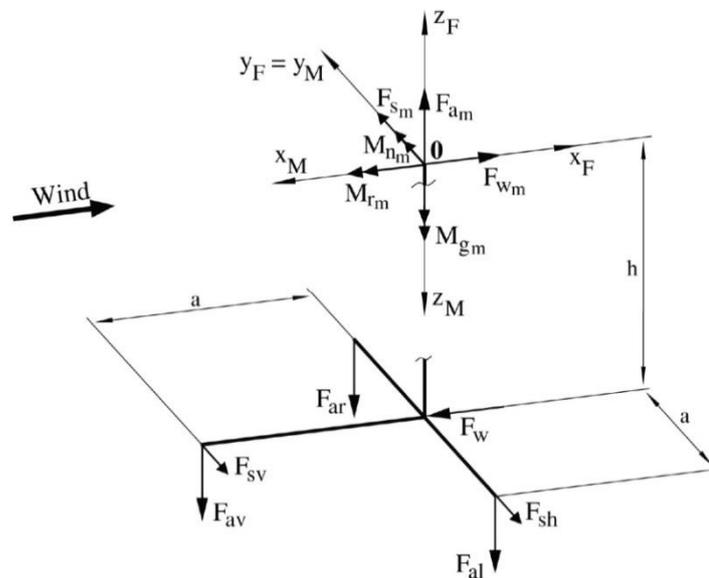


Bild 5.1: Kräfte am Modell (Index m) und gemessene Kräfte der Waage; aus [15]

Aus dem Kräfte- und Momentengleichgewicht um den Ursprung (0) folgt für die Widerstandskraft:

$$W = F_W, \quad (5.1)$$

für den Auftrieb:

$$A = F_{av} + F_{ar} + F_{al}, \quad (5.2)$$

für die Seitenkraft:

$$S = F_{sv} + F_{sh}, \quad (5.3)$$

für das Giermoment:

$$M_g = a \cdot F_{sv}, \quad (5.4)$$

für das Rollmoment:

$$M_r = a \cdot F_{al} - F_{ar} - a \cdot F_{sv} + F_{sh}, \quad (5.5)$$

für das Nickmoment:

$$M_n = a \cdot F_{av} - h \cdot F_W. \quad (5.6)$$

Da die Windkanalwaage nicht drehbar ist, erfolgt die Messung der Kräfte bei Modellen unter Schräganströmung in windfesten Koordinaten. Um die für die Automobilaerodynamik relevanten modellfesten Kräfte zu erhalten, müssen die so

ermittelten Daten entsprechend transformiert werden. Für Messungen unter einem Schiebewinkel kann die Einspannung der Waage gelöst und der Aufbau mitsamt dem Modell von Hand verdreht werden. Die Einstellung der entsprechenden Winkel erfolgt mit einem Maßband, das am Umfang einer Scheibe von $57,3\text{ cm}$ Durchmesser (Umfang = 180 cm) angebracht ist. Dadurch ergibt sich bei einer Drehung von einem Grad eine Verschiebung von $0,5\text{ cm}$ entlang des Umfangs.

Die aufgenommenen und verstärkten Signale werden mit dem Softwarepaket Catman 5.0, ebenfalls von HBM, aufgezeichnet. Dazu kommt ein Skript zum Einsatz, welches von Reisenberger [15] im Zuge seiner Dissertation erstellt wurde und die aufgenommenen Messwerte in einem Textdokument ausgibt. Mit dem ebenfalls von Reisenberger programmierten Programm Jakoff können in weiterer Folge diese Messdaten unter Zugrundelegung der sogenannten Kalibriermatrix ausgewertet werden. Auf die Anwendung dieser Programme wird zum gegebenen Zeitpunkt noch genauer eingegangen.

5.2 Messverfahren

Die Durchführung von Windkanalexperimenten erfordert einige vorbereitende Maßnahmen, welche im Folgenden angeführt werden. In etwa eine halbe Stunde vor Beginn der Messungen werden alle elektronischen Komponenten mit Strom versorgt, damit die auftretenden Temperaturen im Messaufbau stationäre Werte annehmen. Dies ist insbesondere für die Wägezellen der Waage notwendig. Vor der ersten Messung wurde auch der Windkanal für einige Minuten bei mittlerer Geschwindigkeit ($U_\infty \approx 20\text{ m/s}$) betrieben, um auch hier für einen thermischen Ausgleich zu sorgen.

Danach musste die Software Catman gestartet und folgende Daten eingegeben werden:

- Luftdruck p_∞ in *mbar*
- Messdauer t in *s*
- Messfrequenz f in *Hz*
- Düsenfaktor k
- Dateiname und Speicherort

Im Folgenden wird der allgemeine Ablauf der Messungen dargestellt. Bevor Messungen mit einem angeströmten Modell stattfinden, ist es notwendig eine sogenannte Nullmessung durchzuführen. Dabei werden die Kräfte gemessen, die ohne Wind auf die einzelnen Wägezellen der Waage wirken. Im Anschluss daran wird die erforderliche Anströmgeschwindigkeit eingestellt und die eigentliche Messung durchgeführt. Die auf

das Modell wirkenden aerodynamischen Kräfte und Momente werden aus der Differenz der Messung mit Wind und der entsprechenden Nullmessung berechnet. Dabei können die Messdauer sowie die Messfrequenz frei gewählt werden. Das Ergebnis einer Messung bzw. der Nullmessung ist dabei der Mittelwert aus den aufgezeichneten Messdaten, deren Anzahl durch die Messdauer und die Messfrequenz bestimmt wird.

Weitere notwendige Eingabeparameter, die unabhängig vom Modell im Windkanal sind, sind der Düsenfaktor k und der Umgebungsluftdruck p_∞ . Die Bedeutung und Herleitung des Düsenfaktors wurde bereits in Abschnitt 2.1.3 gezeigt. Der Düsenfaktor für den 2m-Windkanal am ISW wurde mit $k = 1,032$ ermittelt. Mit dem Umgebungsluftdruck wird (mit der gemessenen Temperatur) die Dichte der Luft im Plenum bestimmt.

Bei den hier durchgeführten Messungen besteht eine Messreihe aus jeweils drei Messungen für jede Anströmgeschwindigkeit bei einem Schiebewinkel, sowie der zugehörigen Nullmessung. Der Grund für dieses Vorgehen liegt darin, dass aus den drei Mittelwerten eventuell auftretende Schwankungen erkannt werden können, die bei Bildung eines gesamten Durchschnitts nicht zu erkennen sind. Konnten bei späteren Messungen keine Abweichungen erkannt werden, wurde auf die Mittelwertbildung aus drei Werten verzichtet und die Messdauer entsprechend erhöht. Die Messdauer einer Konfiguration betrug, wenn nicht anders erwähnt, $3 \times 20 s$ bei einer Messfrequenz von $1 Hz$.

Die aufgenommenen Rohdaten wurden mit dem Programm Jakoff ausgewertet. Dieses Programm errechnet aus den Rohdaten der einzelnen Wägezellen sowie den Daten der Nullmessung die relevanten aerodynamischen Kräfte und Momente, wie in Abschnitt 5.1 beschrieben und exportiert die Ergebnisse in ein Textdokument. Um die Daten vollständig auszuwerten, sind folgende Größen für das Modell notwendig:

- Bezugslänge L in m
- Bezugsfläche A in m^2
- Radstand L_{RS} in m
- Abstand von Vorderrad zu Koordinatenursprung Δx_{VR-0} in m
- Koordinatenursprung $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ in m
- Gierwinkel β in $^\circ$
- Daten der Nullmessung

Bei der Auswertung kann zwischen einer modellfesten und einer windfesten Koordinatenzerlegung unterschieden werden. Da das Bezugskoordinatensystem $740 mm$ über dem eigentlichen Messstreckenboden liegt, müssen die Kräfte in das Fahrzeugkoordinatensystem (vgl. Bild 3.5) transformiert werden, dessen Ursprung auf

der Fahrbahn liegt. Für den neu konstruierten Boden mit $H = 189 \text{ mm}$ betrug daher die Koordinatenverschiebung $\Delta z = -0,551 \text{ mm}$. Die weitere Auswertung und grafische Aufbereitung der Messergebnisse erfolgte mit einer gewöhnlichen Tabellenkalkulationssoftware.

5.3 Versuchsaufbau

Die einzelnen Komponenten des Messaufbaus wurden bereits genauer vorgestellt. Im folgenden Abschnitt werden die einzustellenden Modellparameter und die durchzuführenden Messungen dargestellt.

Die Anströmung des Versuchsobjekts muss parallel zum Boden erfolgen. Diese liegt dann vor, wenn die Staustromlinie an der Vorderkante der Zusatzmessstrecke ebenso parallel zum Boden verläuft. Durch Verändern des Klappenwinkels kann der Ort des Staupunktes an der Vorderkante und somit der Verlauf der Anströmung variiert werden. Die Parallelität wurde dabei durch eine Differenzdruckmessung zwischen Ober- und Unterseite an der Vorderkante des Messstreckenbodens sowie mittels einer Fadensonde bestimmt. Der Differenzdruckmessung liegt zu Grunde, dass die statischen Drücke auf der oberen und unteren Seite einer Platte bei symmetrischer Anströmung gleich sind. In Bild 5.2 sind die Stromlinien für eine symmetrische Anströmung (a) und der sich einstellenden Strömung bei zu großem Diffusorwinkel (b) schematisch dargestellt. In Teilbild (a) liegt der Staupunkt (SP) in der Symmetrieebene der Vorderkante und es muss gelten:

$$p_{stat,1} = p_{stat,2}$$

In Bild 5.2 (b) wird durch den zu groß gewählten Winkel des Diffusors mehr Luft an die Unterseite des Zusatzbodens geleitet. Dadurch wandert der Staupunkt in Richtung Oberseite und dort herrscht dadurch ein höherer statischer Druck. Für die Differenzdruckmessungen wurde ein U-Rohr (vgl. Bild 5.3) verwendet, das die vorherrschenden Druckunterschiede an den Punkten 1 und 2 von Bild 5.2 anzeigt. Allerdings hat sich die Bestimmung mit Hilfe der Fadensonde als brauchbarer und einfacher erwiesen. Dazu wurde die Parallelität des Luftstroms mit einem an einer Lanze montierten Wollfaden überprüft.

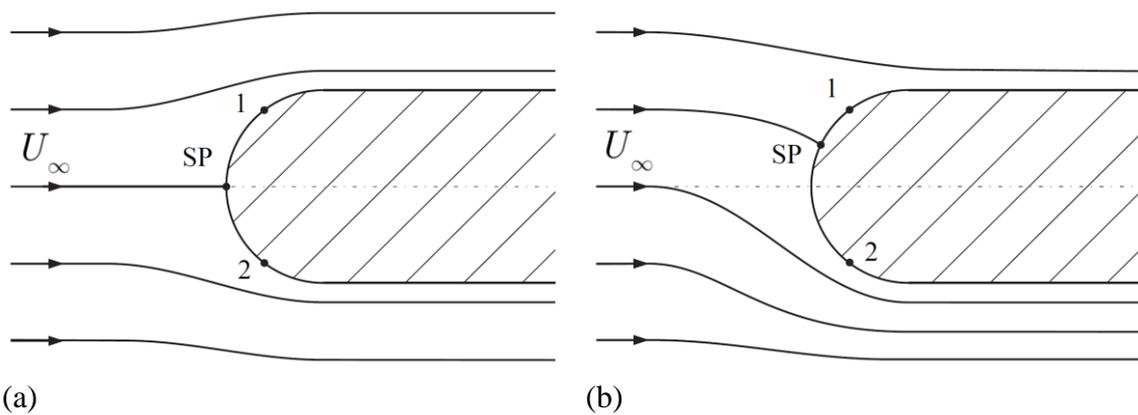


Bild 5.2: Staupunkt an der Vorderkante der Zusatzmessstrecke bei symmetrischer (a) und asymmetrischer (b) Anströmung

Experimente haben gezeigt, dass für die leere Messstrecke mit einem Öffnungswinkel von $\gamma = 13\%$ gute Ergebnisse erzielt werden. Befindet sich allerdings ein Modell in der Messstrecke, verändern sich die optimalen Diffusorwinkel. Ursache dafür ist die aufstauende Wirkung des Modells im vorderen Bereich der Messstrecke. Dadurch wird der Luftmassenstrom unter der Zwischenmessstrecke zusätzlich erhöht und die Anströmung gestört. Mit einem entsprechend flacheren Öffnungswinkel als bei der leeren Messstrecke wird die parallele Strömung wiederhergestellt. Die weiteren Einstellungen wurden daraufhin unter Anwesenheit des entsprechenden Modells im Windkanal vorgenommen.



Bild 5.3: Bestimmung des Diffusorwinkels durch Differenzdruckmessung

5.3.1 Modell Fennek

Bei dem Modell handelt es sich um den Fennek aus dem Jahr 2010 im Maßstab 1:2. Eine Darstellung der Modellabmessungen zeigt Bild 5.4. Die Abmessungen des Originalfahrzeugs sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Der Fennek wird bei der neuen Konstruktion an allen drei Radaufstandspunkten mit einem Bolzen der Aufspannvorrichtung verbunden. Jeder dieser Auflagepunkte ist zusätzlich mit einer Feststellschraube gesichert, um eine exakte Positionierung während der Messungen zu gewährleisten. Dazu wurden in das Modell Aluminium-Hülsen eingeklebt. Bild 5.5 zeigt den Fennek in der Windkanalmessstrecke.

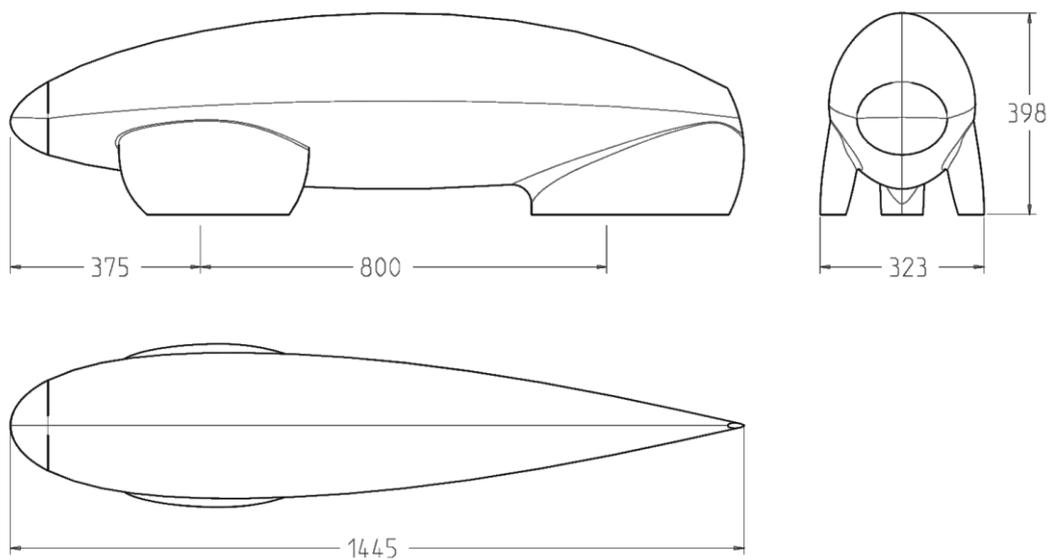


Bild 5.4: Abmessungen des Fennek Modells im Maßstab 1:2 (in mm)

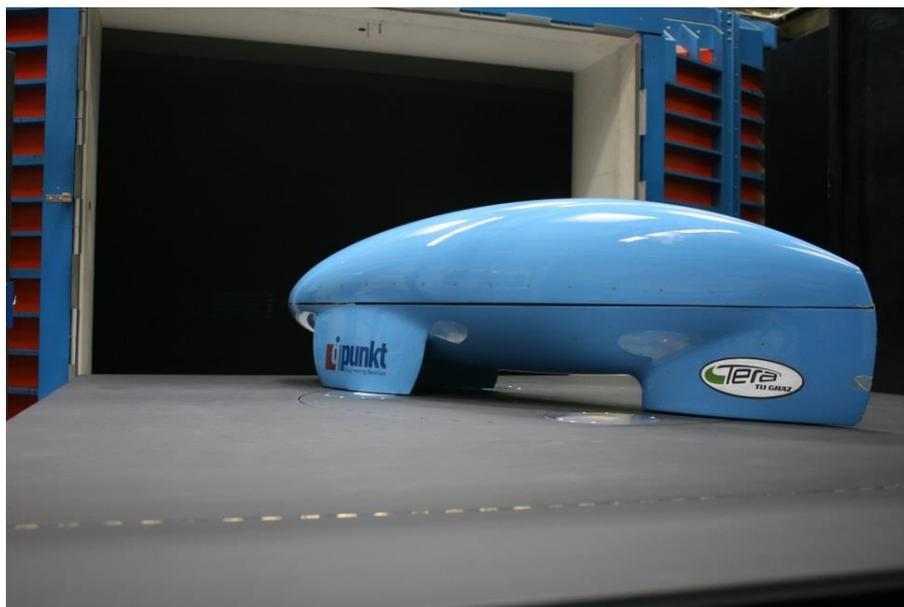
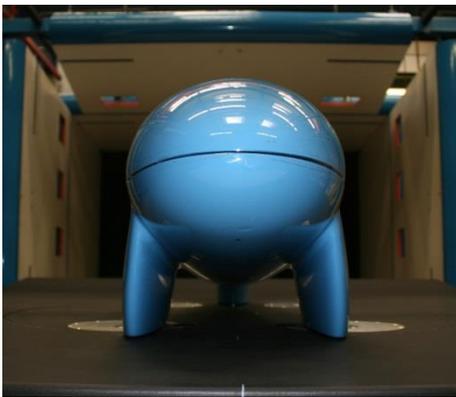


Bild 5.5: Der Fennek im Windkanal des ISW

Die Aufspannung des Fennek erwies sich zum Teil als problematisch, da sich das Modell im Laufe der Zeit seit den früheren Messungen offensichtlich verzogen hat. Dadurch konnte die Spurweite laut Konstruktionszeichnung von $L_{SP} = 270 \text{ mm}$ nicht eingehalten werden. Es wurden daraufhin die Fixierungsbolzen der Aufstandspunkte an die aktuellen Maße angepasst. Ähnliche Probleme bereitete die Bodenfreiheit. Auch die Radkästen hatten sich offenbar verformt und machten somit eine konstante Bodenfreiheit nicht möglich. Der Verzug ist am Modell deutlich zu erkennen, beispielsweise an der Trennfuge der beiden Modellhälften, gut erkennbar in Bild 5.6 (a).

Bei den von Feichtinger [5] durchgeführten Druckmessungen wurden Schläuche aus dem Inneren des Modells durch eine Öffnung im hinteren Radkasten geführt, zu sehen in Bild 5.6 (b). Für Vergleichszwecke wurden Messungen sowohl mit offenem als auch mit geschlossenem Radkasten durchgeführt.

Bevor die ersten Messungen durchgeführt wurden, fanden einige Testmessungen bei unterschiedlichen Diffusoreinstellungen statt, um den optimalen Winkel zu finden. Zudem konnte somit der Einfluss des Öffnungswinkels auf die gemessenen Kräfte ermittelt werden. Im Anschluss daran folgten mehrere Testreihen mit verschiedenen Modellkonfigurationen. Es wurden Messungen bei offenem und geschlossenem Radkasten sowie bei verschiedenen Diffusoröffnungswinkeln durchgeführt. In Tabelle 5.1 sind die verschiedenen Konfigurationen zusammengefasst dargestellt.



(a)



(b)

Bild 5.6: (a): Modell des Fennek, ungleiche Spaltmaße, (b): Öffnung im hinteren Radkasten des Fennek

Der Fennek ist im Originalmaßstab für eine Fahrgeschwindigkeit von $U = 10 \text{ m/s} = 36 \text{ km/h}$ konzipiert. Aus Glg. (3.28) folgt dadurch für die Anströmgeschwindigkeit im Windkanal: $U_\infty = 20 \text{ m/s}$. Mit einer kinematischen Viskosität von $\nu = 1,558 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (bei $T = 25^\circ\text{C}$ und $p = 1 \text{ bar}$) folgt eine Reynoldszahl von:

$$Re = \frac{U_\infty L}{\nu} = \frac{20 \cdot 1,445}{1,56 \cdot 10^{-5}} \approx 1,9 \cdot 10^6. \quad (5.7)$$

Zur anschaulichen Darstellung der Abhängigkeit der aerodynamischen Beiwerte von der Reynoldszahl wurden Versuche bei Geschwindigkeiten von $10 \text{ m/s} < U_\infty < 40 \text{ m/s}$ mit einer Schrittweite von $U_\infty = 10 \text{ m/s}$ durchgeführt.

Der Schlankheitsgrad λ dieses Modells beträgt mit den Abmessungen aus Bild 5.4, wobei für die Dicke die Fahrzeughöhe H herangezogen wird:

$$\lambda = \frac{L}{H} = \frac{1,445}{0,399} = 3,62. \quad (5.8)$$

Daraus folgt, dass es sich beim Fennek um einen schlanken Körper handelt, bei dem der Widerstand vorwiegend durch Reibungseffekte zustande kommt.

Abschließend sind in Tabelle 5.2 alle relevanten Modellparameter des Fennek zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Durchgeführte Messungen am Fennek

| Messreihe | Diffusor ° | Rad- kasten | Schiebe- winkel ° | Anström- geschw. <i>m/s</i> | Sonstiges |
|-------------|---------------|----------------|-------------------------|-----------------------------------|--|
| Testmessung | 5 – 13 | geschl. | 0 | 10 20 30 40 | Einstellung Diffusor |
| Messreihe 1 | 7 | geschl. | 0 bis +30 | 10 20 30 40 | für $\beta = -10^\circ / 0^\circ / +10^\circ$ U_∞ von 5 bis 40 <i>m/s</i> Messung alle 5 <i>m/s</i> Repromessung von $\beta = -30^\circ$ bis $\beta = +30^\circ$ alle 5° |
| Messreihe 2 | 3 | geschl. | 0 bis +30 | 10 20 30 40 | für $\beta = -10^\circ / 0^\circ / +10^\circ$ U_∞ von 5 bis 40 <i>m/s</i> Messung alle 5 <i>m/s</i> Repromessung von $\beta = -30^\circ$ bis $\beta = +30^\circ$ alle 5° |

| | | | | | |
|-------------|---|-------|-------------------|----------------------|--|
| Messreihe 3 | 3 | offen | -30 bis +30 | 10 20 30 40 | Repromessung bei $\beta = \pm 30^\circ$, $\beta = \pm 17,5^\circ$, und $\beta = 0^\circ$, |
|-------------|---|-------|-------------------|----------------------|--|

Tabelle 5.2: Parameter Modell Fennek

| | |
|---|-----------------------|
| Modellmaßstab | 1 : 2 |
| Bezugslänge L | 1,445 m |
| Bezugsfläche A | 0,0973 m ² |
| Radstand L_{RS} | 0,8 m |
| Spurweite vorne/hinten L_{SP} | 0,27 m / - |
| Abstand Vorderachse zu Koordinatenursprung Δx_{VR-0} | 0,39 m |
| Bodenfreiheit e | 5 mm |
| Schlankheitsgrad λ | 3,62 |

5.3.2 Modell Panther

Das Modell des Panther steht im Maßstab 1:3 zur Verfügung. Die Abmessungen sind in Bild 5.7 dargestellt und außerdem in Tabelle 4.1 angegeben. Im Gegensatz zum Fennek ruht der Panther auf vier Auflagepunkten, jeweils an den Rädern (vgl. Bild 5.8). Die Fixierung des Modells auf den Aufspannungsbolzen erfolgt, wie bereits beim Fennek, durch eingeklebte Aluminiumhülsen und mit zusätzlichen eingeschraubten Gewindestiften. Durch die vorhandenen Räder ist auch die Bodenfreiheit wesentlich besser gewährleistet und kann entsprechend klein gehalten werden.

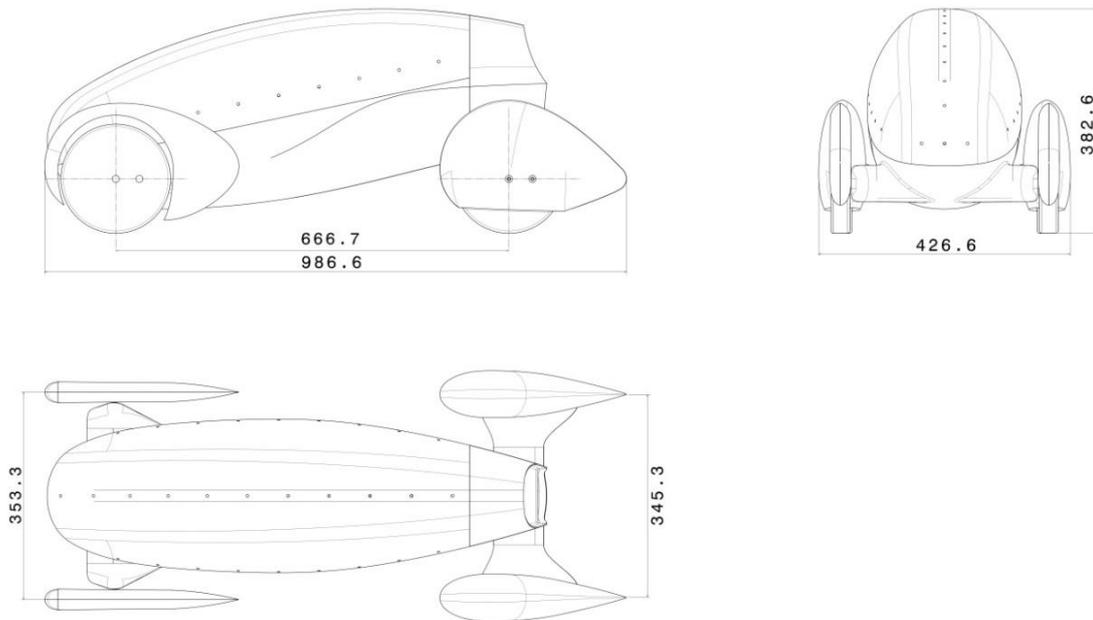


Bild 5.7: Abmessungen des Panthermodells im Maßstab 1:3 (in mm)

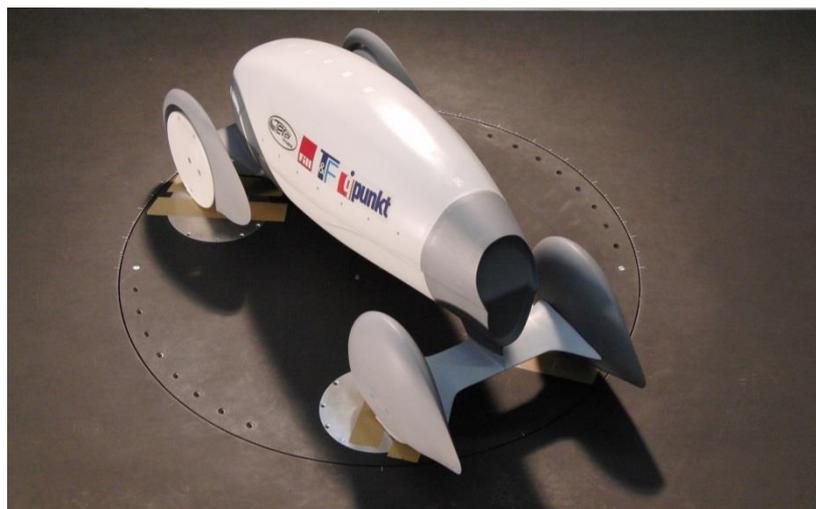


Bild 5.8: Panther im Windkanal des ISW

Wie beim Fennek fanden vor den ersten Messungen Tests statt, um die optimale Einstellung für den Diffusoröffnungswinkel zu finden. Nachdem dieser mit $\gamma = 8^\circ$ ermittelt wurde, folgten die eigentlichen Messreihen. Diese umfassten diverse Variationen an der Vorderachse. So wurden Messungen mit einer breiteren Spur durchgeführt, sowie mit und ohne Verkleidung der Vorderräder (Bild 5.9 (a) und (b)). Zudem wurde der Einfluss des Spalts zwischen Rad und Messstreckenboden untersucht, indem die Strömung mit einem Papierstreifen (vgl. Bild 5.9 (c)) abgedeckt wurde, um die Strömung unter dem Rad zu unterdrücken. Eine Zusammenfassung aller Messungen ist in Tabelle 5.3 zu finden.

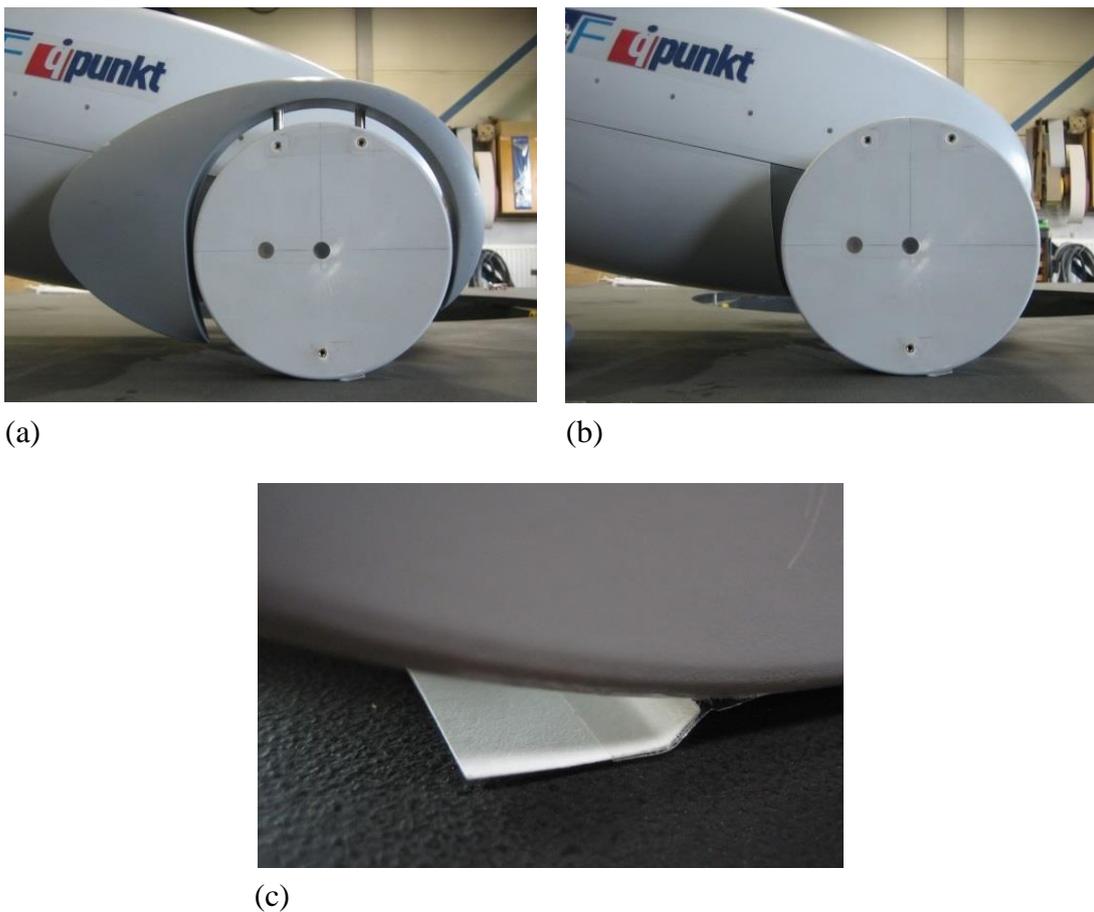


Bild 5.9: Modell Panther (a): mit Radhaus; (b): ohne Radhaus; (c): Papierstreifen auf der Radunterseite

Die Geschwindigkeit, für die der Panther im Originalmaßstab ausgelegt ist, beträgt wie beim Fennek $U = 10 \text{ m/s} = 36 \text{ km/h}$. Durch das verkleinerte Modell ergibt sich aus Glg. (3.28) eine geforderte Anströmgeschwindigkeit im Windkanal von $U_\infty = 30 \text{ m/s}$, um den Ähnlichkeitsgesetzen zu entsprechen. Die durchgeführten Messungen fanden bei Geschwindigkeiten zwischen $20 \text{ m/s} < U_\infty < 40 \text{ m/s}$ statt. Für die Reynoldszahl folgt mit den Stoffwerten aus Glg. (5.7) und den charakteristischen Abmessungen des Panther:

$$Re = \frac{U_\infty L}{\nu} = \frac{20 \cdot 0,987}{1,56 \cdot 10^{-5}} \approx 1,3 \cdot 10^6. \quad (5.9)$$

Der Schlankheitsgrad, wiederum mit der Höhe und mit den Abmessungen aus Bild 5.7 gebildet, ergibt sich zu

$$\lambda = \frac{L}{H} = \frac{0,987}{0,383} = 2,57. \quad (5.10)$$

Obwohl der Schlankheitsgrad auf einen schlanken Körper hinweist, ist der Panther aufgrund seiner freistehenden Räder und der Heckform eher als stumpfer Körper einzuordnen.

Abschließend sind wieder die Modellparameter des Panther in Tabellenform angeführt (Tabelle 5.4).

Tabelle 5.3: Durchgeführte Messungen am Panther

| Messreihe | Diffusor ° | Spur | Radhaus | Schiebewinkel ° | Anströmgeschw. m/s | Sonstiges |
|---------------|---------------|-------|-----------|--------------------|-----------------------|------------------------------|
| Testmessungen | 3 - 10 | eng | mit | -30 0 +30 | 20 30 40 | Einstellung des Diffusors |
| Messung_01 | 8 | eng | mit | -30 bis +30 | 20 30 40 | |
| Messung_02 | 8 | breit | mit | -30 bis +30 | 20 30 40 | breitere Spur vorne (+28 mm) |
| Messung_03 | 8 | breit | ohne | -30 bis +30 | 20 30 40 | |
| Messung_04 | 8 | breit | mit/ ohne | 0 | 20 30 40 | Papierstreifen unter Räder |

Tabelle 5.4: Parameter Modell Panther

| | |
|--|----------------------|
| Modellmaßstab | 1 : 3 |
| Bezugslänge L | 0,9866 m |
| Bezugsfläche A | 0,106 m ² |
| Radstand L_{RS} | 0,667 m |
| Spurweite vorne/hinten L_{SP} | 353,3/345,3 |
| Spurweite vorne BREIT L_{SP} | 381,3 mm (+28mm) |
| Abstand Vorderachse zu Koordinatenursprung Δx_{VR-0} | 0,3335 m |
| Bodenfreiheit e | 2 mm |
| Schlankheitsgrad λ | 2,57 |

6 Ergebnisse

Bevor näher auf die Ergebnisse von Messungen an den TERA-Fahrzeugen eingegangen wird, soll der Einfluss des Diffusoröffnungswinkels an der neu konstruierten Zusatzmessstrecke betrachtet werden. Dazu wurden an beiden Modellen Testreihen mit verschiedenen Öffnungswinkeln durchgeführt und die wirkenden Kräfte ermittelt sowie die parallele Anströmung überprüft. Zu Vergleichszwecken wurde die Zuströmung auch in der leeren Messstrecke ermittelt.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung des optimalen Winkels wurde bereits in Abschnitt 5.3 beschrieben. Für die leere Messstrecke liegt dieser bei $\gamma = 13^\circ$, um eine horizontale Anströmung zu erzielen. Weitere Untersuchungen zeigten, dass die Strömung durch die Präsenz eines Modells in der Messstrecke verändert wird und nicht mehr parallel zum Boden verläuft. Dies bedeutet, dass die Stauwirkung des Modells im Zuströmbereich bei gleichen Winkel mehr Luft unter dem Zusatzboden bedingt als der in der leeren Messstrecke. Um die Auswirkungen auf die an einem Modell wirkenden Luftkräfte unter diesen Bedingungen zu beurteilen, wurden Messungen mit unterschiedlichen Diffusoröffnungswinkeln durchgeführt. Durch eine Veränderung des Diffusorwinkels wird die Strömung unter dem erhöhten Zwischenboden beschleunigt bzw. verzögert. Bei einer Erhöhung des Luftmassenstroms auf der Unterseite des Zwischenbodens kommt es zu einer Ablenkung der Stromlinien nach unten. Dadurch wird das Fahrzeug unter einem negativen Anstellwinkel, d.h. von oben, angeströmt. Im umgekehrten Fall wird das Modell unter positivem Anstellwinkel angeströmt. Eine Beschleunigung wird durch Vergrößern des Öffnungswinkels hervorgerufen, während durch eine Verringerung von γ die Strömung verzögert wird. Aus Experimenten an Personenwagen geht nach Hucho [8] hervor, dass bei steigendem positiven Anstellwinkel auch die c_w - und c_a -Werte ansteigen. Bei Veränderungen hin zu negativen Anstellwinkeln ist hingegen eine Verringerung dieser Beiwerte zu erwarten.

Die Bild 6.1 bis Bild 6.3 zeigen den Einfluss des Diffusoröffnungswinkels auf die Widerstands- und Auftriebsbeiwerte der TERA-Modelle. Zu erkennen ist erwartungsgemäß eine eindeutige Abhängigkeit des c_w -Werts vom Öffnungswinkel. Die Verläufe des Auftriebsbeiwerts verändern sich dagegen nur wenig. Diese Bilder spiegeln die Wichtigkeit einer sorgfältigen Einstellung des Diffusors wider. Ferner ist die Abhängigkeit dieser Beiwerte von der Anströmgeschwindigkeit sehr gut zu erkennen.

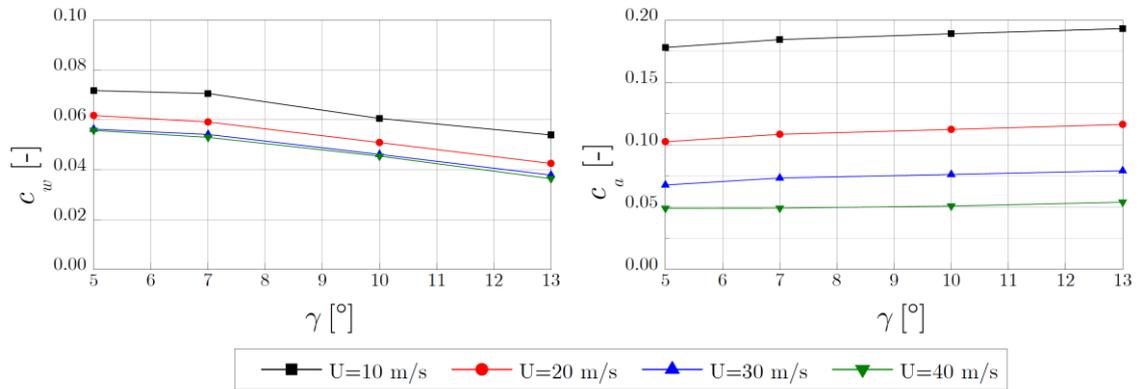


Bild 6.1: Abhängigkeit des Widerstands- und Auftriebsbeiwerts von der Diffusoröffnung; Modell Fennek bei symmetrischer Anströmung.

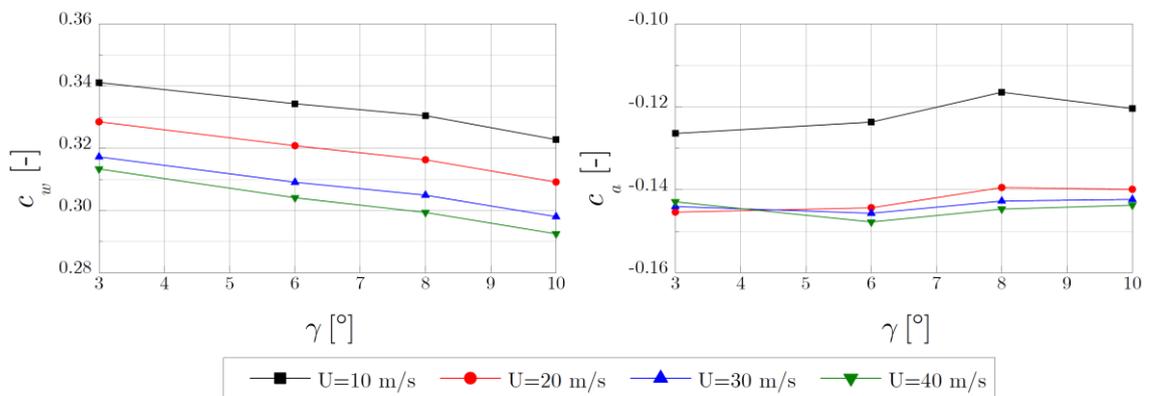


Bild 6.2: Abhängigkeit des Widerstands- und Auftriebsbeiwerts von der Diffusoröffnung; Modell Panther bei symmetrischer Anströmung.

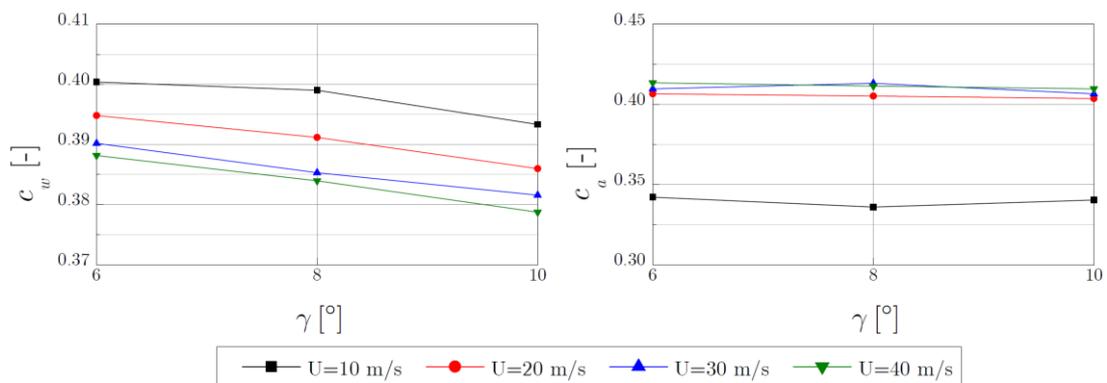


Bild 6.3: Abhängigkeit des Widerstands- und Auftriebsbeiwerts von der Diffusoröffnung; Modell Panther bei Schräganströmung ($\beta = 30^\circ$).

Die Versuche haben gezeigt, dass der optimale Öffnungswinkel für das Modell des Fennek bei $\gamma = 3^\circ$ bzw. für das Modell des Panther bei $\gamma = 8^\circ$ liegt.

6.1 Fennek

Der Fennek wurde erstmals im Jahr 2010 am ISW im Zuge einer Diplomarbeit [5] im 2m-Windkanal untersucht. Dabei wurden sowohl Drücke als auch Kräfte gemessen und mit Ergebnissen aus numerischen Simulationen verglichen. Für die aktuellen Messungen dienen die damaligen Ergebnisse in erster Linie als Referenz, um die einwandfreie Funktionsfähigkeit des neu konstruierten Zwischenbodens zu belegen. Da sich aufgrund einer veränderten Aufspannung einige Beiwerte bereits auf den ersten Blick stark veränderten, sind die Ergebnisse hier nochmals angeführt. Überdies konnten bei starker Schräganströmung Tendenzen erkannt werden, die aufgrund von Einschränkungen der maximalen Verdrehung des damaligen Messaufbaus nicht absehbar waren.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurde versucht, den Messaufbau aus dem Jahr 2010 möglichst genau zu reproduzieren. Allerdings konnten einige Parameter, besonders der Diffusorwinkel, nicht rekonstruiert werden, da keine genauen Aufzeichnungen über die damaligen Einstellungen existieren. Der größte Unterschied lag aber ohnehin an der Aufspannung des Modells. Diese erfolgte bei Feichtinger [5] mit vier Bolzen an den vorderen Radkästen, jeweils zwei auf jeder Seite. Der hintere Radkasten konnte aufgrund der zu kurzen Aufspannplattform im alten Zwischenboden nicht fixiert werden, was zu teilweise starken Schwingungen während der Messungen führte. Durch die Unterschiede in der Aufspannung hat sich auch die Position im Windkanal verändert und daraus resultierend auch eine Verschiebung der Fahrzeugkoordinatensysteme bezüglich des Waagenkoordinatensystems ergeben. Durch das frei stehende Heck wurden 2010 durch eine Öffnung (vgl. Bild 5.6 (b)) die Verbindungsschläuche von den Druckaufnehmern zu den Messdosen geführt. Bei den aktuellen Messungen handelt es sich um reine Kraftmessungen, somit besteht auch nicht die Notwendigkeit, Leitungen aus dem Modell herauszuführen. Trotzdem wurde die Öffnung am Heck bei den folgenden Vergleichsmessungen nicht geschlossen, um die früheren Messungen möglichst genau nachzubilden. Diese Konfiguration entspricht der Messreihe_3 aus Tabelle 5.1. Alle nachfolgenden Diagramme sind auf ein modellfestes Fahrzeugkoordinatensystem bezogen.

6.1.1 Widerstandskräfte

Bild 6.4 zeigt die Messergebnisse für den Widerstandsbeiwert c_w mit dem neukonstruierten Messstreckenboden in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit. Grundsätzlich trifft hier die Annahme eines schlanken Körper gut zu, was bei geringem Schiebewinkel vorwiegend Reibungswiderstand bedeutet (siehe Abschnitt 3.1.1).

Markant ist der starke Anstieg des Widerstands bei größeren Schiebewinkeln ($\beta > 10^\circ$). Außerdem ist zu erkennen, dass die c_w -Werte ab $\beta > 20^\circ$ bzw. $\beta < -20^\circ$ wieder stark abfallen, mit Ausnahme der Messung mit der geringsten Anströmgeschwindigkeit ($U_\infty = 10 \text{ m/s}$). Diese zeigen im Vergleich zu den anderen eine andere Tendenz, die auf die Reynoldsabhängigkeit von Ablösungen (vgl. 3.1.3) zurückzuführen ist. Im Vergleich dazu sind in Bild 6.5 die Ergebnisse von Feichtinger [5] dargestellt. Diese zeigen einen weitgehend ähnlichen Verlauf, allerdings existieren Ergebnisse nur in einem Winkelbereich von $-25^\circ < \beta < +25^\circ$ mit einer maximalen Anströmgeschwindigkeit von $U_\infty = 30 \text{ m/s}$. Es ist anzumerken, dass der Schiebewinkel bei Feichtinger [5] mit α bezeichnet ist. Grundsätzlich ist der c_w -Wert der aktuellen Messungen in etwa um $\Delta c_w = 0,01$ niedriger. Eine Ursache für diese Differenz kann die beschriebene Abhängigkeit des Widerstandsbeiwerts vom Diffusorwinkel sein. Dies ist naheliegend, da über den gesamten Winkelbereich ein niedrigerer Widerstand auftritt.

Berücksichtigt man allerdings, dass die Wägezellen der Windkanalwaage eine Genauigkeit von $\pm 0,05\%$ des Endwerts haben, ergibt das bei einem Messbereich von 200 kg eine mögliche Messungenauigkeit von $\pm 0,98 \text{ N}$. Betrachtet man die Größen der Kräfte, besonders jene der Widerstandskraft – etwa bei $\beta = 0^\circ$ – zwischen $0,44$ und $5,23$ Newton, darf die Messunsicherheit nicht außer Acht gelassen werden. Die tatsächlichen Ungenauigkeiten sind zwar deutlich geringer als die Spezifikation, aber die Unterschiede zu den Messungen von Feichtinger [5] könnten durchaus auch auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sein.

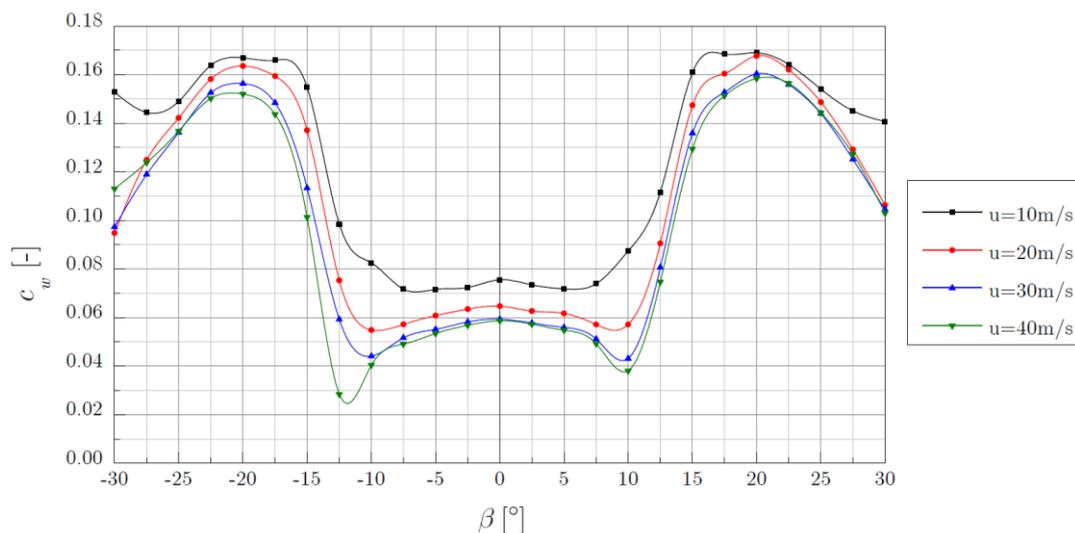


Bild 6.4: Widerstandsbeiwert des Fennek bei offenem hinterem Radkasten

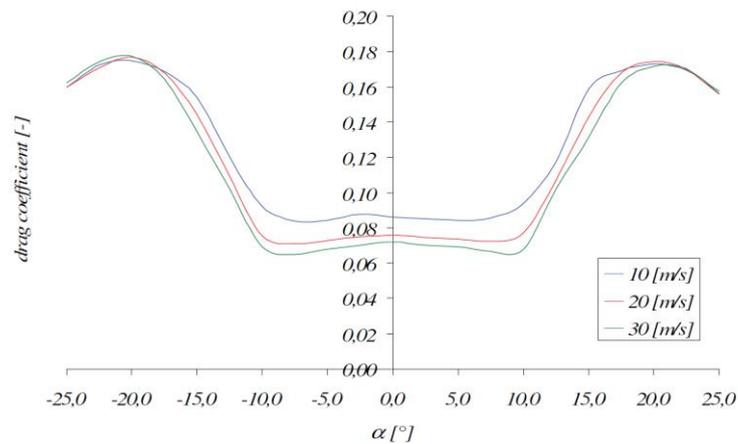


Bild 6.5: Widerstandsbeiwert des Fennek; aus [5]

6.1.2 Auftriebskräfte

Der Verlauf des Auftriebsbeiwerts ist in Bild 6.6 zu sehen. Wie auch beim Widerstandsbeiwert ist bei kleinen Schiebewinkeln eine deutliche Abhängigkeit von der Reynoldszahl erkennbar, die mit steigendem β abnimmt, bis die Verläufe praktisch deckungsgleich sind. Einzig die Kurve für $U_\infty = 10 \text{ m/s}$ steigt ab $\beta > 25^\circ$ deutlich stärker an als die restlichen Kurven. Ursache dafür ist die Abhängigkeit von der Reynoldszahl wie beim c_w -Wert. Vergleicht man die alten und die aktuellen Messergebnisse, so zeigen die aktuellen Daten wiederum etwas geringere Werte (Bild 6.7) als in der Arbeit von Feichtinger [5].

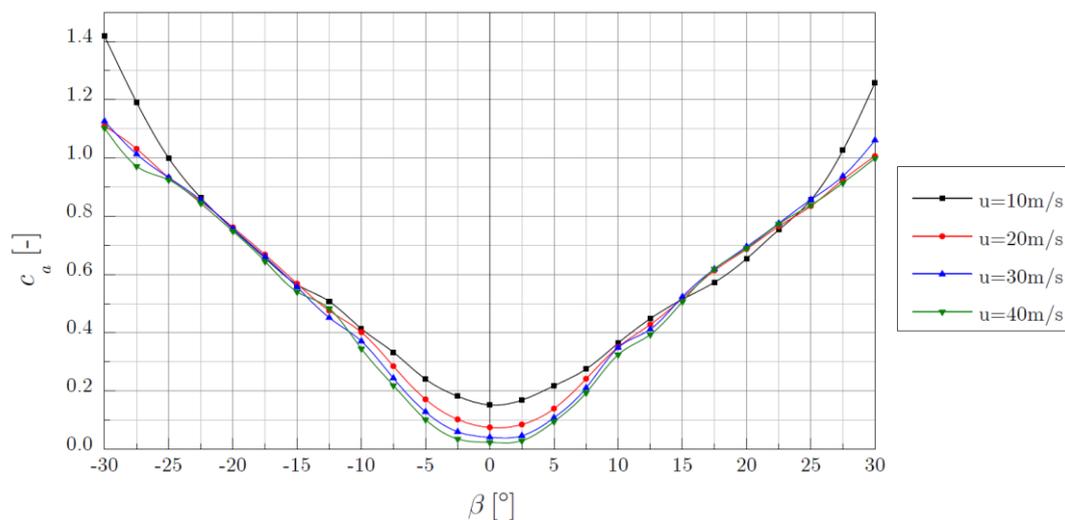


Bild 6.6: Auftriebsbeiwert des Fennek bei offenem hinterem Radkasten

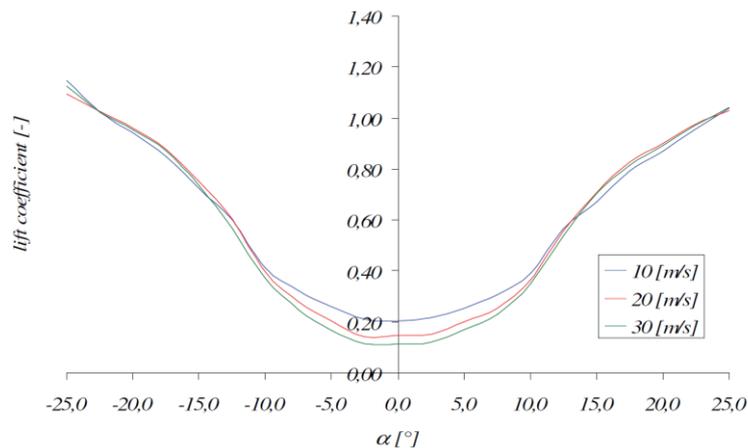


Bild 6.7: Auftriebsbeiwert des Fennek; aus [5]

Aus den gezeigten Bildern geht hervor, dass auch die Ergebnisse für den Auftriebsbeiwert gut miteinander vergleichbar sind. Wenn auch auf unterschiedlichem Niveau, weisen alle Verläufe die gleichen Charakteristiken auf. Bei den aktuellen Messungen wurde der Diffusorwinkel, der eine Ursache für die Unterschiede zu den alten Messdaten sein kann, bei eingebautem Modell bestimmt. Interessant ist, dass sich das auskragende Heck der alten Aufspannung mit undefiniertem Bodenabstand so gut wie überhaupt nicht auf die einzelnen Beiwertverläufe auswirkt. Die weiteren Messergebnisse des Fennek finden sich im Anhang C. Diese sind weitgehend unabhängig von Anströmgeschwindigkeiten und sind gut mit den Daten von Feichtinger [5] vergleichbar.

Zusätzlich zu den Reproduktionsmessungen zur Verifizierung des vorhandenen Datensatzes wurden Messungen mit geschlossenem, hinterem Radkasten durchgeführt (vgl. Tabelle 5.1). Zu erwarten war dabei vor allem eine Veränderung des Auftriebs. Die Ergebnisse in Bild 6.8 bestätigen diese Erwartungen, auch wenn der Einfluss sehr gering ist. Der c_a -Verlauf ist etwas über dem Niveau der Messungen mit Öffnung. Diese Veränderungen können allerdings auch von einer veränderten Aufspannsituation resultieren, da der notwendige Umbau am Modell nicht direkt in der Messstrecke erfolgen konnte. Für die weiteren Ergebnisse dieser Messreihe sei auf den Anhang C verwiesen.

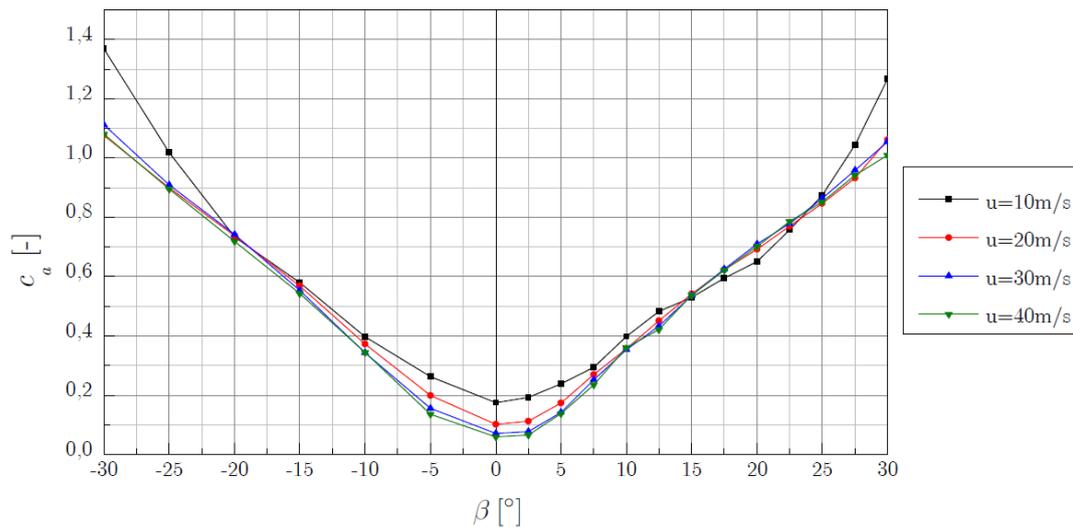


Bild 6.8: Auftriebsbeiwerte des Fennek mit geschlossenem hinterem Radkasten

6.1.3 Unterschied der Aufspannungen

Wie früher erwähnt, änderte sich aufgrund der Neukonstruktion auch die Position des Fennek bezüglich der Windkanalwaage. Dadurch verschieben sich die Achsen y_M und z_M (vgl. Bild 5.1), was sich wiederum auf die Bildung der Momente um diese Achsen auswirkt. Der Koordinatenursprung des Fennek hat sich in der neuen Zusatzmessstrecke gegenüber der alten um $\Delta x = 0,1634 \text{ m}$ in Richtung Düse verschoben. Bild 6.9 zeigt den Verlauf des Nickmoments der aktuellen Messungen, Bild 6.10 jenen der alten Messung.

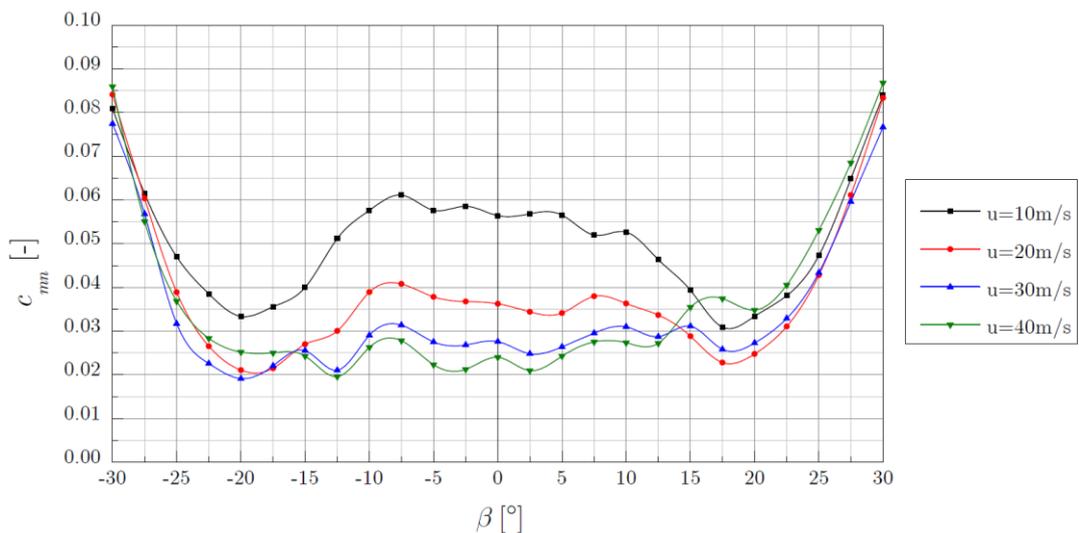


Bild 6.9: Nickmomentenbeiwert des Fennek bei offenem hinterem Radkasten

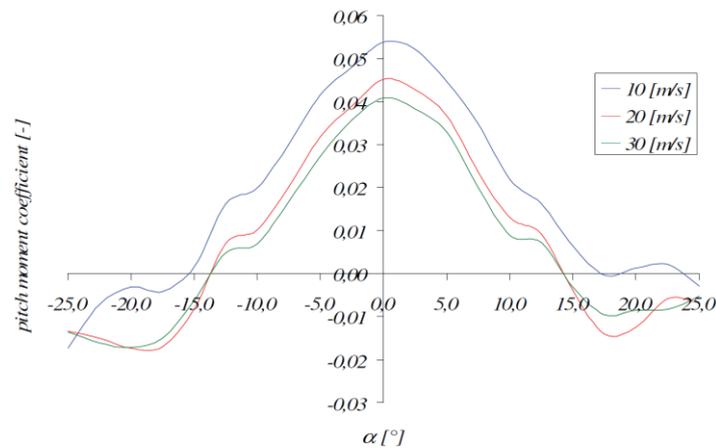


Bild 6.10: Nickmomentenbeiwert des Fennek; aus [5]

Führt man eine Koordinatentransformation der neu gemessenen Daten bezüglich einer um $\Delta x = 0,1634 \text{ m}$ verschobenen z-Achse durch, folgen die in Bild 6.11 gezeigten Daten. Diese Kurve ist dem Verlauf nach mit jener des alten Zusatzbodens gut vergleichbar. Die Unterschiede in den Beiwerten sind dadurch erklärbar, dass das Nickmoment nach Glg. (5.6) aus dem Auftrieb an der Vorderachse sowie dem Widerstand errechnet wird. Da bei den aktuellen Messungen der Auftrieb und der Widerstand bereits Abweichungen gegenüber den alten Messungen aufweisen, resultiert daraus auch eine Abweichung des Nickmoments.

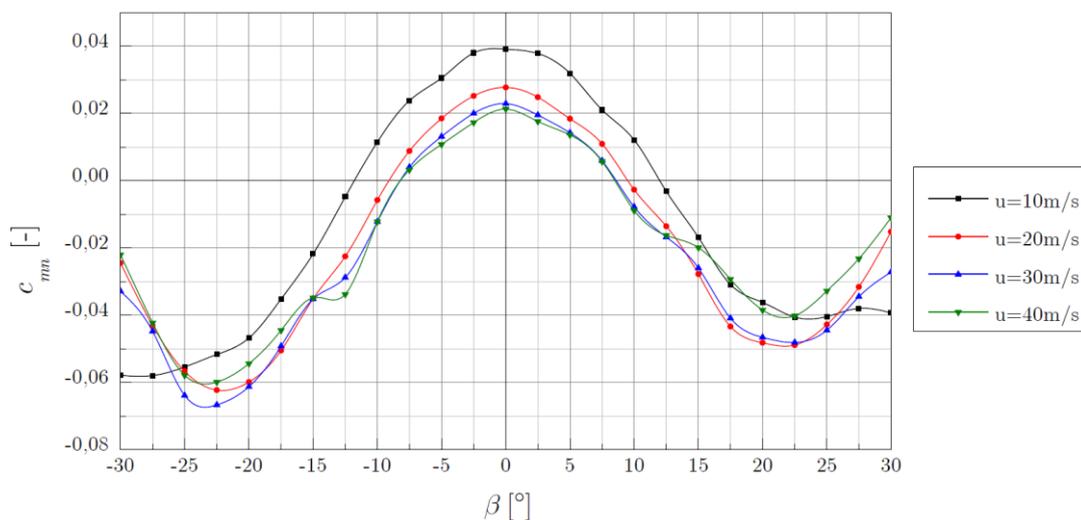


Bild 6.11: Nickmoment nach Koordinatentransformation

Abschließend ist anzumerken, dass sich die Neukonstruktion bei den Messungen am Fennek bewährt hat. Durch den zusätzlichen Auflagebolzen am hinteren Rad blieb das Modell fest eingespannt und es traten keine ungewollten Schwingungen auf. Lediglich bei Messungen mit einer Anströmgeschwindigkeit von $U_\infty = 40 \text{ m/s}$ und unter größeren Schiebewinkeln traten Probleme auf, zum Teil erkennbar in den

Beiwertverläufen (besonders bei c_w -Wert). Als Folge der dabei auftretenden Kräfte kippte das Modell trotz Sicherung mit Schrauben zur Seite, wodurch mehrmals die Messungen wiederholt werden mussten.

6.2 Panther

Die Idee hinter dem Konzept des Panther war es, ein Fahrzeug für den städtischen Verkehr zu entwickeln. Deswegen liegt die Auslegegeschwindigkeit bei moderaten $U = 10 \text{ m/s} = 36 \text{ km/h}$ womit sich aus dem Modellmaßstab und dem Gesetz der Reynolds-Ähnlichkeit (Glg. (3.28)) eine Anströmgeschwindigkeit für die Experimente im Windkanal von $U_\infty = 30 \text{ m/s}$ ergibt. Um auch das Verhalten bei anderen Reynoldszahlen zu erfassen, wurden Messungen mit höheren bzw. niedrigeren Geschwindigkeiten durchgeführt. Untersuchungen mit $U_\infty = 10 \text{ m/s}$ konnten keine brauchbaren Ergebnisse liefern. Rechnet man diese Anströmgeschwindigkeit wiederum auf die Fahrgeschwindigkeit um, folgen $U = 3,33 \text{ m/s} = 12 \text{ km/h}$. Da aerodynamische Kräfte in diesem Fahrbereich ohnehin nicht relevant sind, wurden diese dann bei den Messungen auch nicht mehr explizit erfasst.

Im Laufe der Entwicklung des Panther wurden immer wieder Optimierungen durchgeführt, die im Rahmen dieser Arbeit überprüft wurden. Wie bereits aus Tabelle 5.3 hervorgeht, handelt es sich im Wesentlichen um drei Konfigurationen:

- Die erste stellt die Ausgangssituation dar, wie sie am Prototyp realisiert wurde. Dabei handelt es sich um ein Modell mit den Abmessungen aus Bild 5.7 und montierten Verkleidungen der Vorderräder (vgl. Bild 5.8)
- Die zweite (optimierte) Variante weist eine um $\Delta L_{sp} = +28 \text{ mm}$ verbreiterte Spur an der Vorderachse auf. Die Radverkleidungen sind in dieser Konfiguration weiterhin montiert.
- Bei der dritten Ausführung bleibt die Spurbreite gleich wie in der vorhergehenden Ausführung, allerdings sind die Radkästen demontiert.

Zusätzlich wurde hier versucht, einen eventuellen Einfluss des fast unvermeidlichen Spalts unter den Rädern zu ermitteln. Dazu wurde versucht, den Spalt durch einen aufgeklebten Papierstreifen abzudecken. Krestel [11] hat in seiner Diplomarbeit am ISW zu diesem Thema ausführliche Untersuchungen durchgeführt.

Der Panther ist trotz eines Längenverhältnisses von $\lambda = 2,57$ eher den stumpfen Körpern zuzuordnen. Dies ist vor allem durch die freistehenden Räder sowie in der Form des Hecks begründet. Darum ist zu erwarten, dass der Widerstandsbeiwert nicht

wesentlich von der Reynoldszahl abhängt und großteils aus Druckwiderstand resultiert, besonders bei der Variante ohne Radhaus.

6.2.1 Ergebnisse der Originalversion

In Bild 6.12 ist der Widerstandsbeiwert des ursprünglichen Prototyps dargestellt. Entgegen den Erwartungen ist eine Abhängigkeit von der Reynoldszahl über alle gemessenen Schiebewinkel zu erkennen. Ferner ist eine Asymmetrie der maximalen Beiwerte deutlich sichtbar. Da die Beiwerte für Seitenkraft sowie Roll- und Giermoment bei $\beta = 0^\circ$ nahezu null sind (vgl. Ergebnisse im Anhang C), kann eine fehlerhafte Einspannung ausgeschlossen werden. Außerdem zeigt diese große Asymmetrie nur der Verlauf des Widerstandsbeiwerts. Interessant ist zudem die kleine Spitze bei $\beta \approx \pm 15^\circ$, bei dem der c_w -Wert kurz abfällt, um danach wieder anzusteigen.

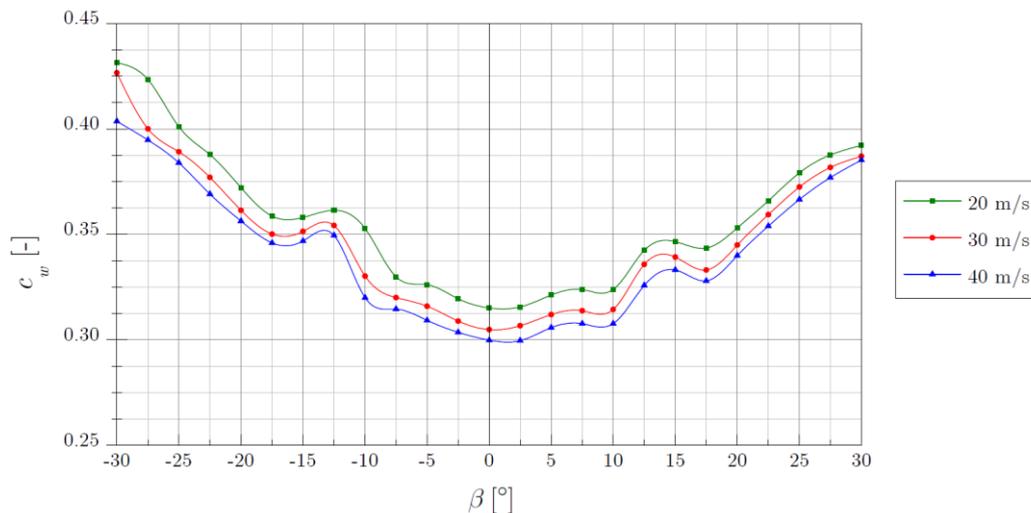


Bild 6.12: Widerstandsbeiwert des Panther mit enger Spur und Radhaus

Wie bereits beim Fennek wird hier nur auf die Beiwerte von Widerstand und Auftrieb genauer eingegangen, die weiteren Ergebnisse sind dem Anhang C zu entnehmen. Auch der c_a -Wert in Bild 6.13 zeigt kleine Schwankungen im Bereich von $\beta \approx \pm 15^\circ$. Diese sind aber weit weniger ausgeprägt als jene des c_w -Werts. Im Vergleich zum Widerstand sind keine ausgeprägten Asymmetrien der Maximalwerte erkennbar. Im Bereich von $-10^\circ < \beta < +10^\circ$ ist der Auftriebsbeiwert negativ, das heißt, der Panther erfährt Abtrieb.

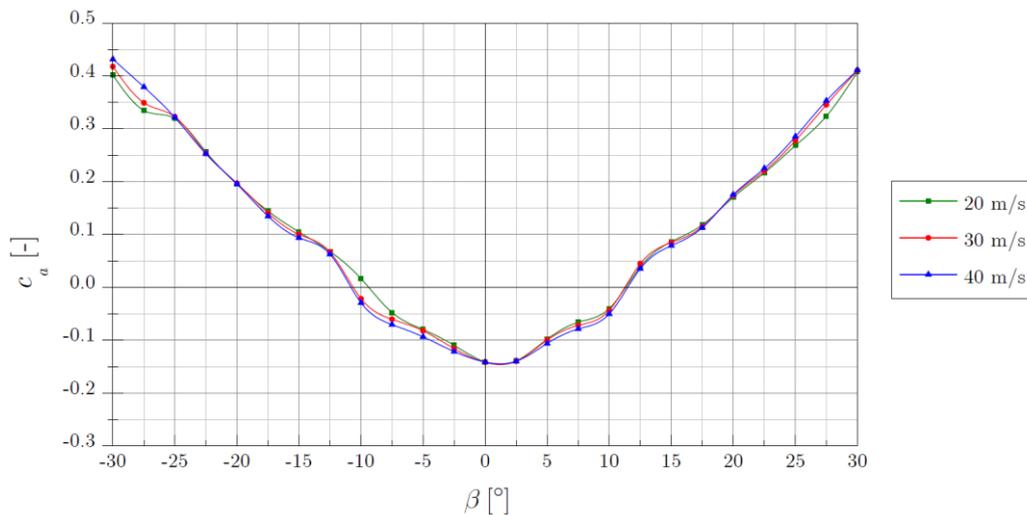


Bild 6.13: Auftriebsbeiwert des Panther mit enger Spur und Radhaus

6.2.2 Ergebnisse der optimierten Version

Die zweite Messreihe wurde mit verbreiterter Spur und montierten Radhäusern an der Vorderachse durchgeführt. Die Ergebnisse für Widerstand und Auftrieb sind wiederum in den folgenden Bild 6.14 und Bild 6.15 dargestellt. Die mit Kreuzen markierten Messdaten stellen dabei die Ergebnisse der Versuche mit geschlossenem Spalt zwischen Rad und Boden dar. Erreicht wird dies mit einem auf die Radunterseite aufgeklebten Papierstreifen (Bild 5.9 (c)). Dadurch wird die Unterdruckspitze unter dem Rad verhindert (vgl. Abschnitt 3.3) und es kommt zu einer Erhöhung des Auftriebs bzw. in diesem Fall zu einer Verringerung des Abtriebs (Bild 6.15). Zu den Versuchen mit den angebrachten Papierstreifen ist noch anzumerken, dass es aufgrund der Aufspannungsbolzen nicht möglich war, diese exakt an jener Stelle anzubringen, an der das Fahrzeug am Boden stehen würde. Darum wurden die Streifen ein wenig vor den Bolzen mit Klebestreifen angeklebt.

Der Widerstandsbeiwert hat sich durch die Spurverbreiterung (Bild 6.14) für $\beta = 0^\circ$ und $U_\infty = 30 \text{ m/s}$ von $c_w = 0,305$ auf $c_w = 0,266$ reduziert. Diese Differenz von $\Delta c_w \approx 0,04$ trifft in etwa gleichermaßen auf alle Geschwindigkeiten und Schiebewinkel zu. Interessant ist, dass auch der Auftriebsbeiwert zirka um denselben Wert niedriger liegt. Dieser sinkt von $c_a = -0,141$ auf $c_a = -0,179$ bei $\beta = 0^\circ$ und $U_\infty = 30 \text{ m/s}$. Allerdings gilt das nicht für den gesamten Schiebewinkelbereich, denn ab $\beta \approx \pm 15^\circ$ liegen beide Verläufe in etwa auf demselben Niveau. Bei symmetrischer Anströmung erzeugt der Panther mit breiter Spur mehr Abtrieb und gleichzeitig weniger Luftwiderstand als der Prototyp im Originalzustand.

Durch die Abdeckung des Spaltes steigen der Widerstand wie auch der Auftrieb etwas an und zwar auf $c_w = 0,289$ bzw. $c_a = -0,141$. Dies entspricht auch den Tendenzen für das stationäre Rad aus Bild 3.11. Auffällig ist außerdem, dass diese Ergebnisse geringere Differenzen zeigen als ohne Papierstreifen. Die Abhängigkeit des Widerstands von der Reynoldszahl resultiert demnach sicher deutlich von der Umströmung der Räder. Die Annahme, der Panther sei eher ein stumpfer als ein schlanker Körper, wird dadurch bestätigt. Messungen mit verschlossenem Spalt zwischen Rad und Fahrbahn wurden nur für symmetrische Anströmung durchgeführt. Bei Schräganströmung würden die Papierstreifen umströmt werden und dadurch die Messwerte sicher deutlicher beeinflussen. Eine Möglichkeit, den Spalt auch bei schiefer Zuströmung abzudichten, wären beispielsweise Schaumstoffelemente. Allerdings müssen diese alle Bewegungen des Modells mitmachen, um keine zusätzlichen Kräfte einzuleiten. Dies gilt im Übrigen auch für das Anbringen der Papierstreifen.

Die weiteren Beiwerte sind durchwegs unabhängig vom Spalt unter den Rädern, lediglich das Nickmoment zeigt eine leichte Abhängigkeit. Da sich dieses aber aus Widerstand und Auftrieb zusammensetzt, war das zu erwarten.

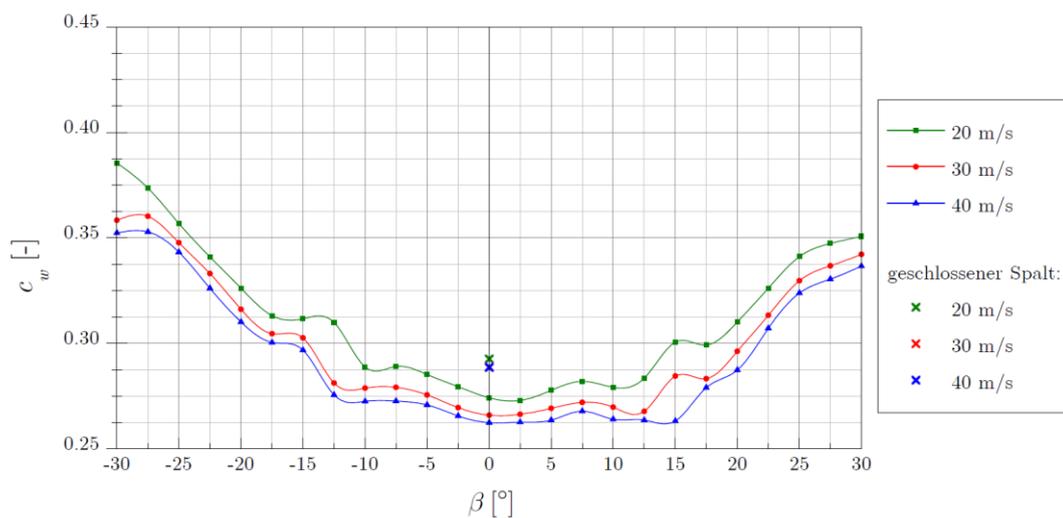


Bild 6.14: Widerstandsbeiwert des Panther mit breiter Spur und Radhaus

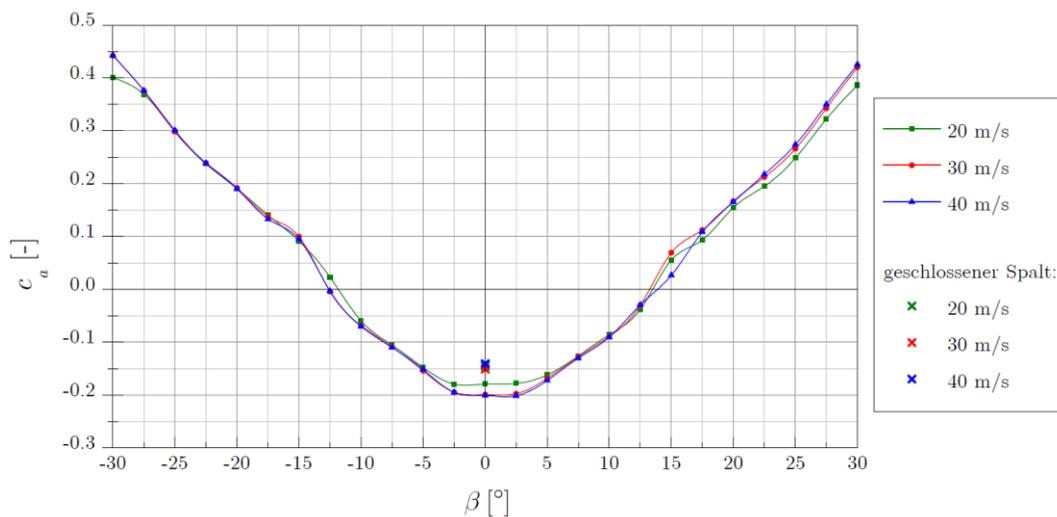


Bild 6.15: Auftriebsbeiwert des Panther mit breiter Spur und Radhaus

6.2.3 Einfluss der vorderen Radverkleidungen

Die dritte Messreihe sollte die Einflüsse der vorderen Radverkleidung untersuchen. Der ohne Radhaus gemessene c_w -Wert (Bild 6.16) zeigt bei kleinen Schiebewinkeln eine geringere Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit als beide Varianten (enge und breite Spur) mit Radhäusern. Die markante Charakteristik bei $\beta \approx \pm 15^\circ$ der vorhergehenden Messungen findet sich am Panther ohne Radkästen nicht in dieser ausgeprägten Form. Allerdings schwankt der Widerstandsverlauf, besonders bei $U_\infty = 20 \text{ m/s}$, im Bereich $-10^\circ < \beta < -20^\circ$ bzw. $+10^\circ < \beta < +20^\circ$ wesentlich stärker als bei den vorher gezeigten Schaubildern und auch der Einfluss bereits kleiner Schiebewinkel ist deutlicher. Zusätzlich hat sich auch das gesamte Widerstandsniveau wieder erhöht, von den bereits erwähnten $c_w = 0,266$ der zweiten Messreihe auf $c_w = 0,278$ (bei $\beta = 0^\circ$ und $U_\infty = 30 \text{ m/s}$), was allerdings noch immer deutlich unter den Werten mit der schmälere Spurweite liegt ($c_w = 0,305$). Die Größenordnung der c_w -Werte bei maximalen Schiebewinkeln $\beta = \pm 30^\circ$ ist, bis auf $U_\infty = 20 \text{ m/s}$ am negativen Ende, in etwa die gleiche. Der größte Widerstand zeigt sich aber schon vorher bei $\beta = \pm 27,5^\circ$.

Besonders interessant sind allerdings die Ergebnisse für die Versuche mit verschlossenem Spalt (Bodenfreiheit von $e = 0 \text{ mm}$). Diese liegen nur geringfügig über den Messwerten ohne Papierstreifen und sind im Vergleich zu den Messungen mit Radkästen nahezu identisch. Für $U_\infty = 30 \text{ m/s}$ ergibt sich $c_w = 0,289$. Es muss an dieser Stelle aber erwähnt werden, dass die Drehung der Räder nicht beachtet wurde. Drehen sich die Räder, verschiebt sich der Ablösepunkt am Rad weiter nach vorne und das Totwassergebiet würde sich vergrößern, woraus auch eine Erhöhung des Widerstandes resultiert. Allerdings gilt auch am rotierenden Rad die Haftbedingung und

deswegen kann der Punkt der Ablösung nicht auf der Reifenoberfläche liegen, sondern muss vielmehr in der Strömung liegen. Man spricht in diesem Fall von einem „freien Staupunkt“.

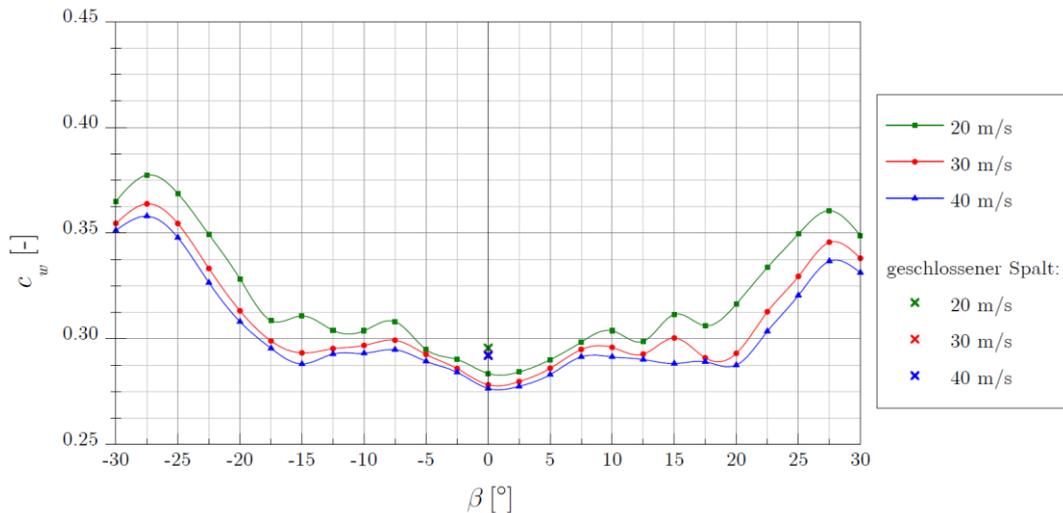


Bild 6.16: Widerstandsbeiwert des Panther mit breiter Spur und ohne Radhaus

Der Auftrieb (Bild 6.17) verhält sich im Grunde wie die bereits besprochenen c_a -Verläufe. Der Wert des größten Auftriebs liegt bei $\beta = \pm 30^\circ$ und quantitativ etwas unter den bereits bekannten Verläufen. Wie bereits erwähnt, generiert der Panther bei symmetrischer Anströmung Abtrieb, der bei $c_a = -0,079$ bzw. mit angebrachten Papierstreifen bei $c_a = -0,057$, liegt. Dieser negative Auftrieb geht aber etwas früher wieder in positiven Auftrieb über und zwar bereits mit $\beta = \pm 10^\circ$, wo der Auftrieb praktisch null ist.

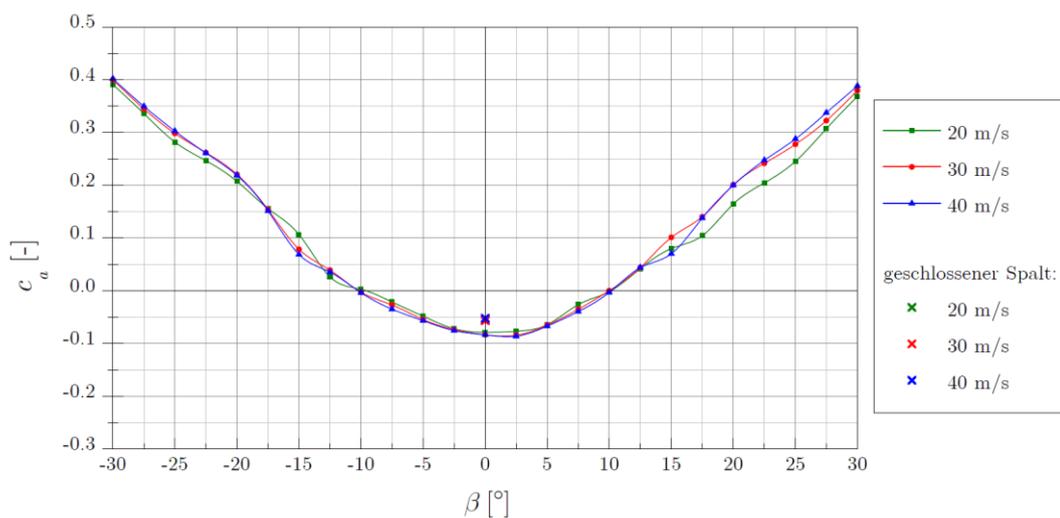


Bild 6.17: Auftriebsbeiwert des Panther mit breiter Spur und ohne Radhaus

Aus dem bisherigen ist zu erkennen, dass lediglich durch die Verbreiterung der Spur der Widerstandsbeiwert deutlich gesenkt werden konnte. Zudem steigt er in dieser

Konfiguration bei kleinen Schiebewinkeln $-12,5^\circ < \beta < +12,5^\circ$ weniger stark an. Durch diese Optimierungsmaßnahme wurde zugleich auch der maximale Abtrieb nahezu verdoppelt sowie das Nickmoment bei symmetrischer Anströmung weitgehend eliminiert. Es zeigt sich allerdings auch, dass die Beiwerte bei großen Schiebewinkeln nur unwesentlich von den vorgenommenen Optimierungsmaßnahmen beeinflusst werden.

Betrachtet man die absoluten Kräfte, liegen diese im Vergleich zum Fennek wesentlich höher. Je nach Konfiguration des Panther wirken bei $\beta = 0^\circ$ Widerstandskräfte zwischen $6,5 N < W < 28,5 N$. Die niedrigste Kraft tritt bei $U_\infty = 20 m/s$ mit breiter Spur und montiertem Radkasten auf, dort ist auch der c_w -Wert am kleinsten. Der größte Wert bei symmetrischer Anströmung wirkt auf die Originalkonfiguration mit schmaler Spur und mit maximaler Anströmgeschwindigkeit von $U_\infty = 40 m/s$. Aus diesen Zahlen wird deutlich, dass die Widerstandskräfte am Panther nicht im selben Ausmaß von Messungenauigkeiten beeinflusst werden wie beim Fennek. Für die Auftriebskräfte gilt etwa Gegenteiliges, da sich am Panther bei Schiebewinkeln von $\beta \approx 10^\circ$ der Abtrieb in Auftrieb umkehrt. Die Kräfte in diesem Bereich sind sehr klein und Messungenauigkeiten der Waage können größere Auswirkungen zeigen. Vergleicht man die Auftriebsbeiwerte beider TERA-Fahrzeuge, fallen die niedrigeren Werte des Panther auf. Dies spiegelt sich auch in den absoluten Auftriebskräften wieder, da die Stirnfläche der Modelle annähernd gleich ist.

Auf den Verlauf der Seitenkräfte wird an dieser Stelle nicht genauer eingegangen. Bei symmetrischer Anströmung sollten diese nicht vorhanden sein, sofern das Modell und die Strömung symmetrisch sind. Auch auf eine detailliertere Betrachtung der Momente wird verzichtet, da sich diese aus den Kräften ableiten. Mit der Seitenkraft, dem Gier- und dem Rollmoment lässt sich einfach überprüfen, ob das Modell bzw. die Aufspannung symmetrisch ist.

6.2.4 Strömungsvisualisierungen

Im nächsten Schritt wurde die Strömung um den Panther visualisiert. Ziel dieser Untersuchungen war es, Ablösungen sowie die eventuelle Bildung von Wirbelstrukturen zu ermitteln, um die möglichen Ursachen für wirkende Kräfte zu erkennen. Zugleich wird damit auch ein Vergleich mit Computersimulationen hinsichtlich des Strömungsverlaufs zumindest qualitativ möglich. Die Strömung wurde für die Konfigurationen des Panther mit verbreiteter Spurweite (mit und ohne Verkleidung der Vorderräder) bei Winkeln zwischen $-30^\circ < \beta < +30^\circ$ in Schritten von $\Delta\beta = 10^\circ$ visualisiert. Als ideales Werkzeug dafür hat sich, wie bei der

Einstellung der parallelen Anströmung, die Fadensonde erwiesen. Dabei konnten die auftretenden Strömungserscheinungen bei einer Anströmgeschwindigkeit von $U_\infty \approx 15 \text{ m/s}$ bestens erkannt und Filmaufnahmen davon gemacht werden. Diese Aufnahmen sind auf der DVD zu finden, die dieser Arbeit beigelegt ist. Eine Sichtbarmachung mit Rauch war weniger erfolgreich, da das Modell grau ist, und auftretende Wirbelstrukturen nicht erkannt werden konnten.

Bild 6.18 zeigt qualitativ, wie die Stromlinien um den Vorderteil des Panther verlaufen. Die Strömung wird eingeeengt, überströmt das Radhaus und es kommt zur Ausbildung eines Längswirbels, der Widerstand verursacht. Durch die Verbreiterung der Spur bleibt dem Luftstrom zwischen Rad und Grundkörper mehr Platz und der sich ausbildende Wirbel ist wesentlich schwächer.



Bild 6.18: Umströmung der Front des Panther

In Bild 6.19 ist der Längswirbel am Radhaus schematisch dargestellt. Die Drehrichtung erfolgt nach außen, d.h. für die linke Fahrzeugseite in Fahrtrichtung gesehen, gegen den Uhrzeigersinn. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich dieser Wirbel bis zum hinteren Fahrzeugbereich fortsetzt. Ohne Radhaus ist der Wirbel deutlich weiter nach hinten feststellbar als mit montierter Verkleidung. Dadurch erklärt sich auch der Unterschied im Widerstand dieser beiden Konfigurationen.

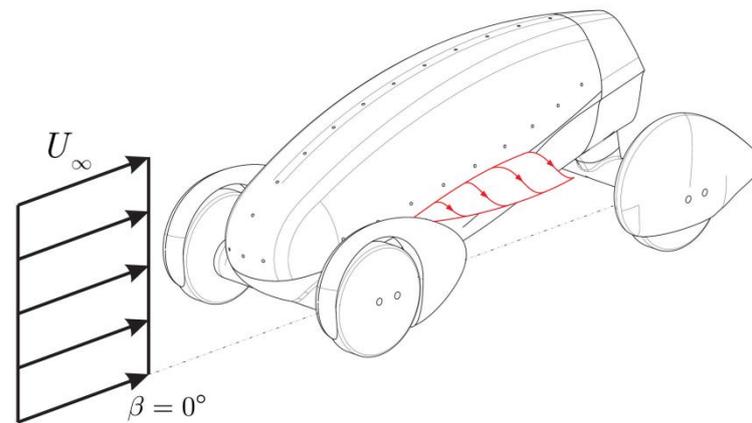
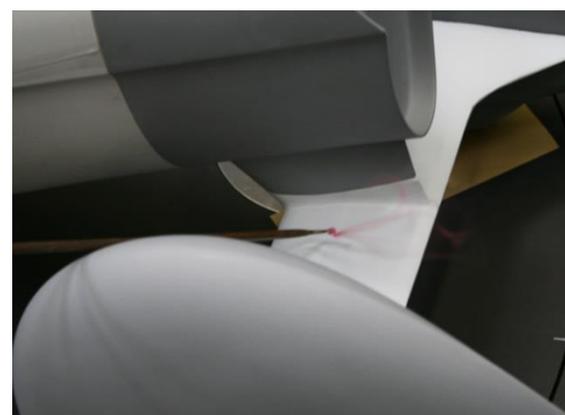


Bild 6.19: Wirbel am Radhaus bei gerader Anströmung

Auch mit vorderem Radhaus zeigt die hintere Radverkleidung deutliche Ablösungen (Bild 6.20 (a)). Offensichtlich ist hier die Strömung nicht in der Lage, den Rundungen der Körperkontur zu folgen. Es kommt zur Ablösung und verursacht dadurch zusätzlichen Widerstand. Um diesem ungünstigen Strömungsverlauf entgegenzuwirken, existieren grundsätzlich zwei Möglichkeiten: Die erste besteht darin, die Form des Hecks zu optimieren, d.h. konkret zu verlängern, und so den Widerstand zu senken. Oder man nimmt den erhöhten Widerstand in Kauf und hat somit größere Freiheiten im Design. Eine dritte Möglichkeit wäre eventuell, die Anströmbedingungen der hinteren Verkleidung zu verbessern. Dazu bedarf es allerdings Änderungen im vorderen Fahrzeugbereich. Bild 6.20 (b) zeigt, dass auch die Strömung am hinteren Radträger bereits bei symmetrischer Anströmung von Ablösungen geprägt ist. Als Ursache sind wiederum die Längswirbel der vorderen Radverkleidungen zu nennen.



(a)



(b)

Bild 6.20: (a): Strömung um die hintere Radverkleidung ($\beta=0^\circ$); (b): Strömung um Radträger ($\beta=0^\circ$)

Betrachtet man die Verläufe der c_w -Werte im Allgemeinen, ist ein markanter Anstieg bei höheren Schiebewinkeln zu erkennen. Dieser Anstieg ist auf die Strömung am Rumpf des Panther zurückzuführen. Dabei bildet sich ein starker Wirbel an der Leeseite

des Modells aus und verursacht dadurch eine Erhöhung des Druckwiderstands. In Bild 6.21 ist dieser Wirbel schematisch dargestellt. Die Ablösekannte verläuft in etwa im oberen Drittel, ab der Rumpfmittle bis hin zum Heck. Bereits bei einer Schräganströmung von $\beta = 10^\circ$ konnten erste Anzeichen dieses Wirbels erkannt werden, wenngleich diese noch nicht sehr ausgeprägt waren. Mit steigendem Schiebewinkel nimmt auch die Intensität der Längswirbel an den Radhäusern des windabgewandten Vorderrades ab. Am luvseitigen Rad kehrt sich die Drehrichtung des bei symmetrischer Anströmung nach außen drehenden Wirbels um. Durch das schräg gestellte Modell wirken sich diese Wirbel aber nicht auf die Heckpartie des Panther aus. Allerdings treten eben aufgrund der schrägen Anströmung ohnehin Wirbel an den hinteren Radverkleidungen auf.

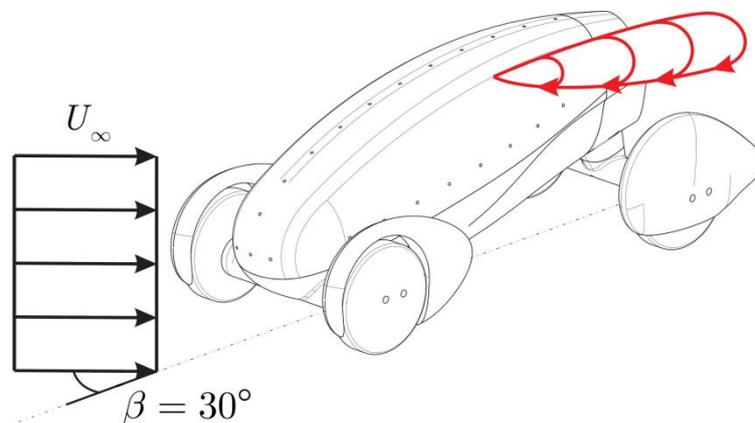


Bild 6.21: Wirbel bei schräger Anströmung ($\beta=30^\circ$)

Abschließend kann festgestellt werden, dass durch die Verbreiterung der vorderen Spur bereits ein großer Schritt in Richtung Widerstandsminimierung getan wurde. Weitere Senkungen des c_w -Werts könnten eventuell durch Optimierung von Details erzielt werden. Die Option ohne Radhäuser zeigt zwar auf den ersten Blick kaum Unterschiede im Widerstandsbeiwert, insbesondere mit angeklebten Papierstreifen, durch die stehenden Räder kann aber nicht davon ausgegangen werden, dass diese Variante auch am realen Fahrzeug erfolgversprechend ist.

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Aufbau zur Reduktion der Einflüsse der Bodengrenzschicht im 2m-Windkanal des ISW konstruiert. Das Verlangen nach Kenntnis der absoluten aerodynamischen Kräfte und Momente eines Fahrzeugs macht einen solchen Versuchsaufbau notwendig, um die realen Bedingungen möglichst genau nachbilden zu können, wenn kein bewegter Boden möglich ist.

Die Grenzschichtdicke ist proportional zur Lauflänge entlang einer festen Wand (Boden). Durch eine erhöhte Zusatzmessstrecke, die über der entstehenden Bodengrenzschicht in der Windkanalmessstrecke installiert wird, konnte deren Einfluss reduziert werden. Der Grenzschichteinfluss wird dabei allerdings nicht komplett eliminiert, da sich auch am erhöhten Boden eine neue Grenzschicht ausbildet. Somit werden Messungen an verkleinerten Modellen, wie sie am ISW üblich sind, deutlich weniger stark beeinflusst.

Die bei der realen Straßenfahrt durch den natürlichen Wind verursachte Schräganströmung kann durch Verdrehen der gesamten Aufspannvorrichtung simuliert werden. Der einstellbare Winkelbereich wurde mit $-30^\circ < \beta < +30^\circ$ und einer Schrittweite von $\Delta\beta = 2,5^\circ$ gewählt. Dies entspricht einem größeren Bereich, als für die meisten Fahrzeuge notwendig ist. Da sich die reale Anströmrichtung aus Seitenwind und Fahrwind zusammensetzt, resultiert eine Schräganströmung mit derart großen Schiebewinkeln nur bei sehr geringen Fahrgeschwindigkeiten, bei denen die aerodynamischen Kräfte eher nicht bestimmend sind.

Aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten sowie der empfindlichen Aerodynamik der Niedrigenergiefahrzeuge von TERA sind solche Schiebewinkel aber durchaus relevant. Die Fahrzeugmodelle werden auf entsprechenden Bolzen der Aufspannung fixiert. Diese Bolzen sind entlang von Montageschienen (Halfenschienen) verschiebbar, wodurch die Einstellung der Spurweite erfolgt. Diese Schienen werden für die Einstellung des Radstandes wiederum auf Halfenschienen verschoben, die mittels einer entsprechenden Plattform direkt an den zylindrischen Stiel der Windkanalwaage geflanscht wurden. Die Befestigung der Bolzen bzw. der Querschienen erfolgt mit eigens dafür gefertigten Aufnehmern. Wichtig ist, dass die gesamte Aufspannungskonstruktion berührungsfrei zur Waage geführt wird. Die ausgeführte

Konstruktion ermöglicht es, Radstand-Spurweiten-Kombinationen gängiger Fahrzeuge in den Maßstäben 1 : 4 bzw. 1 : 5 zu realisieren.

Zur Abdeckung der Aufspannvorrichtung wurde ein eigener Kasten an der Unterseite des zusätzlichen Messstreckenbodens vorgesehen, der mit einer drehbaren Scheibe abgedeckt ist. Diese Drehscheibe liegt auf vier kugelgelagerten PU-Rollen und wird mit weiteren vier Rollen in der Öffnung des Messstreckenbodens zentriert. Der gesamte Aufbau wurde in der Werkstätte des ISW aus MDF-Platten gefertigt. Damit die Bolzen der Modellaufnahme berührungslos durch die Drehscheibe geführt werden können, sind vier kreisrunde Ausnehmungen vorgesehen. Diese decken einen Großteil der Radstand-Spurweiten-Konfigurationen verschiedener Fahrzeuge im gewünschten Modellmaßstab ab. In diesen Öffnungen sind drehbare Aluminiumscheiben eingelegt. In diesen Scheiben befinden sich exzentrisch angeordnete Öffnungen, in denen jeweils weitere Scheiben drehbar eingelegt sind. In diesen kleinen Scheiben befindet sich schließlich eine exzentrische Bohrung durch welche die Bolzen der Aufspanrichtung nach außen geführt werden können. Durch gegenseitiges Verdrehen der in die große Drehscheibe eingelegten Scheiben können durch die exzentrische Anordnung die geforderten Fahrzeugabmessungen eingestellt werden. Die Scheiben sind in passende Vertiefungen eingelassen, wodurch eine ebene Fläche entsteht, die die Strömung insbesondere an der Modellunterseite nicht beeinflusst.

Der Messaufbau verursacht zusätzlichen Widerstand in der Messstrecke. Durch die aufstauende Wirkung würde die Strömung grundsätzlich über den Zwischenboden abgelenkt. Dies wiederum verursacht eventuell eine falsche Anströmung der Modelle. Vermieden wird das durch eine verstellbare Klappe an der hinteren Kante der Zusatzmessstrecke. Mit diesem Diffusor kann der Luftmassenstrom zwischen dem eigentlichen und dem erhöhten Messstreckenboden reguliert werden. Ziel ist es, die Klappe so einzustellen, dass eine parallele Anströmung des Prüflings gewährleistet wird.

Zur Überprüfung der einwandfreien Funktion der Neukonstruktion wurde ein Modell des TERA Fennek aus dem Jahr 2010 im Maßstab 1 : 2 untersucht. Dabei wurden die wirkenden aerodynamischen Kräfte und Momente gemessen und mit bestehenden Messdaten verglichen. Die Messergebnisse zeigen im Wesentlichen eine gute Übereinstimmung. Die auftretenden Unterschiede können am ehesten durch eine unterschiedliche Einstellung der Diffusorklappe erklärt werden.

Als wichtiger Parameter für die Messungen hat sich der Diffusoröffnungswinkel am neuen Zwischenboden herausgestellt. Ausführliche Versuchsreihen haben gezeigt, dass mit steigendem Öffnungswinkel der Widerstandsbeiwert abnimmt während der

Auftriebsbeiwert annähernd unbeeinflusst bleibt. Neben der Klappeneinstellung verändert auch das in der Messstrecke montierte Modell selbst die Anströmung. Dabei wird die Strömung durch die zusätzliche Versperrung (Aufstau) gezwungen, eher zwischen erhöhter und eigentlicher Messstrecke zu strömen. Aus diesem Grund wurde der Diffusoröffnungswinkel generell mit montiertem Modell ermittelt.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass mit dem neuen Zwischenboden gut vergleichbare Ergebnisse mit dem Fennek ermittelt werden konnten. Die Konstruktion liefert also mit korrekter Einstellung der Diffusorklappe korrekte Strömungsverhältnisse.

Die zweite Messaufgabe war es, die aerodynamischen Kräfte am Panther, einem weiteren Fahrzeugkonzept von TERA, zu bestimmen. Dafür wurden an einem Modell im Maßstab 1 : 3, Messreihen an folgenden drei Fahrzeugkonfigurationen durchgeführt:

- der Originalversion mit Radverkleidungen an den Vorderrädern,
- einer optimierten Variante mit einer um $\Delta L_{SP} = +28 \text{ mm}$ gegenüber der Originalversion verbreiterten Spurweite der Vorderachse,
- der optimierten Version ohne die vorderen Radverkleidungen.

Die Messungen haben gezeigt, dass durch die Verbreiterung der Spur, bei $U_\infty = 30 \text{ m/s}$ und gerader Anströmung, der Widerstandsbeiwert von $c_w = 0,305$ auf $c_w = 0,266$ gesenkt werden konnte. Diese Reduktion des c_w -Werts zeigt sich in etwa gleichmäßig über den gesamten Schiebewinkelbereich. Der Abtrieb hat sich durch die Modifikationen an der Vorderachse für die gleichen Anströmbedingungen von $c_a = -0,142$ auf $c_a = -0,2$ vergrößert. Durch das Abnehmen der vorderen Radkästen erhöhte sich der Widerstand sowie der Auftrieb wieder. Dabei liegt der Widerstand aber noch immer unter dem Niveau der Originalversion. Der Auftrieb hingegen nimmt stärker zu und liegt deutlich über den Beiwerten der anderen Fahrzeugkonfigurationen.

Letztlich wurde noch der Einfluss des durch die Aufspannung entstehenden Spalts zwischen Rad und Fahrbahn untersucht. Dabei wurde der Spalt mit einem Papierstreifen verschlossen und Messungen am Panther mit breiter Spur sowie mit und ohne vorderer Radverkleidung bei symmetrischer Anströmung wurden durchgeführt. Dabei zeigte sich die zu erwartende Tendenz, nämlich eine Erhöhung des Auftriebs. Dieser Trend wurde auch beim Widerstand festgestellt, war dort aber nicht in dem deutlichen Ausmaß zu erwarten. Weiters hat sich gezeigt, dass der Unterschied im Widerstand zwischen den Varianten mit und ohne Radverkleidung, durch Schließen des Spaltes nahezu verschwindet. Das gilt nicht für den Auftrieb, dieser unterscheidet sich noch erheblich. Ein Nachteil, der den Messungen anhaftet, sind die stehenden Räder. Diese üben besonders bei Fahrzeugen mit frei stehenden Rädern, wie dem Panther, großen Einfluss

auf die Aerodynamik aus. Darum sind besonders die Messergebnisse der Variante ohne Radverkleidung schwer mit den anderen Ergebnissen vergleichbar.

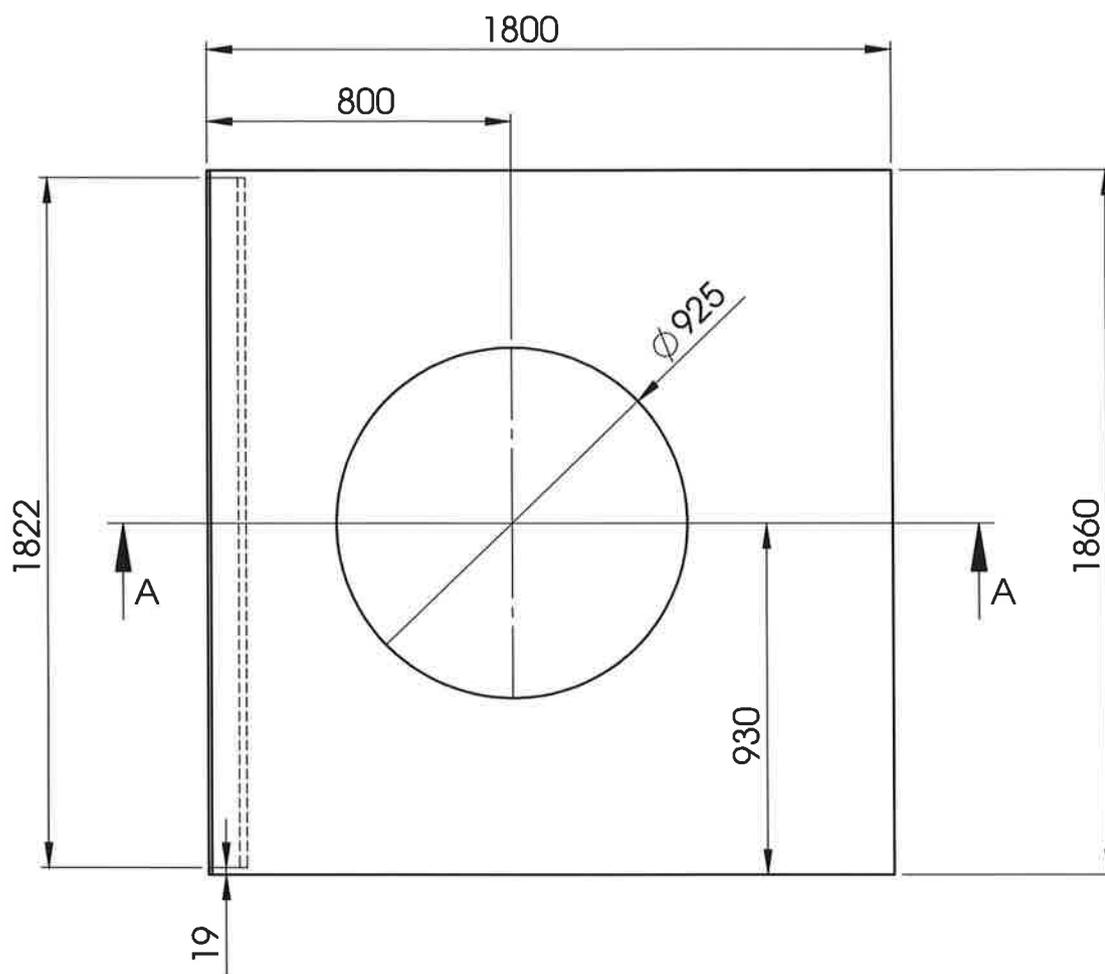
LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bearman P.W., De Beer D., Hamidy E., Harvey J. K. (1988): *The Effect of a Moving Floor on Wind-Tunnel Simulation of Road Vehicles*, SAE Technical Paper Series 880245.
- [2] Börger G.-G. (1973): *Optimierung von Windkanaldüsen für den Unterschallbereich*, Dissertation, Abteilung für Maschinenbau und Konstruktiven Ingenieurbau, Universität Bochum.
- [3] Cogotti A. (1983): *Aerodynamic Characteristics of Car Wheels*, International Journal of Vehicle Design, Special Publication SP3, S. 173 - 196.
- [4] Ehlers M.T., Röser P. (2006): *Bestimmung und Einstellung der Windgeschwindigkeit im Windkanal der Fa. Modine*, 7. Karlsruher Fahrzeugklima-Symposium, 26. Januar.
- [5] Feichtinger C. S. (2010): *CFD based optimization of the aerodynamics of a low-fuel-consumption vehicle*, Diplomarbeit, Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung, Technische Universität Graz.
- [6] Gretler W., Meile W. (1993): *Der 2 m-Windkanal am Institut für Strömungslehre und Gasdynamik der Technischen Universität Graz*, ÖIAZ 138/3, S. 90 – 96.
- [7] Hucho W.-H. (1981): *Aerodynamik des Automobils*, 1. Auflage, Vogel – Verlag Würzburg.
- [8] Hucho W.-H. (2005): *Aerodynamik des Automobils*, 5. Auflage, Vieweg+Teubner Wiesbaden.
- [9] Hucho W.-H. (2011): *Aerodynamik der stumpfen Körper*, 2. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag Wiesbaden.
- [10] Katz J. (1995): *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, Bentley Publishers Cambridge.

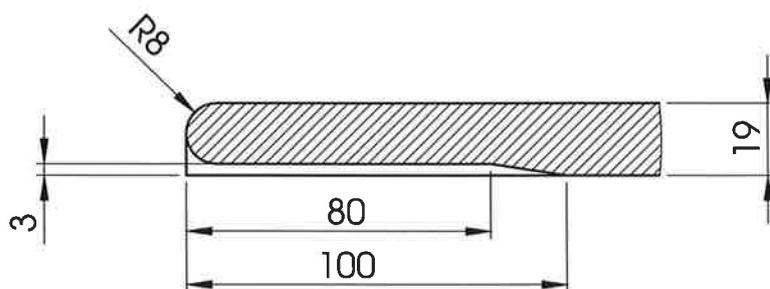
-
- [11] Krestel R. (2005): *Untersuchung und Optimierung des aerodynamischen Verhaltens des Rennfahrzeugs des TUG Racing Teams*, Diplomarbeit, Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung, Technische Universität Graz.
- [12] Nitsche W., Brunn A. (2006): *Strömungsmesstechnik*, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/New York.
- [13] Oertel jr. H., (2008): *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre*, Vieweg + Teubner Verlag Wiesbaden.
- [14] Potthoff J. (2000): *Future Road Simulation Techniques in the IVK/FKFS Wind Tunnels*, Wiedemann J., Hucho W., (Hrsg.) Progress in Vehicle Aerodynamics – Advanced Experimental Techniques, expert Verlag Renningen.
- [15] Reisenberger E. (2005): *Untersuchungen zum aerodynamischen Verhalten von Schispringern*, Dissertation, Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung, Technische Universität Graz.
- [16] Schilawa S. (1984): *Entwurf dreidimensionaler Windkanalduesen*, Fortschritts-Berichte VDI, Bd. 7/82, VDI Verlag Düsseldorf.
- [17] Schlichting H., Gersten K. (2006): *Grenzschicht-Theorie*, 10. Auflage, Springer-Verlag Berlin/Heidelberg.
- [18] Surek D., Stempin S. (2007): *Angewandte Strömungsmechanik für Praxis und Studium*, 1. Auflage, B.G. Teubner Verlag Wiesbaden.
- [19] Webseite TERA, www.tera.tugraz.at. [Zugriff am 10 April 2013].

ANHANG A

KONSTRUKTIONSZEICHNUNGEN

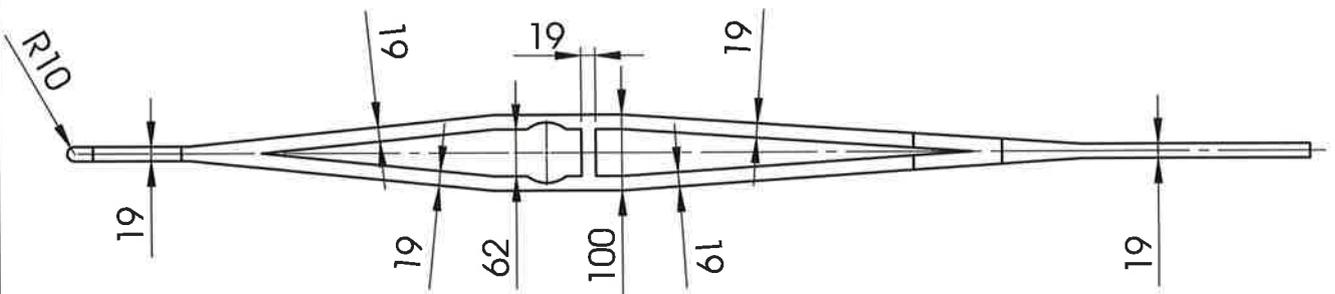
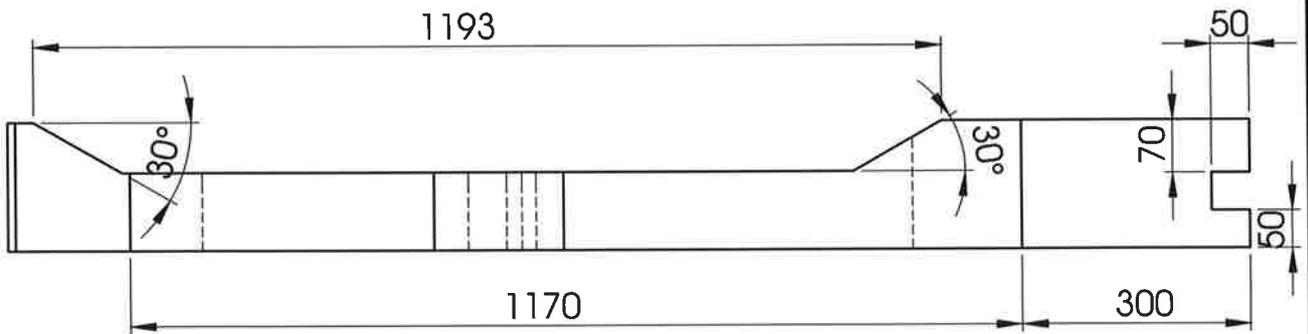
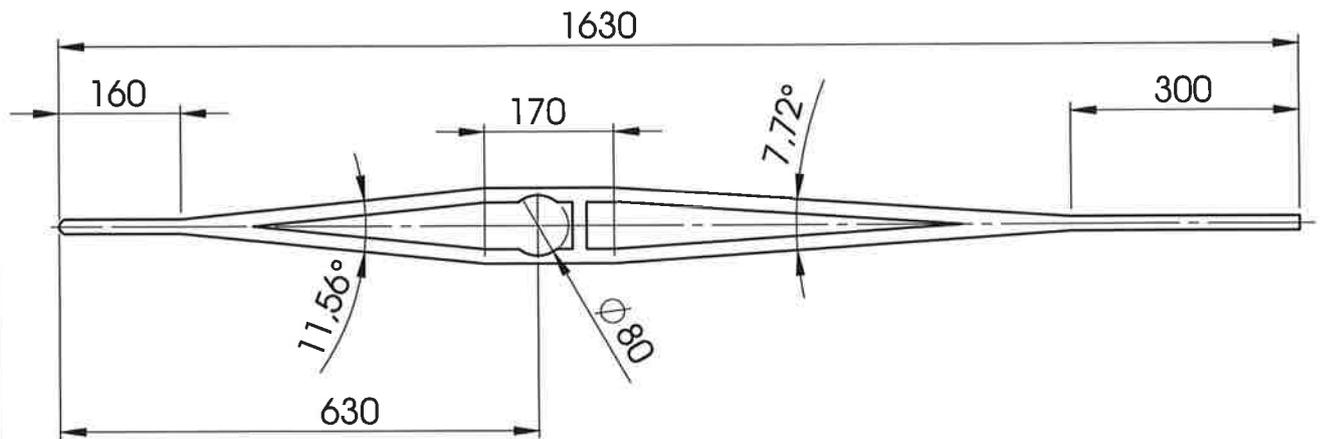


SCHNITT A-A



DETAIL B
MAßSTAB 1 : 2

| | | | | | |
|---|----------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|--|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material MDF | Gewicht 37726.03 g | Projekt Messstreckenboden | | |
|  | Titel Grundplatte | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | | |
| | Maßstab 1:20 | Ausgabedatum 11.05.2013 | Blatt 1 von 27 | | |



Erstellt durch
Christian Sauermoser

Material
MDF

Gewicht
4561.53 g

Projekt
Messstreckenboden



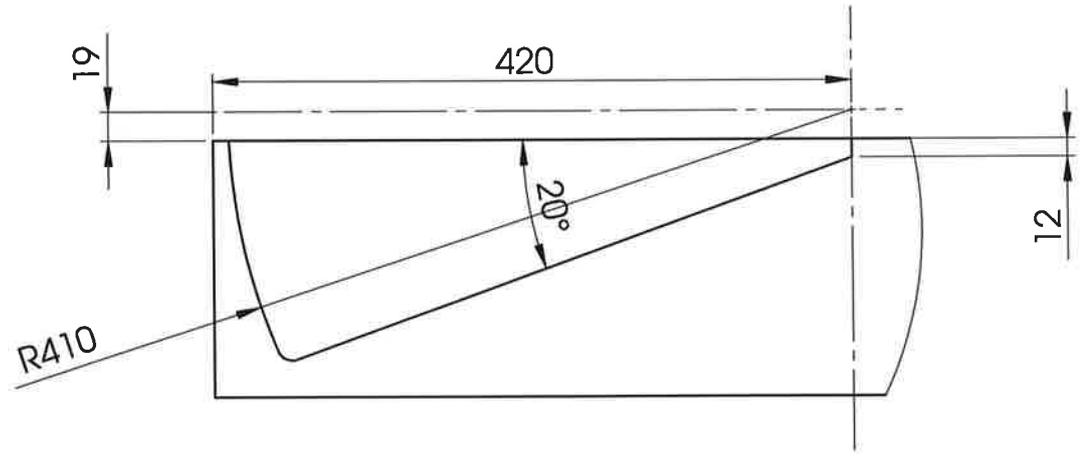
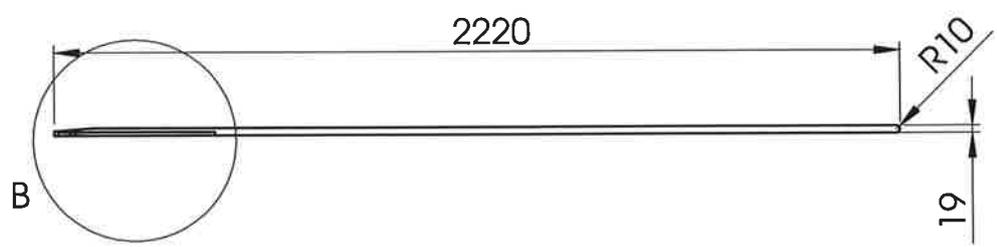
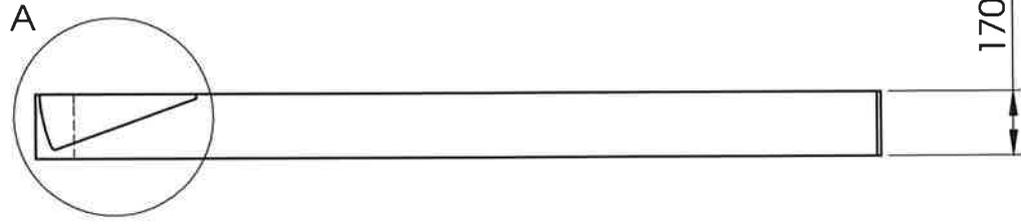
Titel
Mittelteil Boden

Dokumentenart
Einzelteilzeichnung

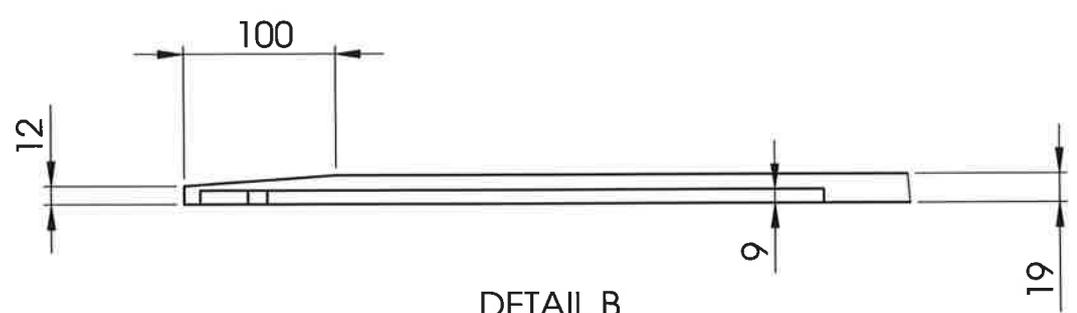
Maßstab
1:10

Ausgabedatum
11.05.2013

Blatt
2 von 27

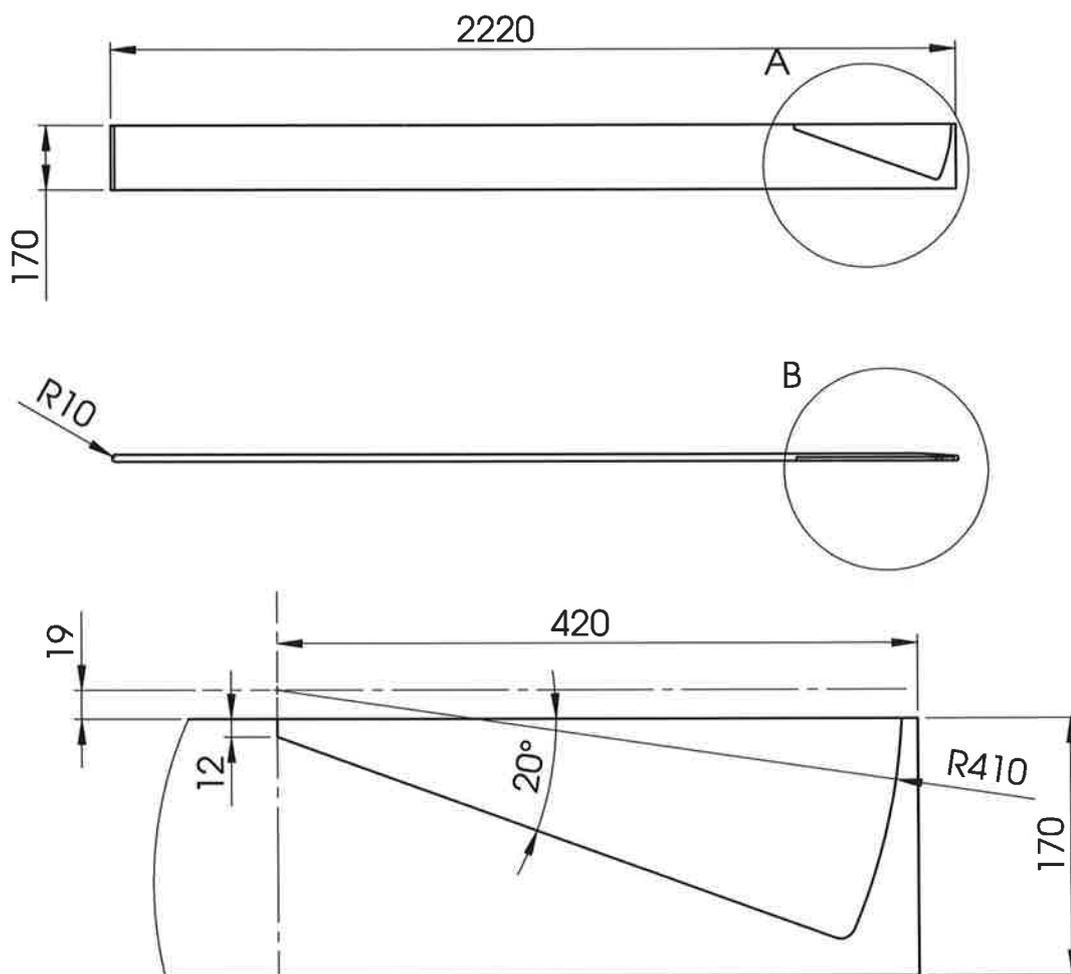


DETAIL A
MAßSTAB 1 : 5

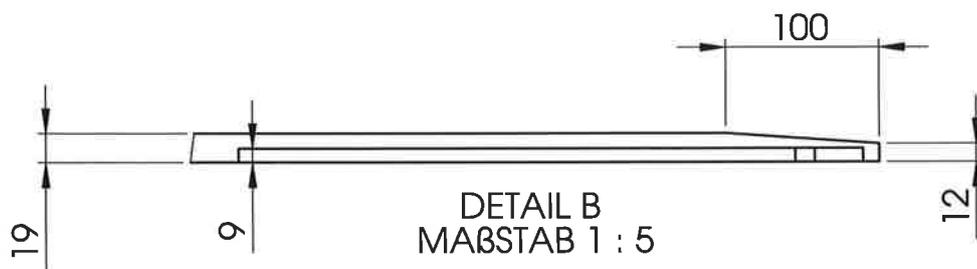


DETAIL B
MAßSTAB 1 : 5

| | | | |
|---|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material MDF | Gewicht 5103.00 g | Projekt Messstreckenboden |
|  | Titel Seitenteil links Boden | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | |
| | | Maßstab 1:20 | Ausgabedatum 11.05.2013 |

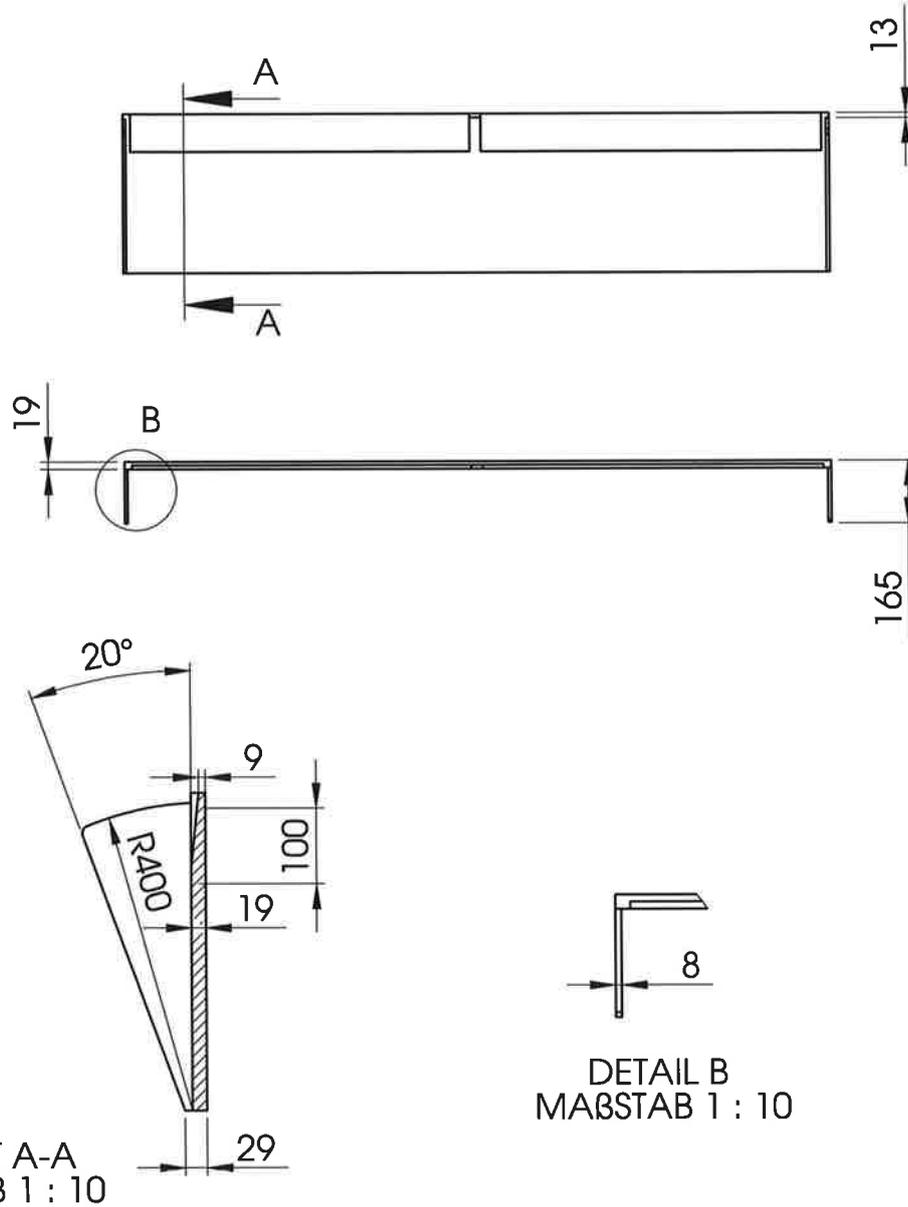


DETAIL A
MAßSTAB 1 : 5

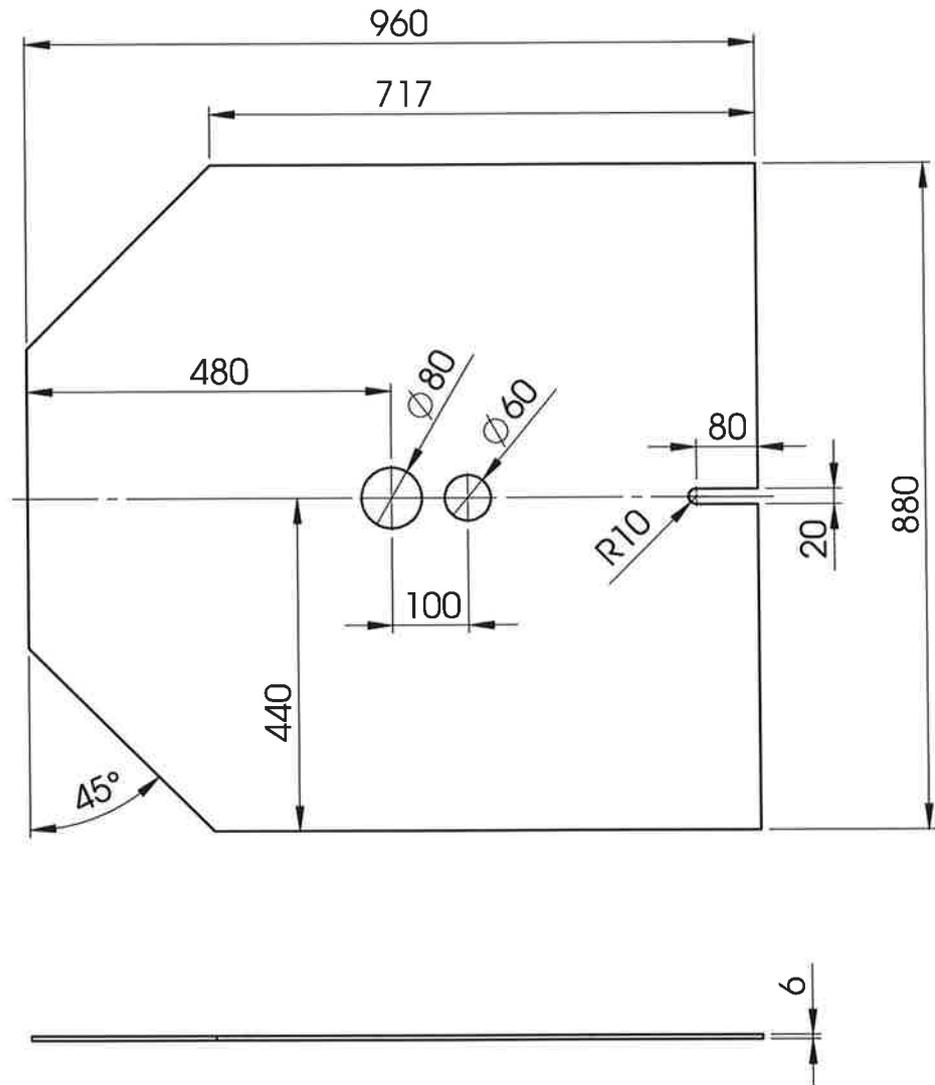


DETAIL B
MAßSTAB 1 : 5

| | | | |
|---|-------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material MDF | Gewicht 5103.00 g | Projekt Messstreckenboden |
|  | Titel Seitenteil rechts Boden | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung |
| | Maßstab 1:20 | Ausgabedatum 11.05.2013 | Blatt 4 von 27 |

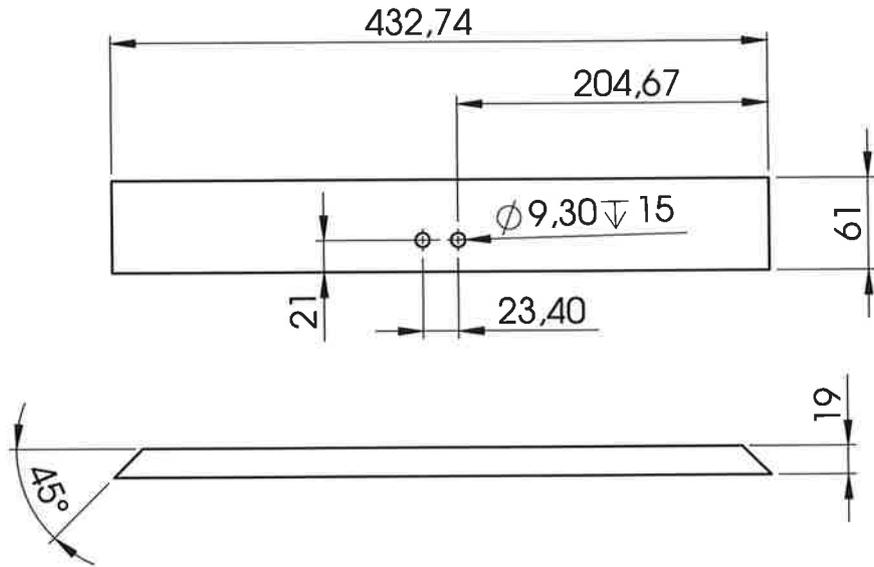


| | | | |
|---|-------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material MDF | Gewicht 10845.04 g | Projekt Messstreckenboden |
|  | Titel Diffusor | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | |
| | | Maßstab 1:20 | Ausgabedatum 11.05.2013 |

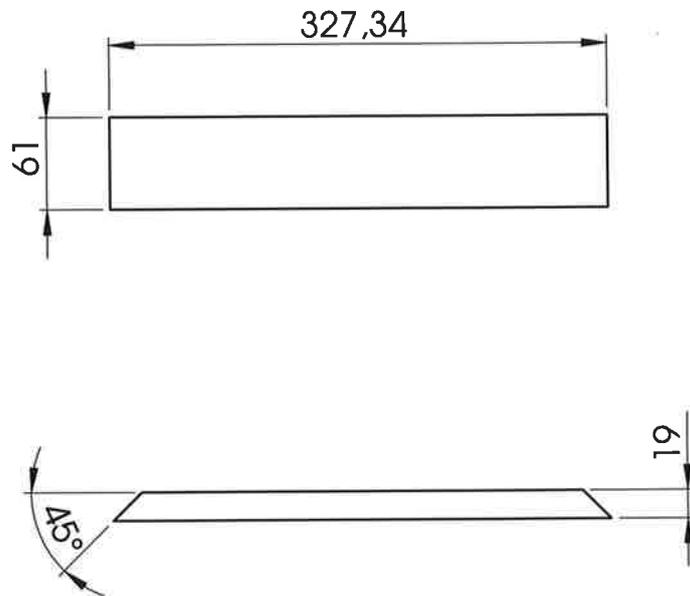


| | | | | | |
|---|-----------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material MDF | Gewicht 3493.52 g | Projekt Messstreckenboden | | |
|  | | Titel Unterseite Verkleidung | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | |
| | | | | Maßstab 1:10 | Ausgabedatum 11.05.2013 |

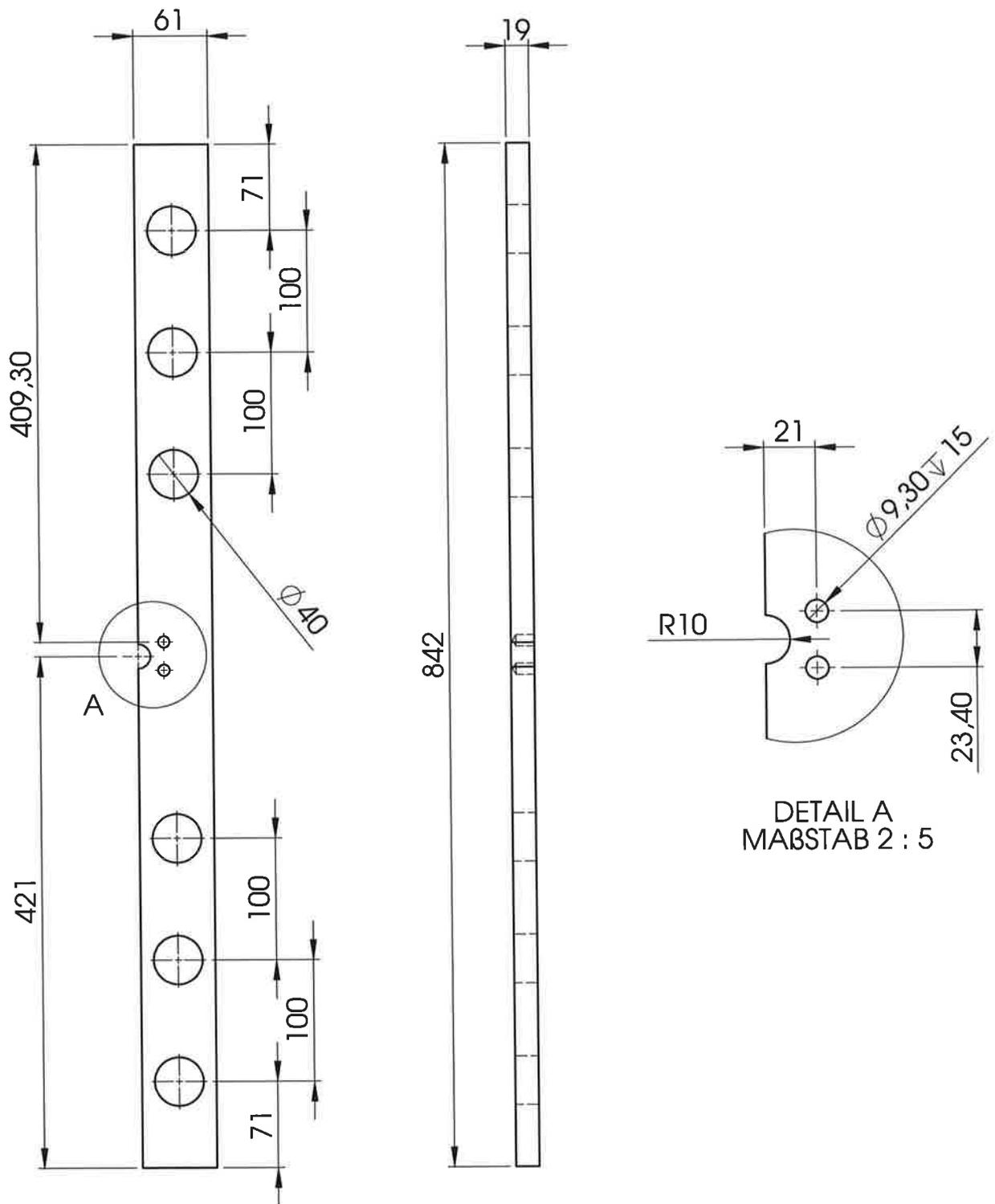
Stirnseitenteil:



Stirnseite schräg (2x):



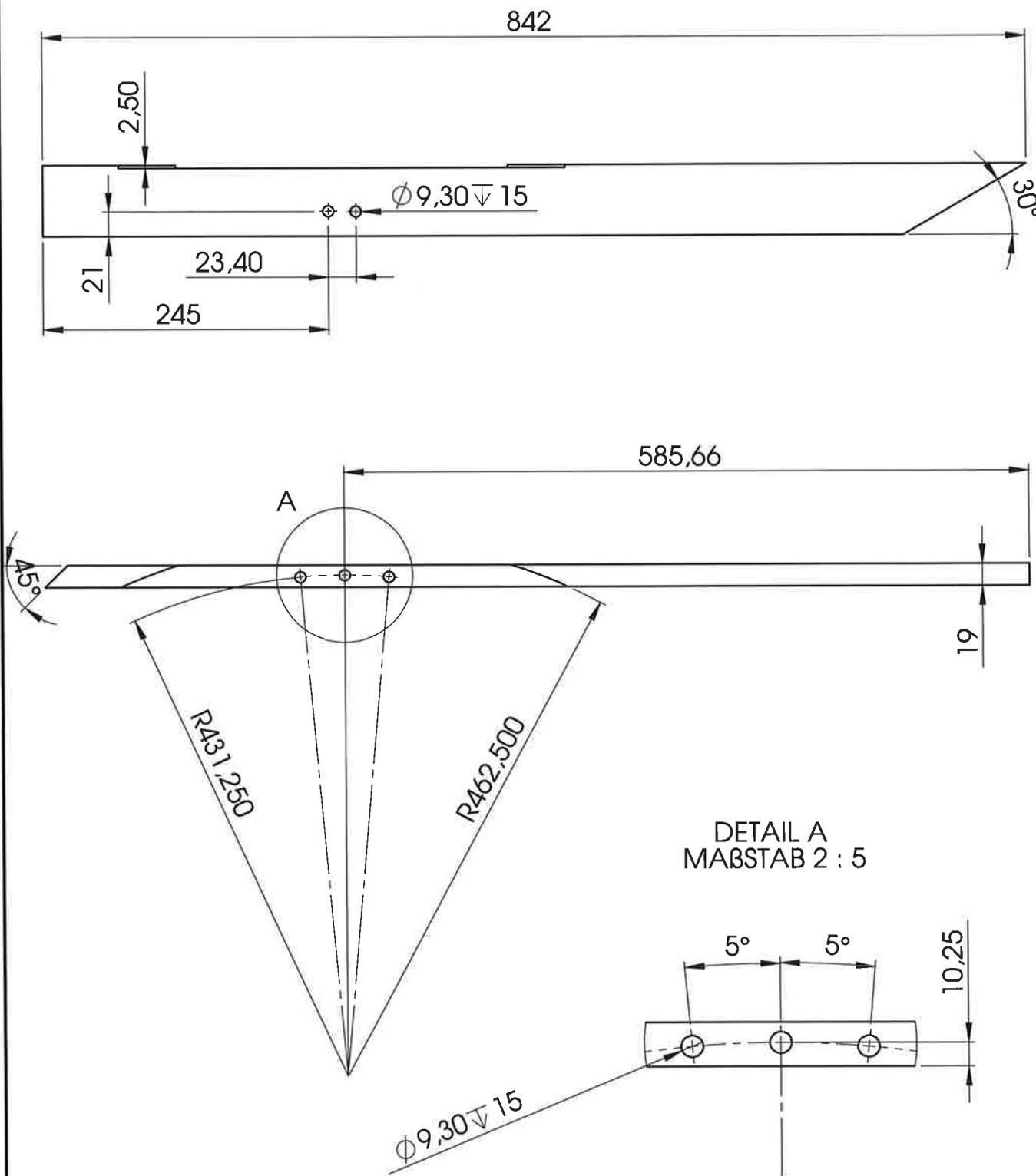
| | | | | | |
|---|------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material MDF | Gewicht 358.02 g | Projekt Messstreckenboden | | |
|  | Titel Stirnseite Verkleidung | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | | |
| | | | Maßstab 1:5 | Ausgabedatum 11.05.2013 | Blatt 7 von 27 |



DETAIL A
MAßSTAB 2 : 5

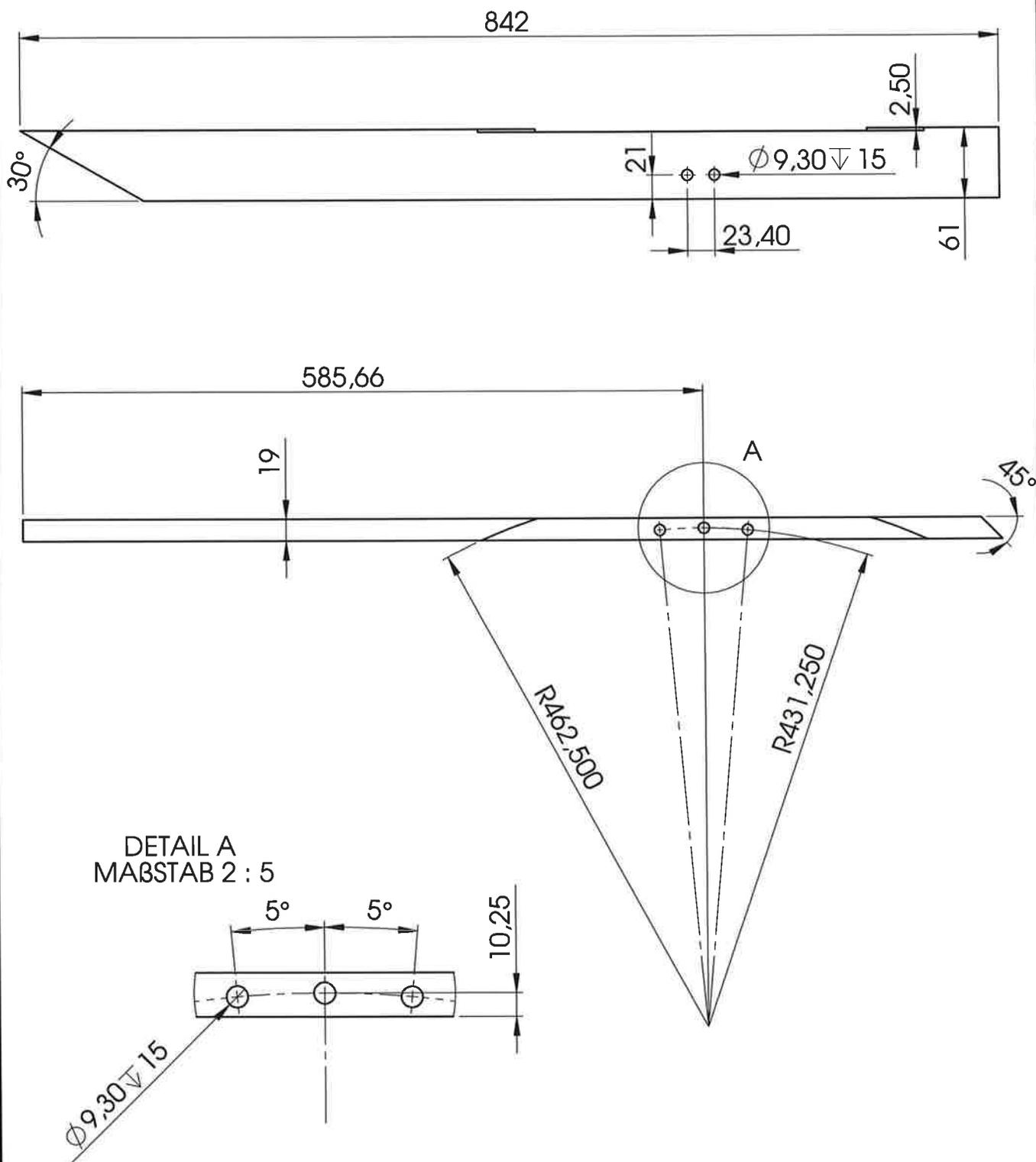
| | | | |
|---|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material MDF | Gewicht 620.60 g | Projekt Messstreckenboden |
|  | Titel Rückseite Verkleidung | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung |
| | Maßstab 1:5 | Ausgabedatum 11.05.2013 | Blatt 8 von 27 |

Seitenteil links (in Strömungsrichtung):

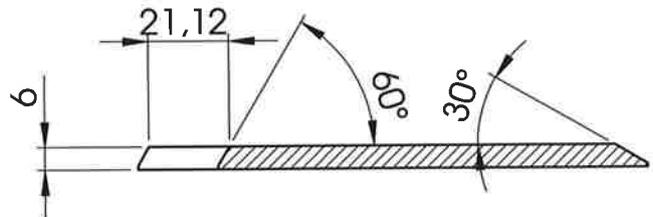
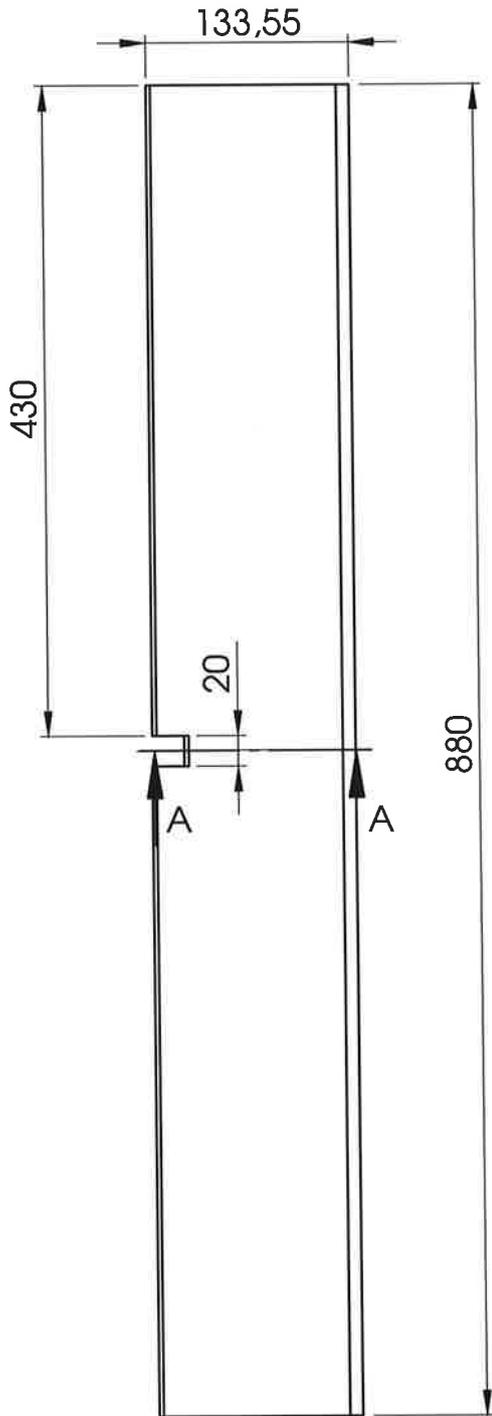
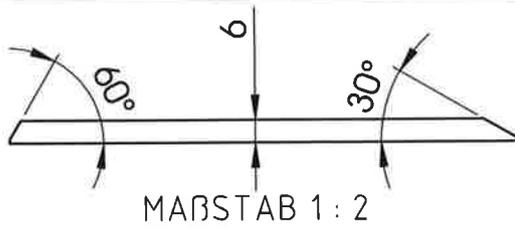


| | | | |
|---|--|----------------------------|--------------------------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material MDF | Gewicht 661.73 g | Projekt Messstreckenboden |
|  | Titel Seitenteil links Verkleidung | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung |
| | Maßstab 1:5 | Ausgabedatum 11.05.2013 | Blatt 9 von 27 |

Seitenteil rechts (in Strömungsrichtung):



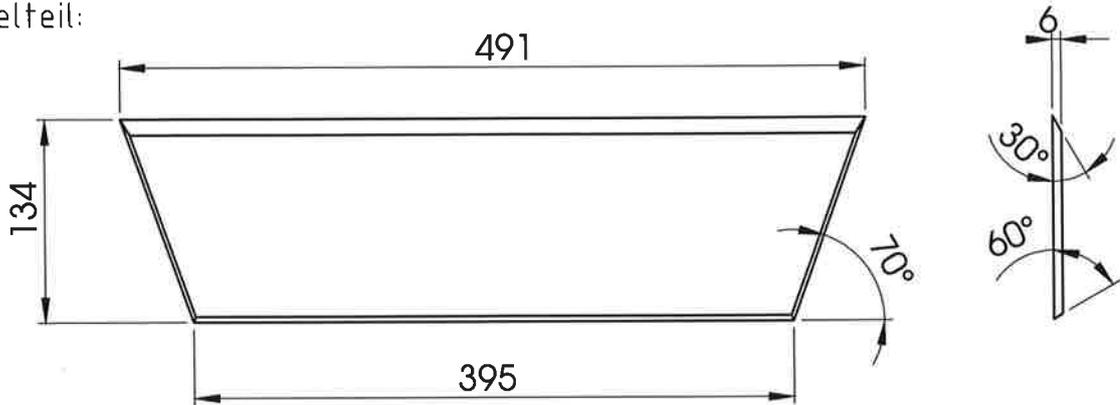
| | | | |
|---|---|--------------------------------------|------------------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material MDF | Gewicht 661.73 g | Projekt Messstreckenboden |
|  | Titel Seitenteil rechts Verkleidung | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | |
| | | Maßstab 1:5 | Ausgabedatum 11.05.2013 |



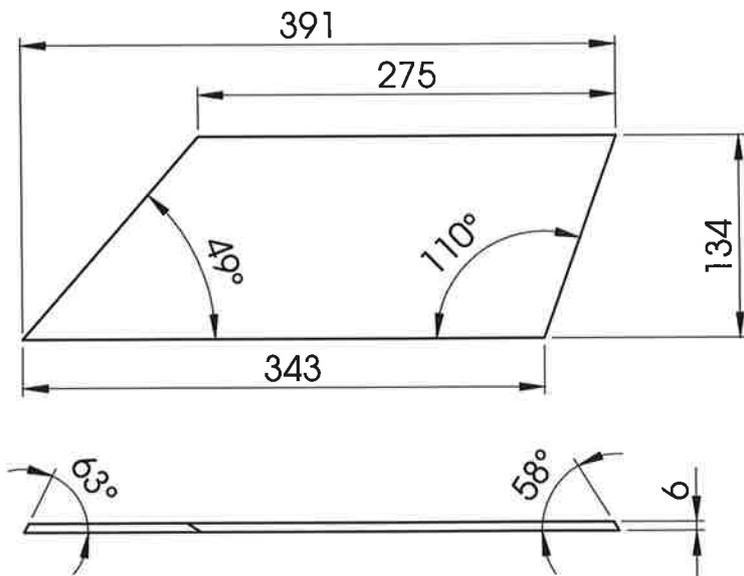
SCHNITT A-A
MABSTAB 1 : 2

| | | | |
|---|--|--------------------------------------|------------------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material MDF | Gewicht 507.90 g | Projekt Messstreckenboden |
|  | Titel Schrägung hinten Verkleidung | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | |
| | | Maßstab 1:5 | Ausgabedatum 11.05.2013 |

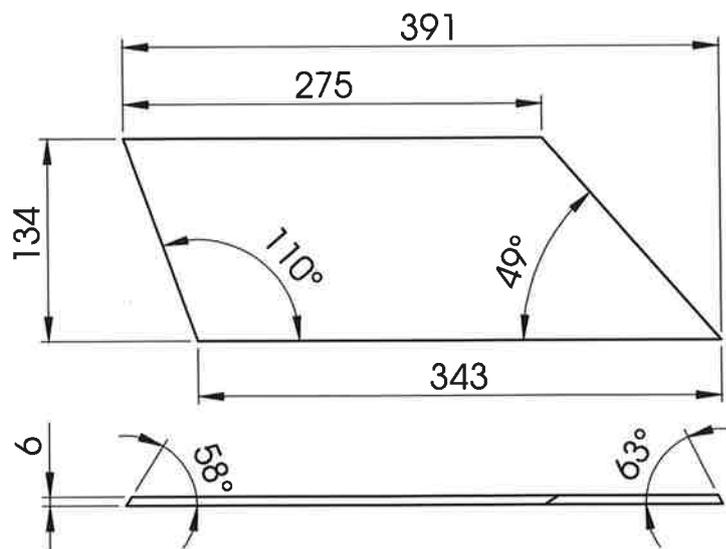
Mittelteil:



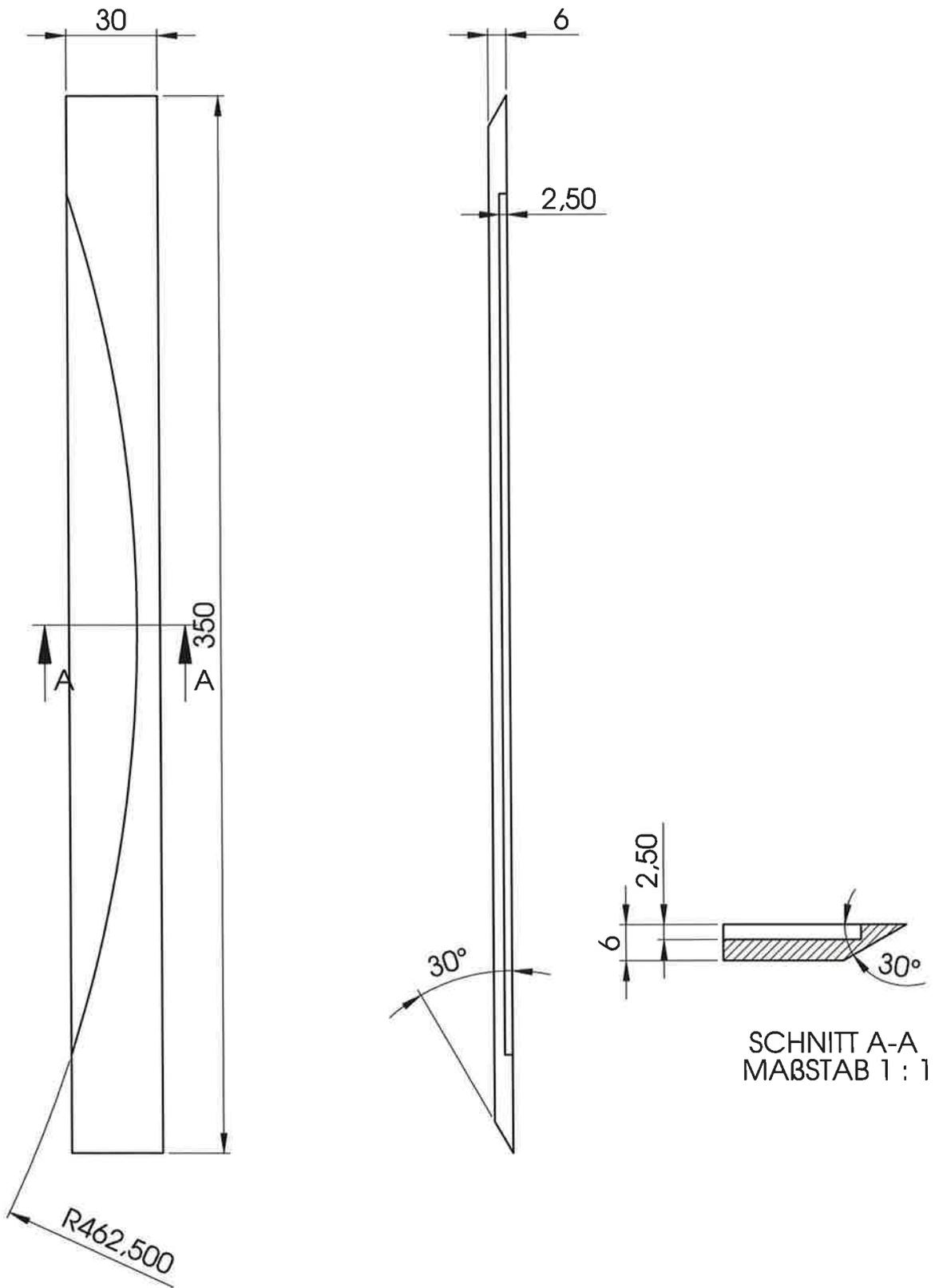
Linke Schrägung:



Rechte Schrägung:



| | | | | | | |
|---|---|--------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------|--|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material | Gewicht g | Projekt Messstreckenboden | | | |
|  | Titel Schrägung vorne Verkleidung | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | | | |
| | | | Maßstab 1:5 | Ausgabedatum 11.05.2013 | Blatt 12 von 27 | |



Erstellt durch
Christian Sauermoser

Material
MDF

Gewicht
29.93 g

Projekt
Messstreckenboden



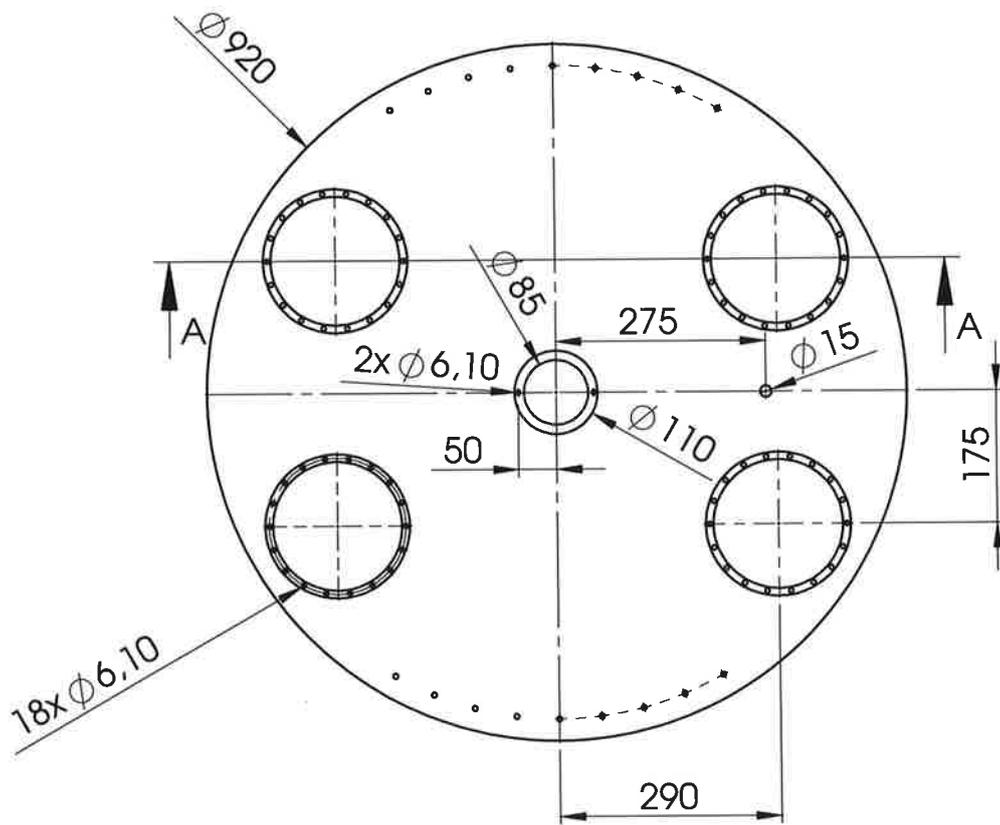
Titel
Abdeckung
Drehscheibe

Dokumentenart
Einzelteilzeichnung

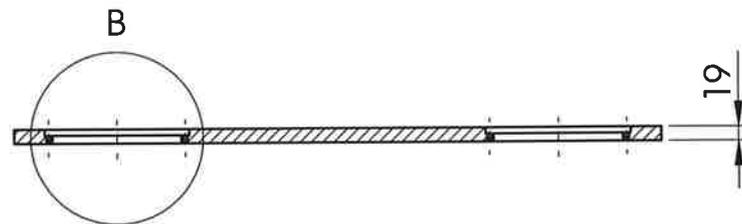
Maßstab
1:2

Ausgabedatum
11.05.2013

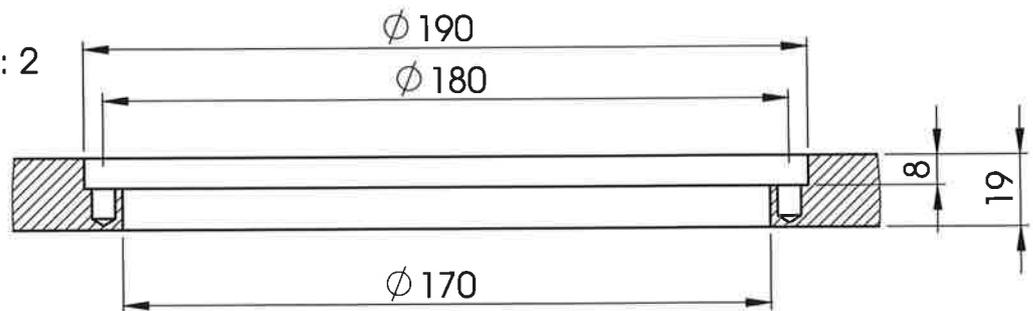
Blatt
13 von 27

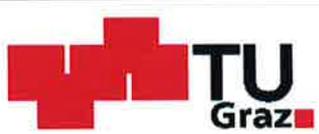


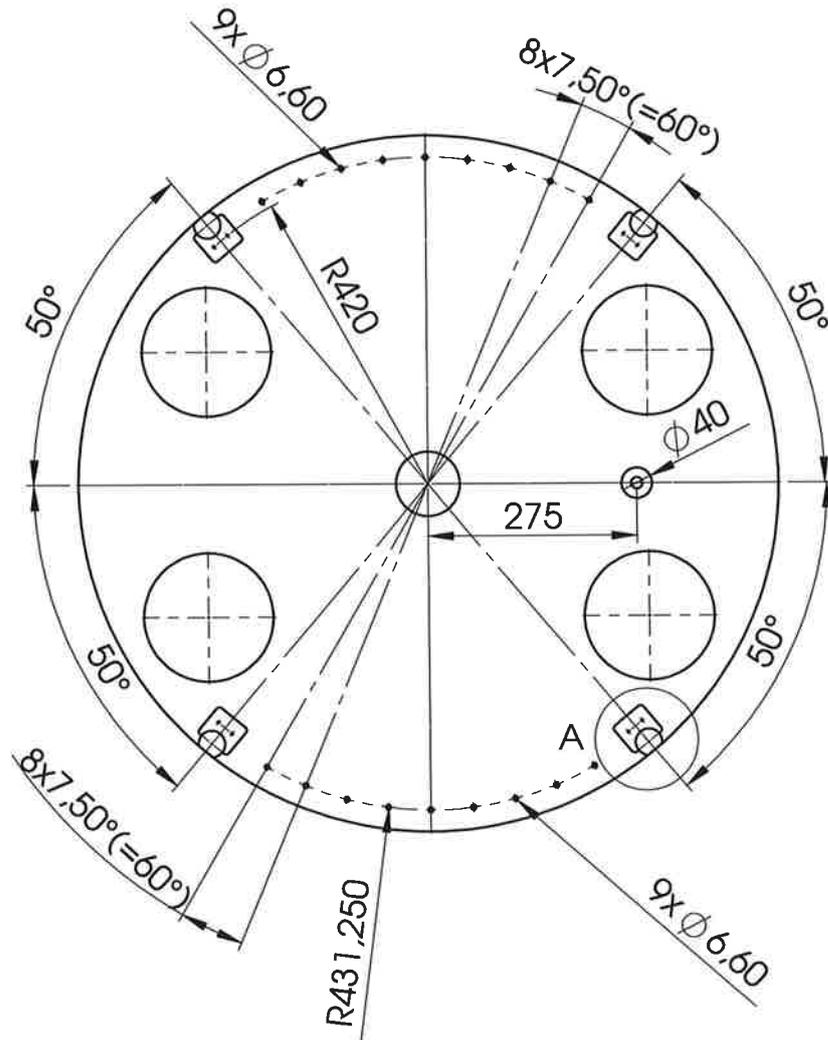
SCHNITT A-A



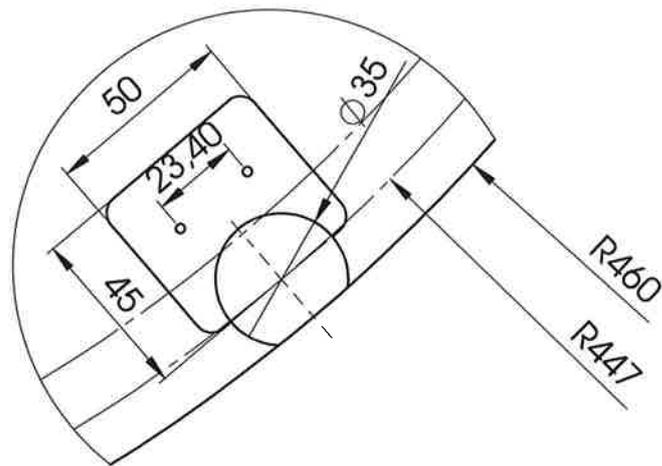
DETAIL B
MAßSTAB 1 : 2



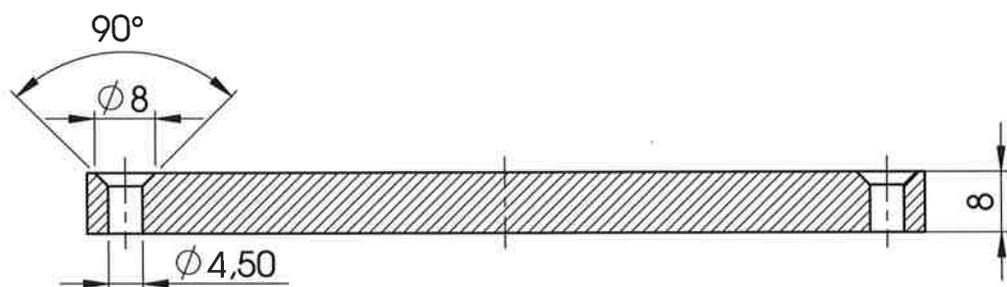
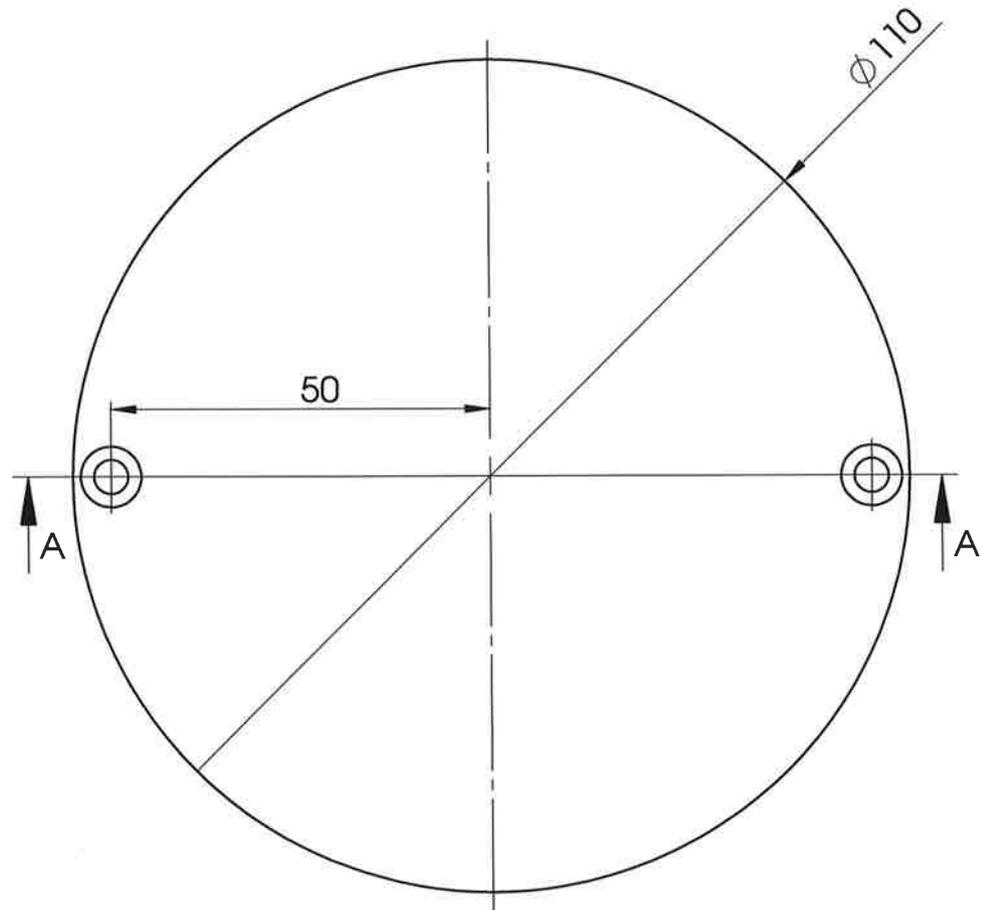
| | | | |
|---|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material MDF | Gewicht 7850.13 g | Projekt Messstreckenboden |
|  | Titel Drehscheibe Oberseite | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung |
| | Maßstab 1:10 | Ausgabedatum 11.05.2013 | Blatt 14 von 27 |



DETAIL A
MAßSTAB 1 : 2

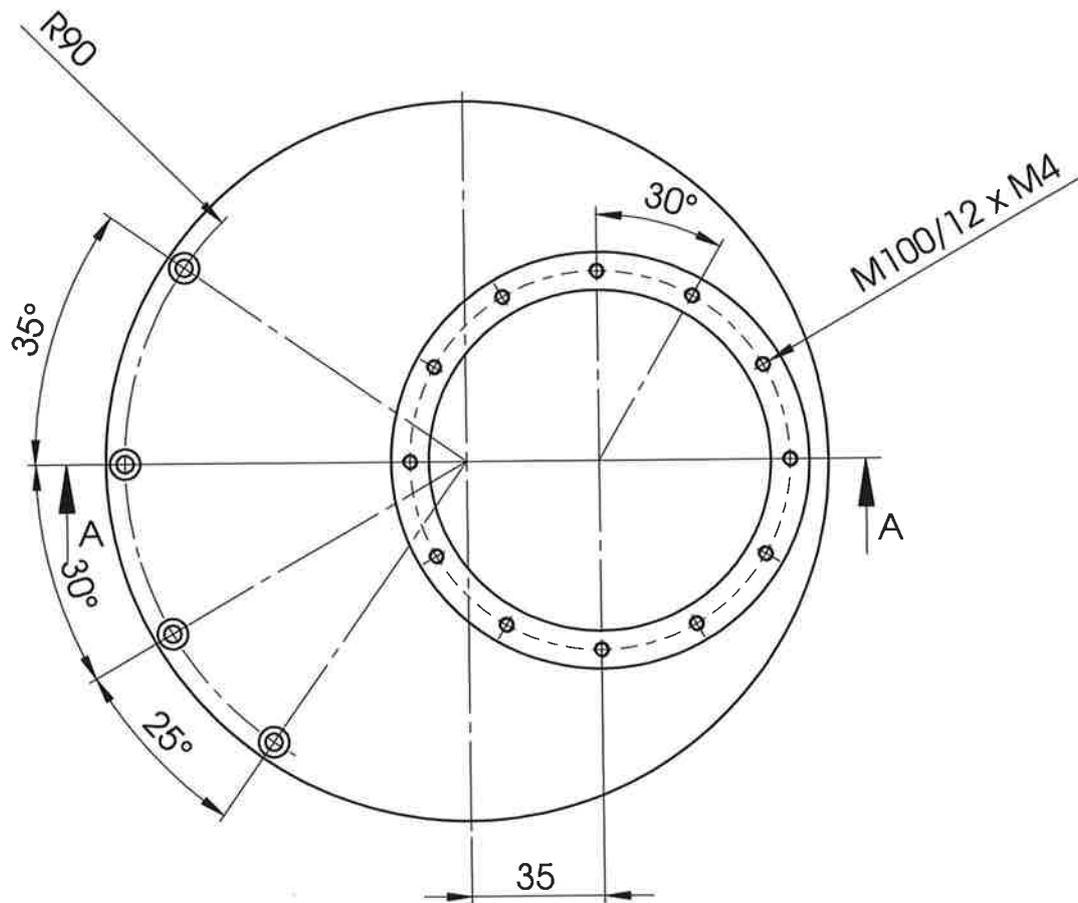


| | | | |
|---|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material MDF | Gewicht 7850.13 g | Projekt Messstreckenboden |
|  | Titel Drehscheibe Unterseite | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | |
| | | Maßstab 1:10 | Ausgabedatum 11.05.2013 |

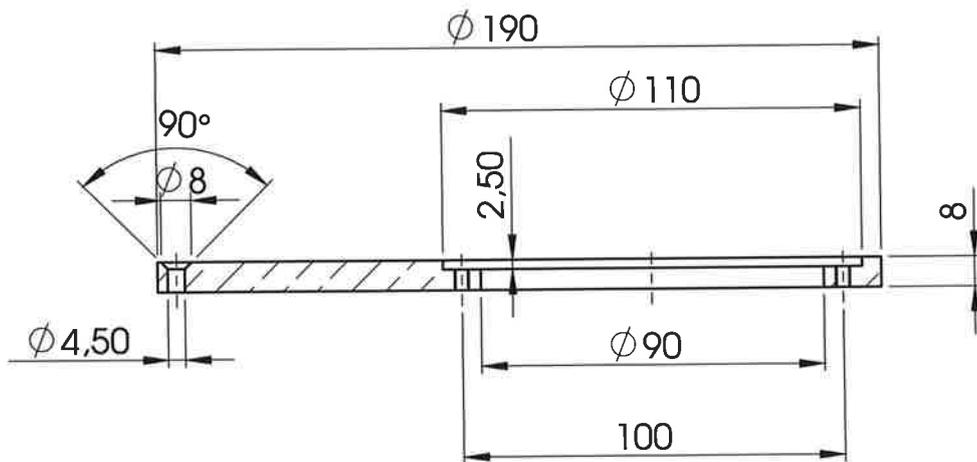


SCHNITT A-A

| | | | |
|---|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material MDF | Gewicht 56.79 g | Projekt Messstreckenboden |
|  | Titel Drehscheibe Deckel | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung |
| | Maßstab 1:1 | Ausgabedatum 11.05.2013 | Blatt 16 von 27 |



SCHNITT A-A



Erstellt durch
Christian Sauermoser

Material
3.3535 (EN-AW 575)

Gewicht
450.61 g

Projekt
Messstreckenboden



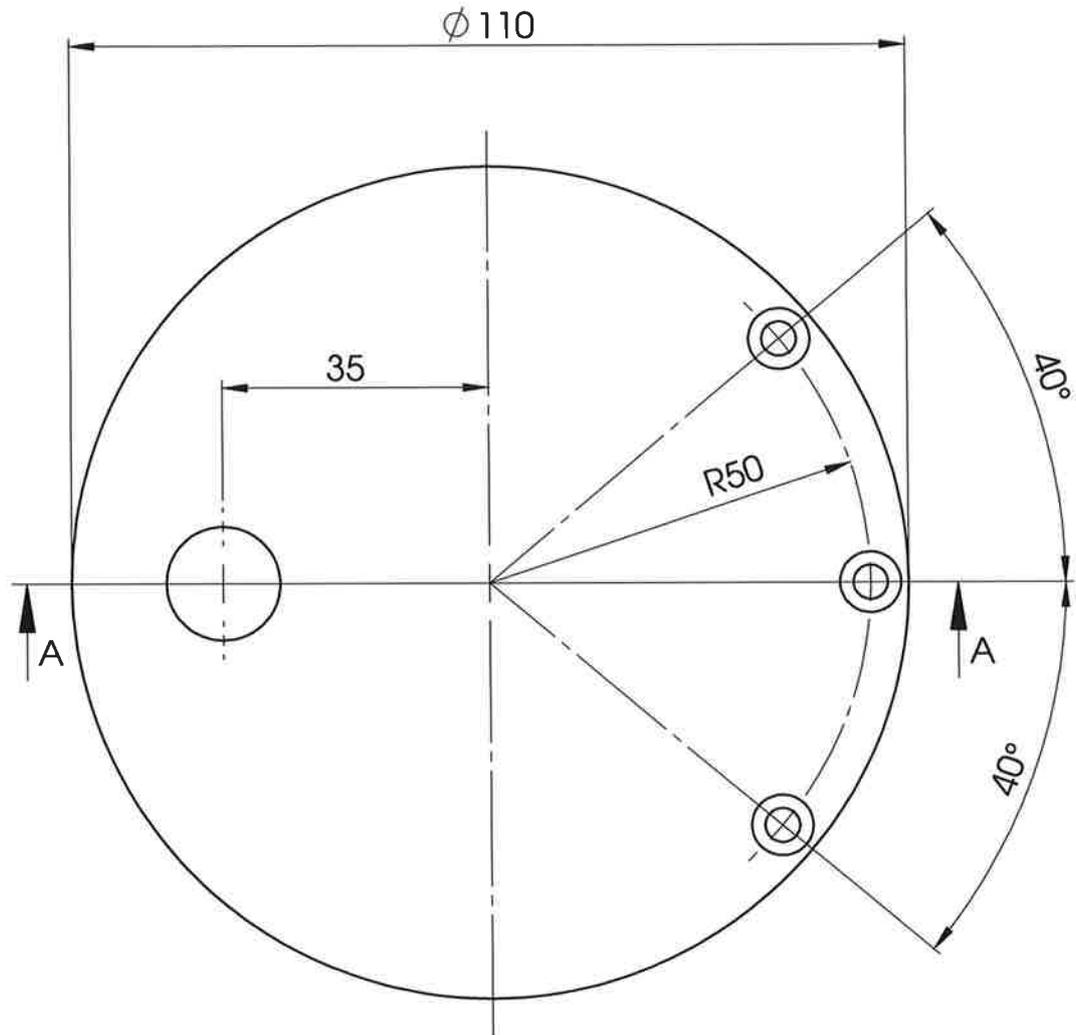
Titel
Einlegescheibe

Dokumentenart
Einzelteilzeichnung

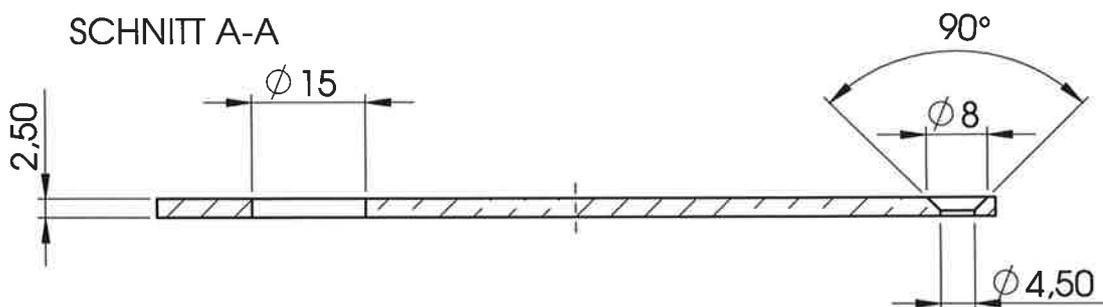
Maßstab
1:2

Ausgabedatum
11.05.2013

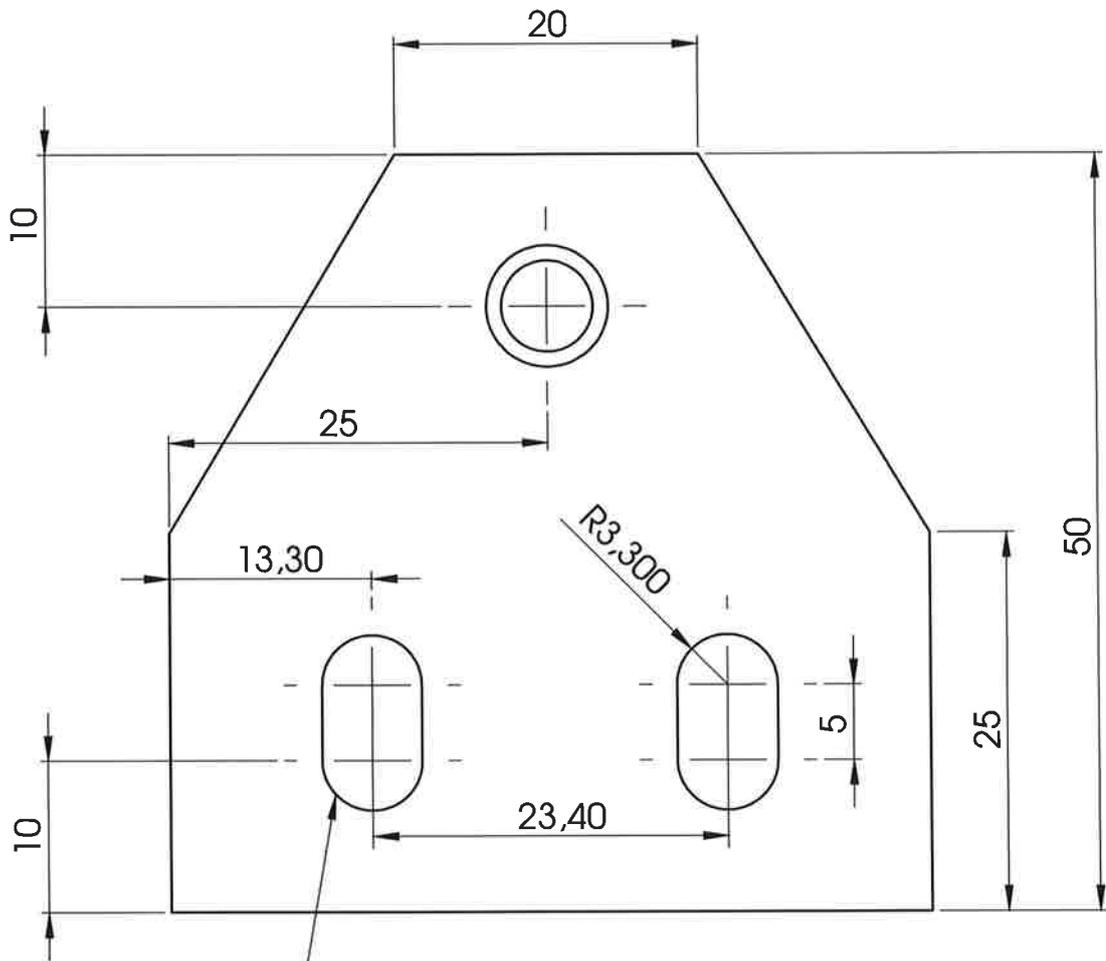
Blatt
17 von 27



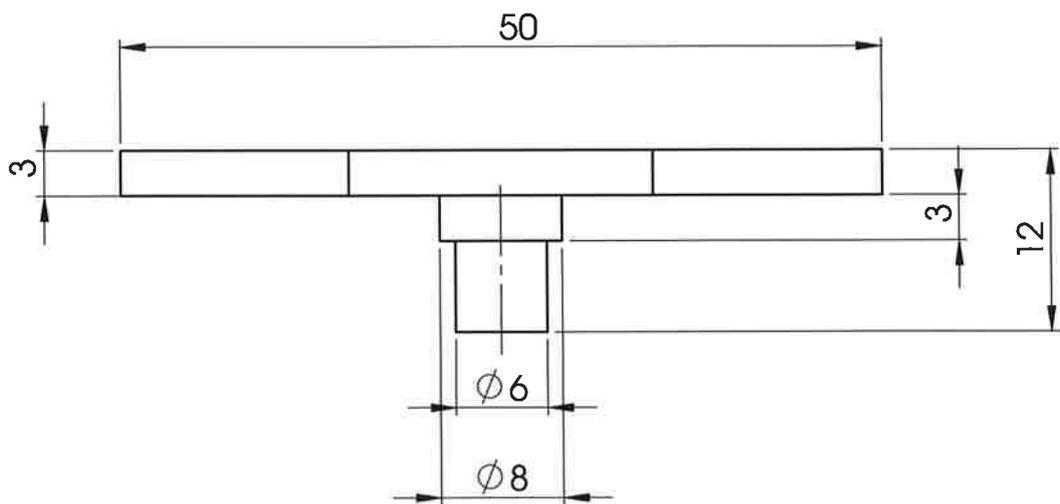
SCHNITT A-A



| | | | | | |
|---|---------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|--|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material 3.0255 (EN AW-1350) | Gewicht 2.41 g | Projekt Messstreckenboden | | |
|  | Titel Einlegescheibe klein | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | | |
| | Maßstab 1:1 | Ausgabedatum 11.05.2013 | Blatt 18 von 27 | | |



4xSenkung auf Rückseite



Erstellt durch
Christian Sauermoser

Material
1.0038 (S235JRG2)

Gewicht
49.08 g

Projekt
Messstreckenboden



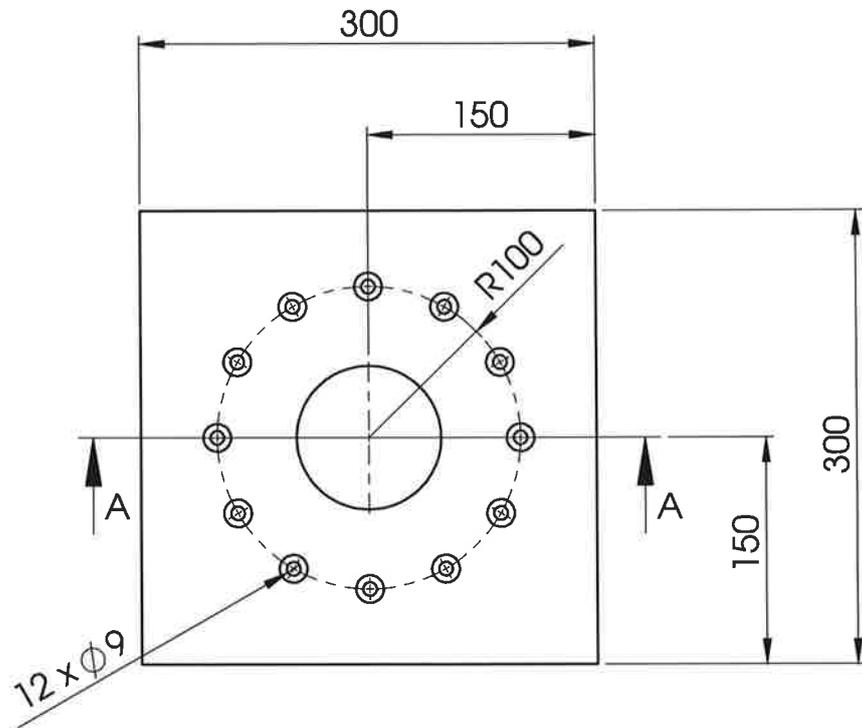
Titel
Rollenhalter

Dokumententyp
Einzelteilzeichnung

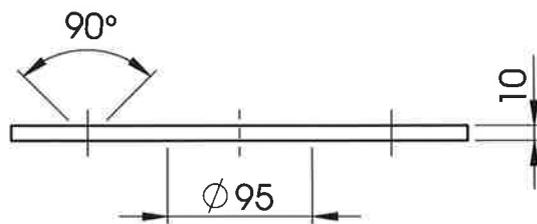
Maßstab
2:1

Ausgabedatum
11.05.2013

Blatt
19 von 27



SCHNITT A-A



Erstellt durch
Christian Sauermoser

Material
1.0045 (S355JR)

Gewicht
6369.57 g

Projekt
Messstreckenboden



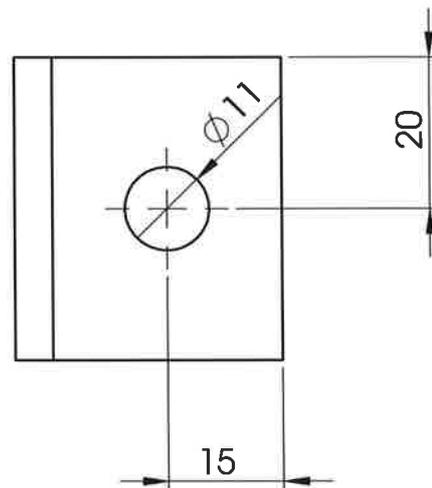
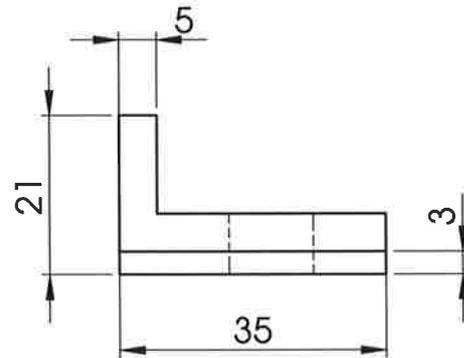
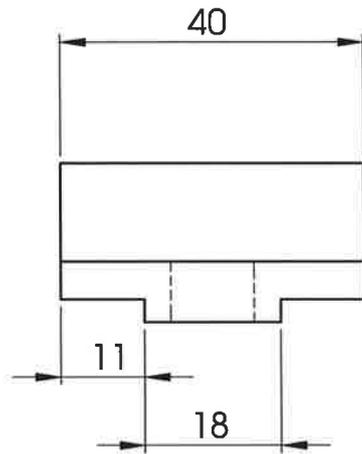
Titel
Grundplatte
Schienen

Dokumentenart
Einzelteilzeichnung

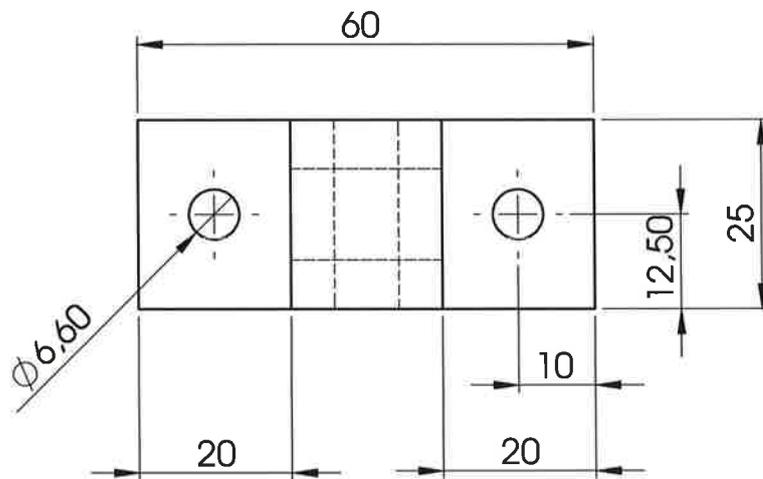
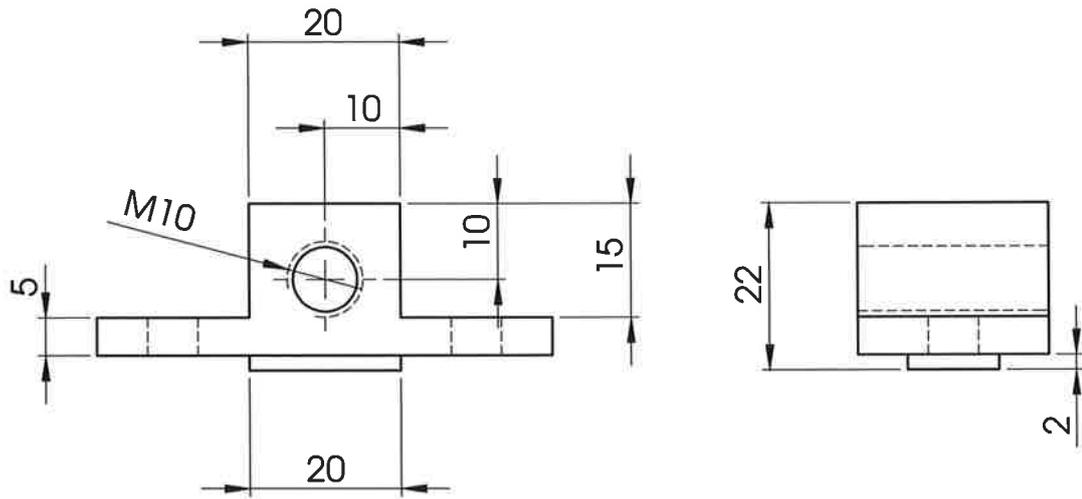
Maßstab
1:5

Ausgabedatum
11.05.2013

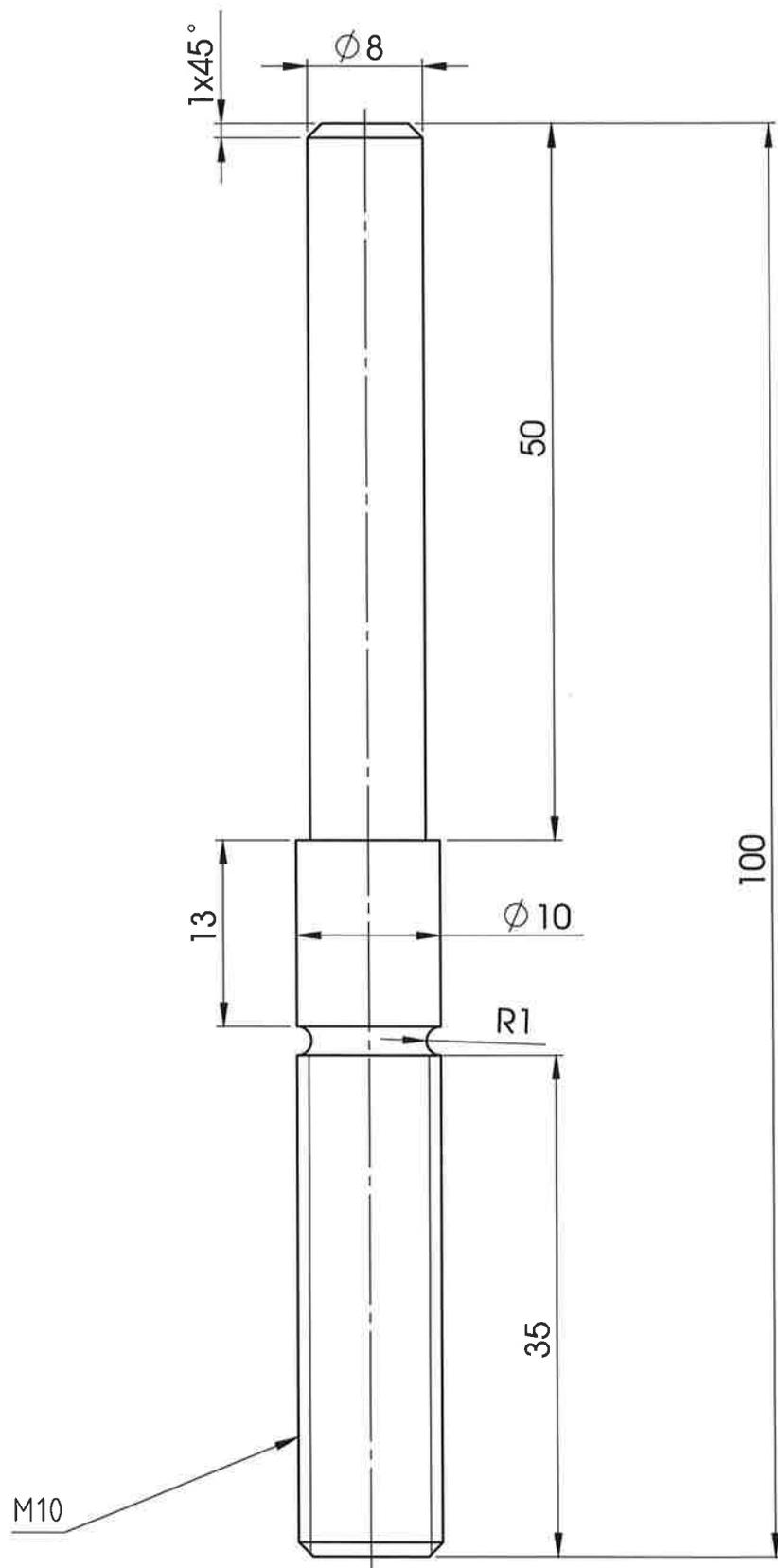
Blatt
20 von 27



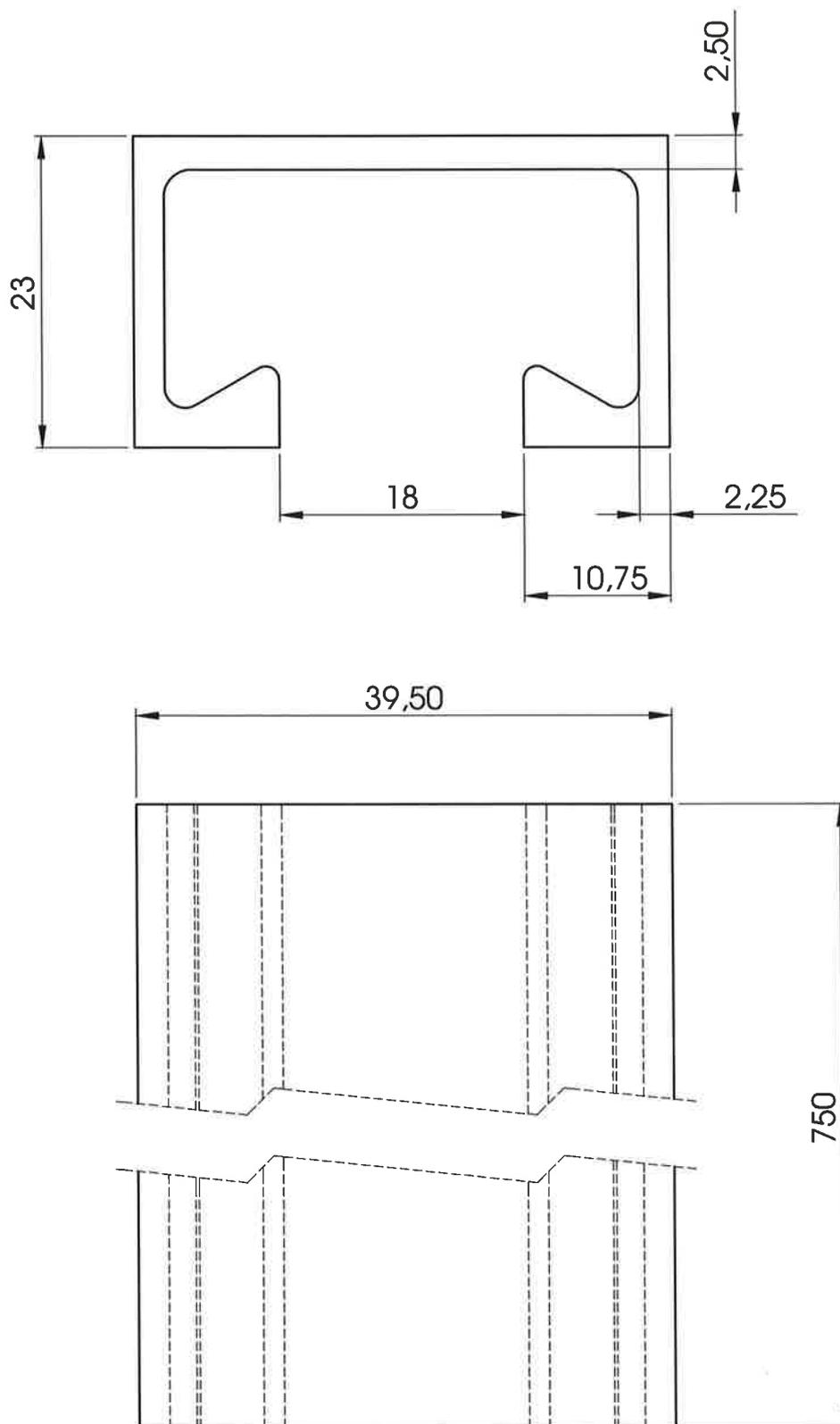
| | | | | |
|---|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material 1.0045 (S355JR) | Gewicht 83.69 g | Projekt Messstreckenboden | |
|  | Titel Winkel | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | |
| | Maßstab 1:1 | Ausgabedatum 11.05.2013 | Blatt 21 von 27 | |



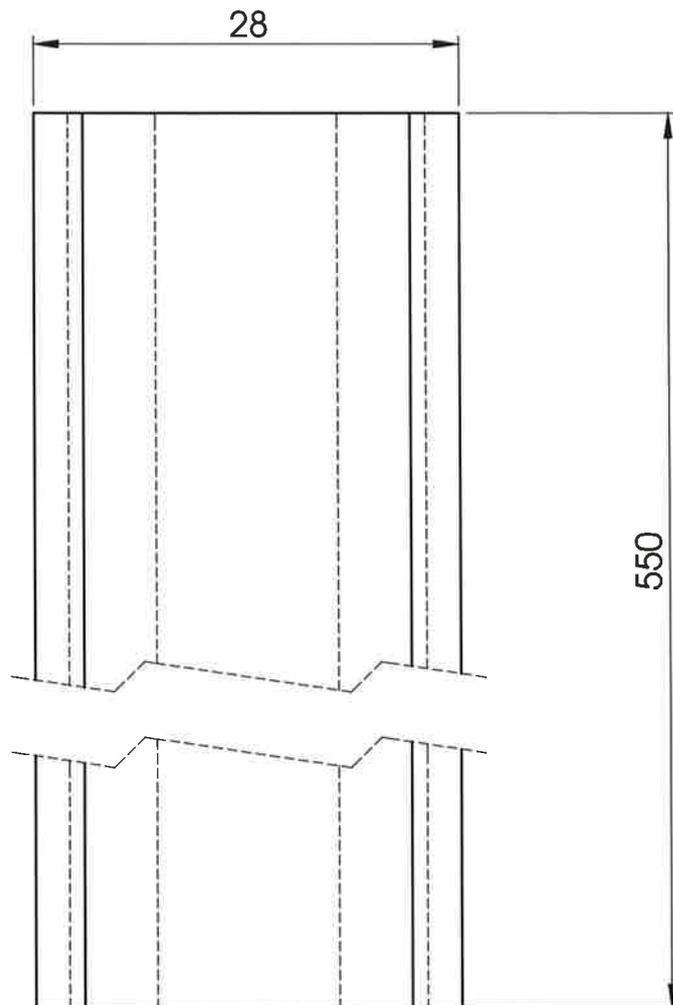
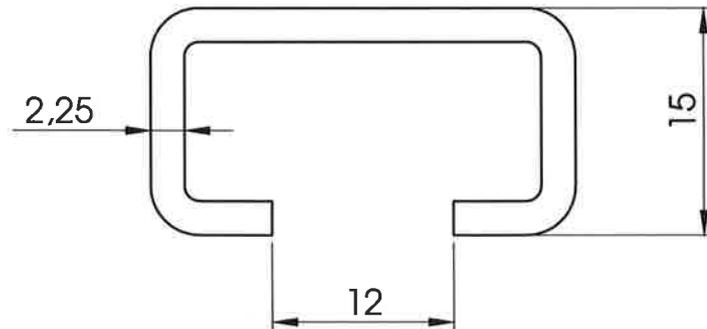
| | | | | | |
|---|--------------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material 1.0501 (C35) | Gewicht 107.01 g | Projekt Messstreckenboden | | |
|  | Titel Bolzenführung | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | | |
| | | | Maßstab 1:1 | Ausgabedatum 11.05.2013 | Blatt 22 von 27 |



| | | | | | |
|---|------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|--|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material 1.2210 (115CrV3) | Gewicht 50.00 g | Projekt Messstreckenboden | | |
|  | Titel Bolzen | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | | |
| | Maßstab 2:1 | Ausgabedatum 11.05.2013 | Blatt 23 von 27 | | |



| | | | |
|---|------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material 1.0037 (S235JR) | Gewicht 1562.89 g | Projekt Messstreckenboden |
|  | Titel Schiene längs HM 40/22 | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung |
| | Maßstab 2:1 | Ausgabedatum 11.05.2013 | Blatt 24 von 27 |



Erstellt durch
Christian Sauermoser

Material
1.0037 (S235JR)

Gewicht
592.20 g

Projekt
Messstreckenboden



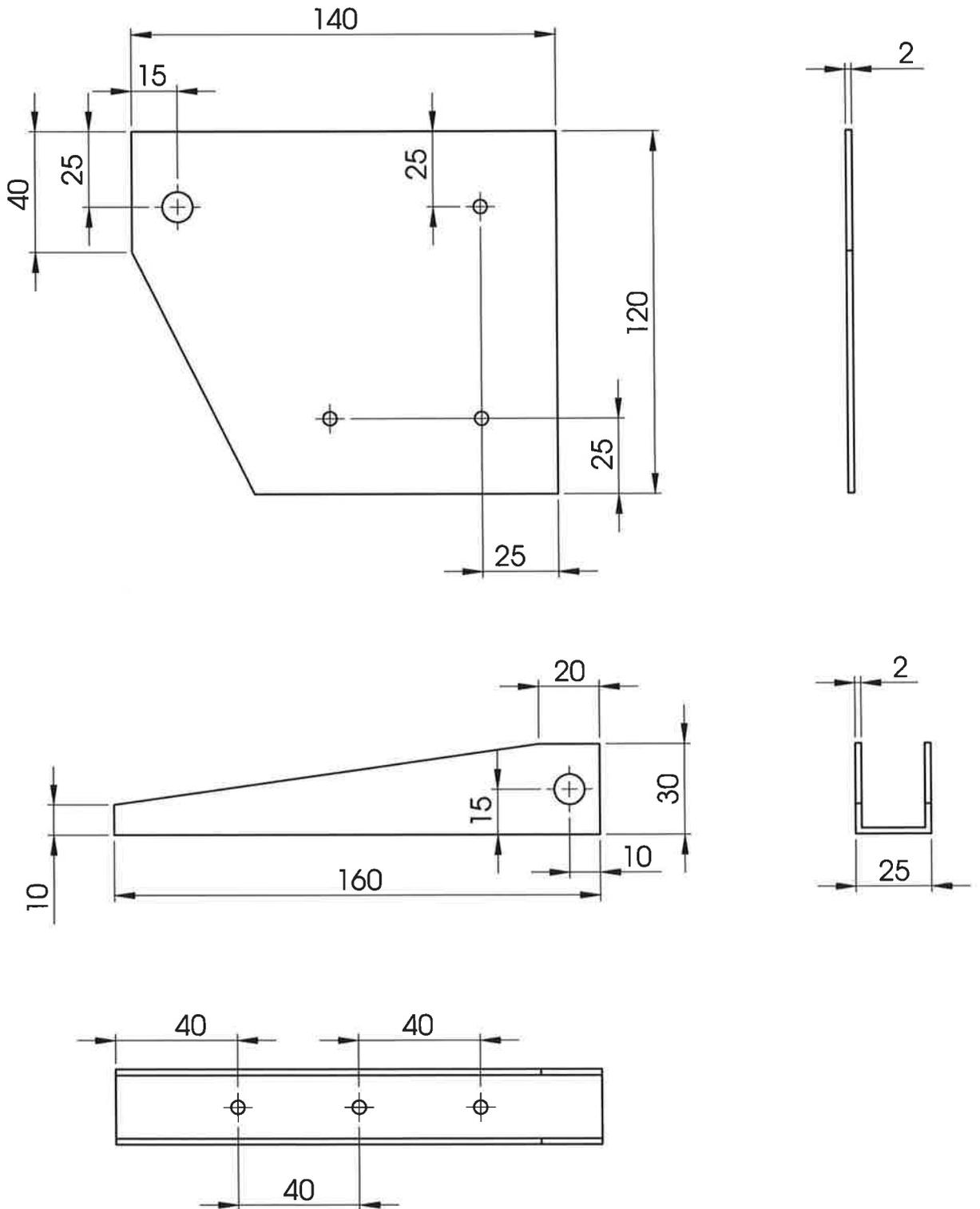
Titel
Schiene quer
HM 28/15

Dokumentenart
Einzelteilzeichnung

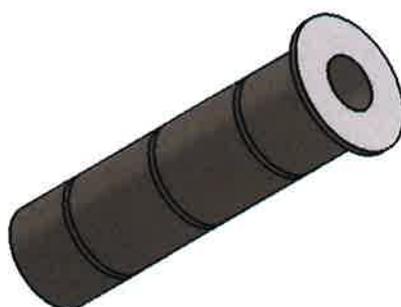
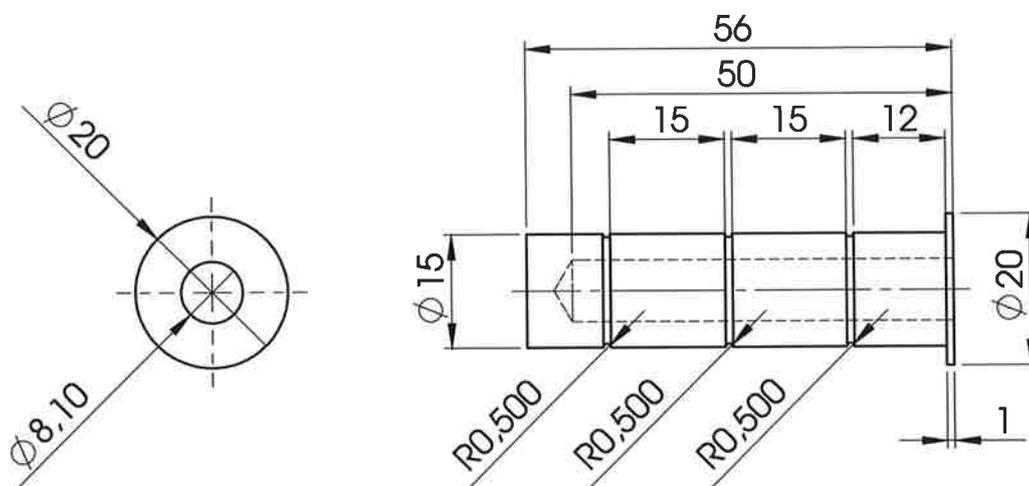
Maßstab
2:1

Ausgabedatum
11.05.2013

Blatt
25 von 27



| | | | | |
|---|------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material 1.0037 (S235JR) | Gewicht 235.15 g | Projekt Messstreckenboden | |
|  | Titel Diffusorverstellung | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | |
| | Maßstab 1:2 | Ausgabedatum 11.05.2013 | Blatt 26 von 27 | |

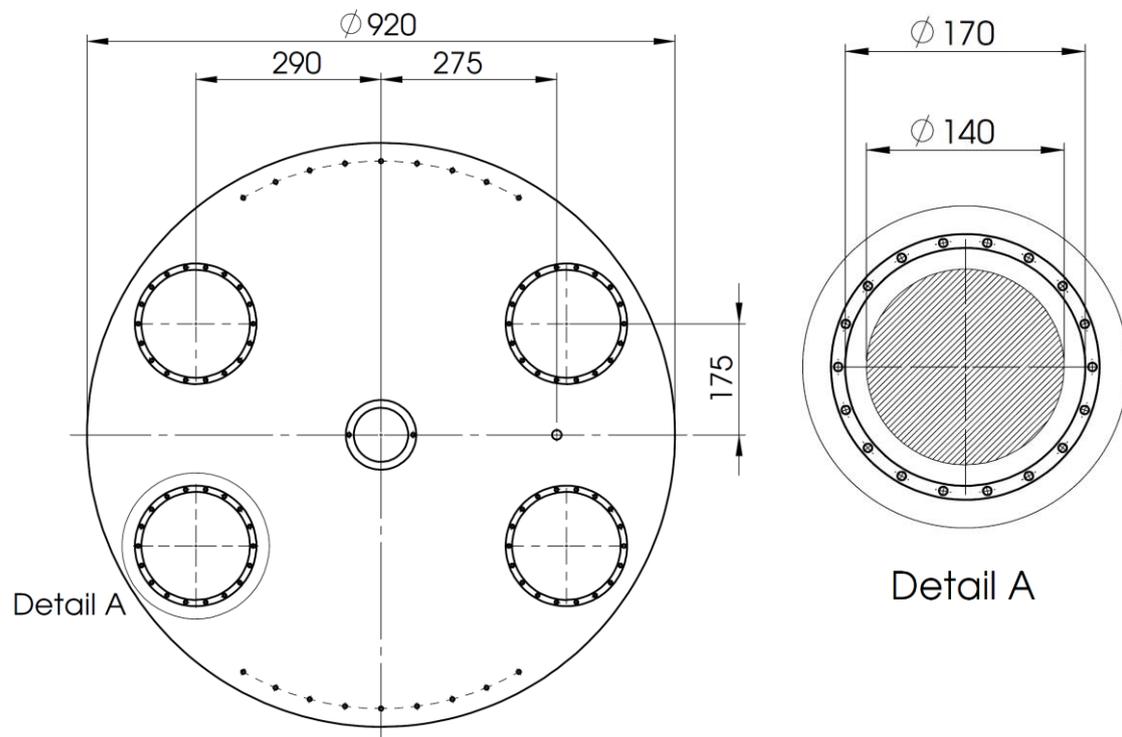


| | | | | |
|---|-----------------------------|--------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Erstellt durch Christian Sauermoser | Material 1.0037 (S235JR) | Gewicht 57.42 g | Projekt Messstreckenboden | |
|  | Titel Hülse Fennek | | Dokumentenart Einzelteilzeichnung | |
| | | | Maßstab 1:1 | Ausgabedatum 11.05.2013 |

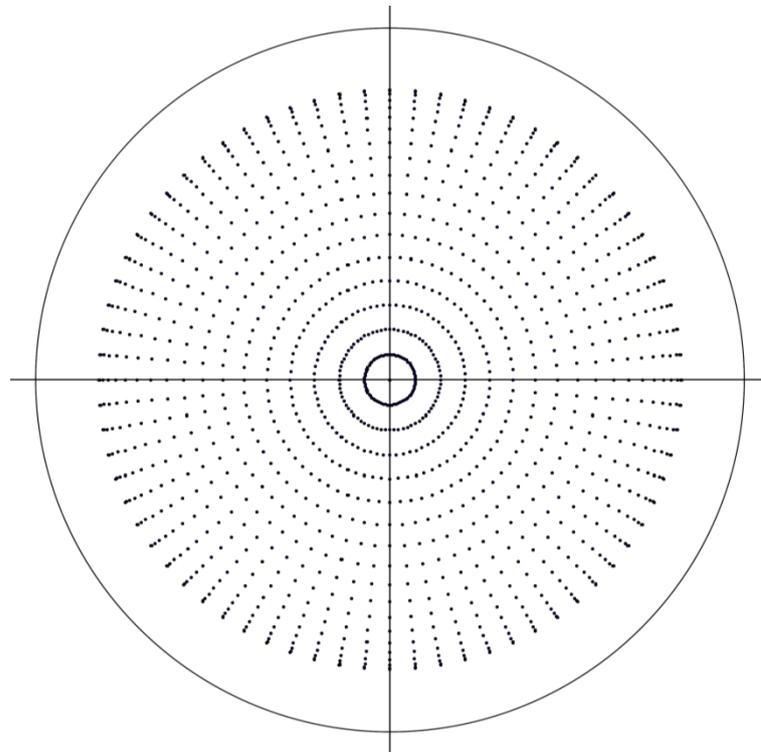
ANHANG B

KONFIGURATION MESSSTRECKENBODEN

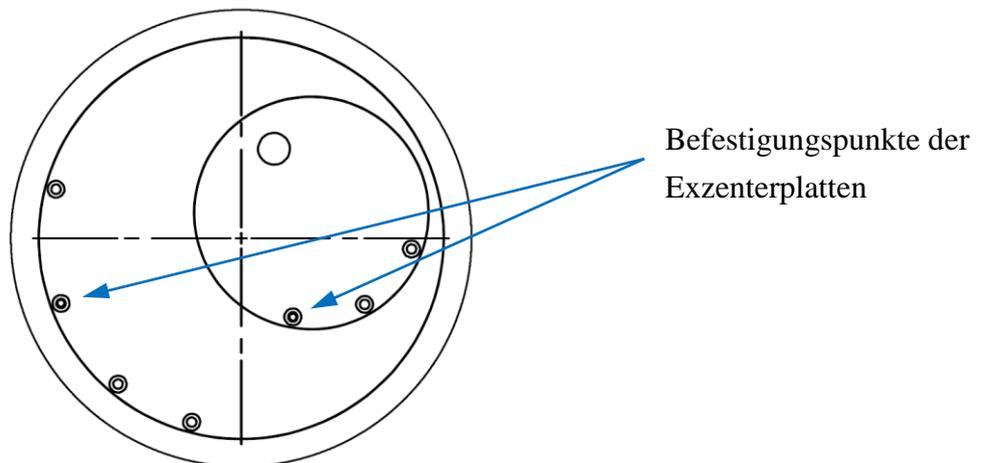
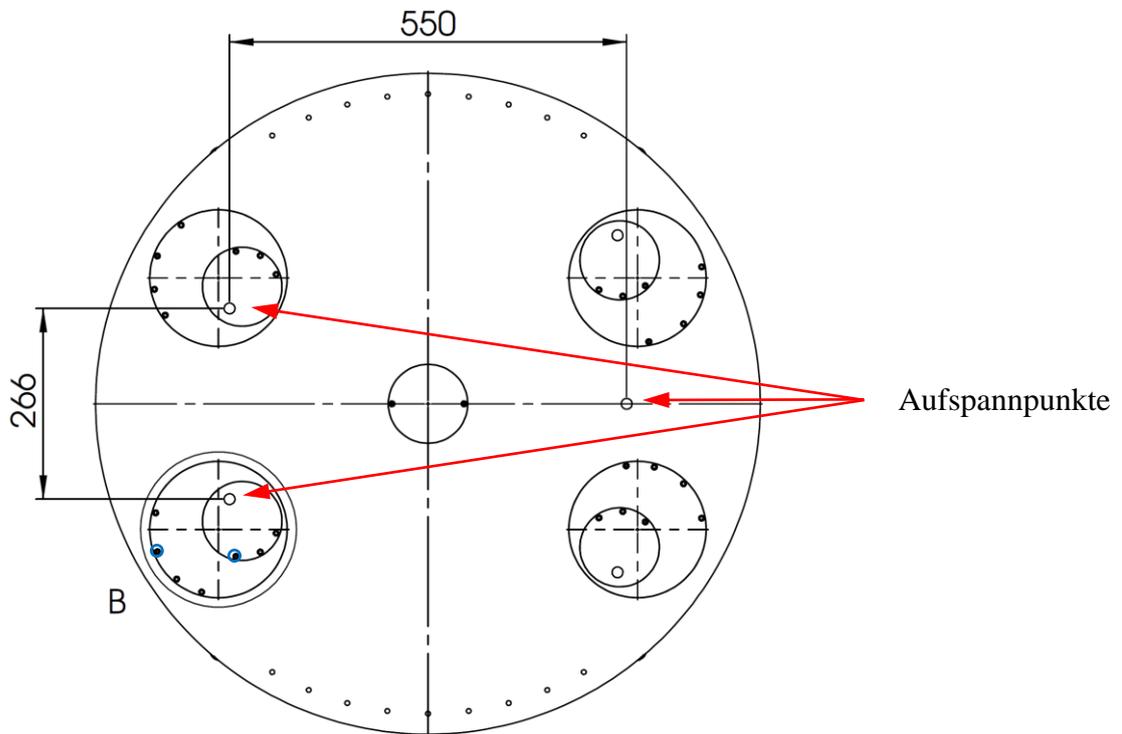
Position der exzentrischen Scheiben sowie der Bereich, der mit der Aufspannung erreicht werden kann (schraffiert in Detail A):



Darstellung der möglichen 2663 Punkte innerhalb des Verstellbereichs:

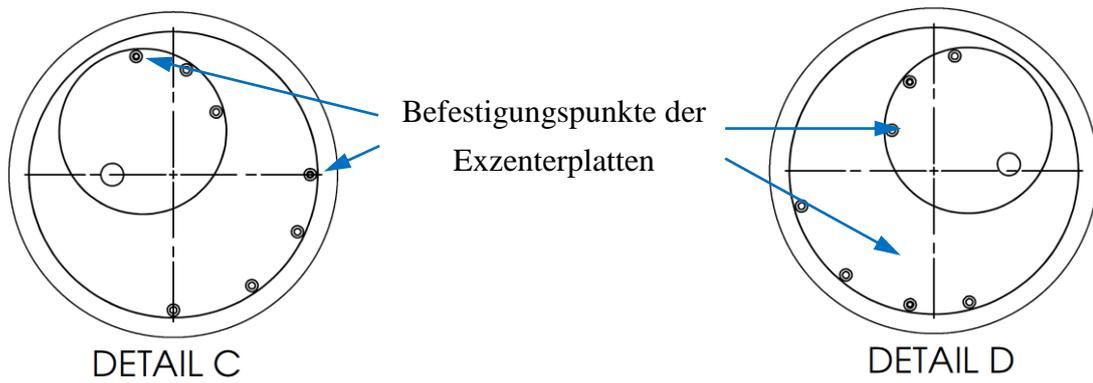
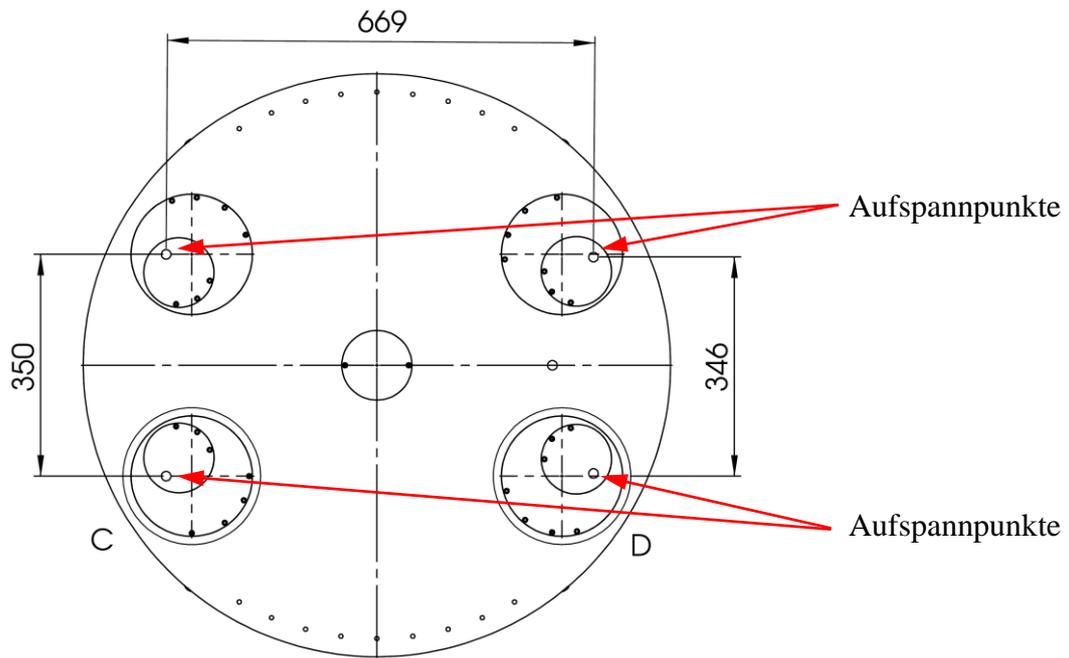


Konfiguration Modell Fennek:



DETAIL B

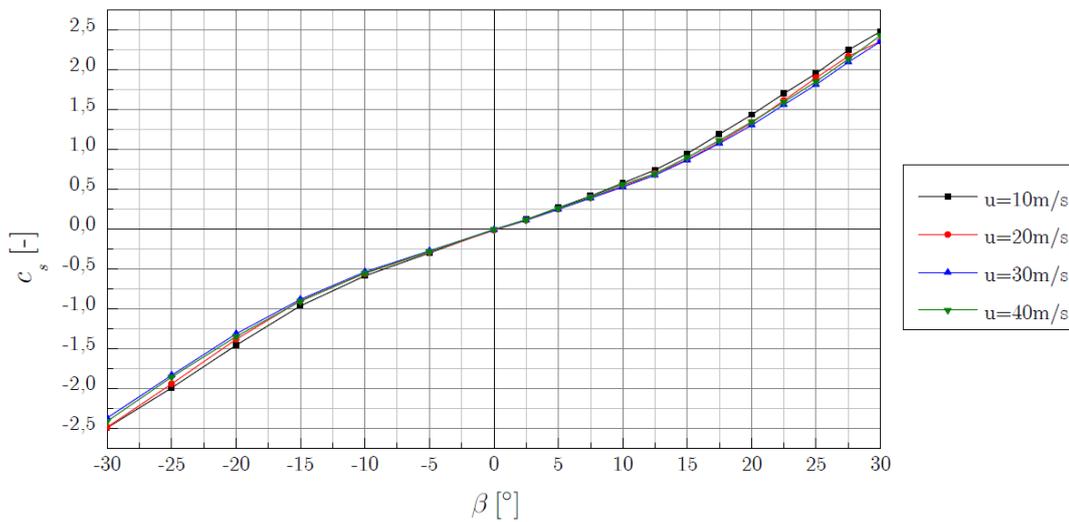
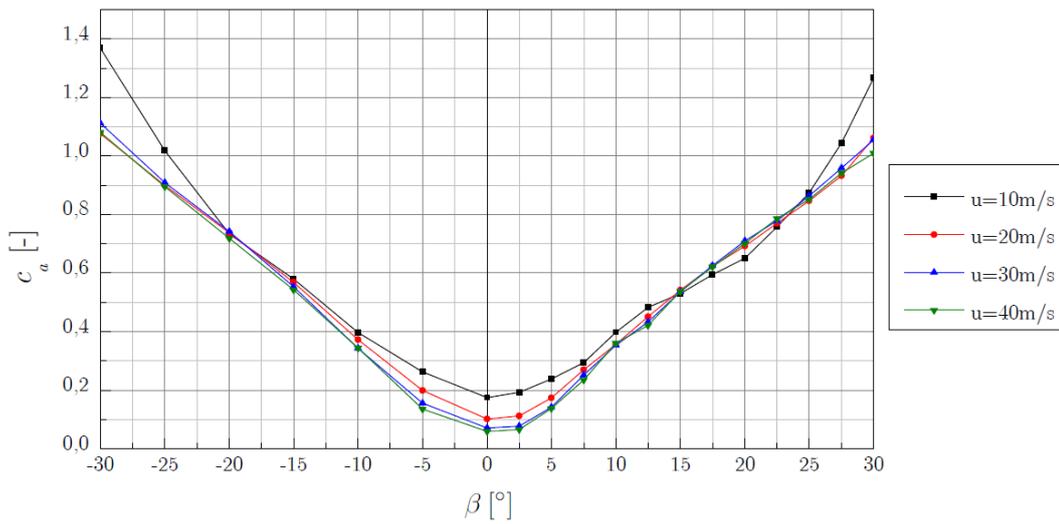
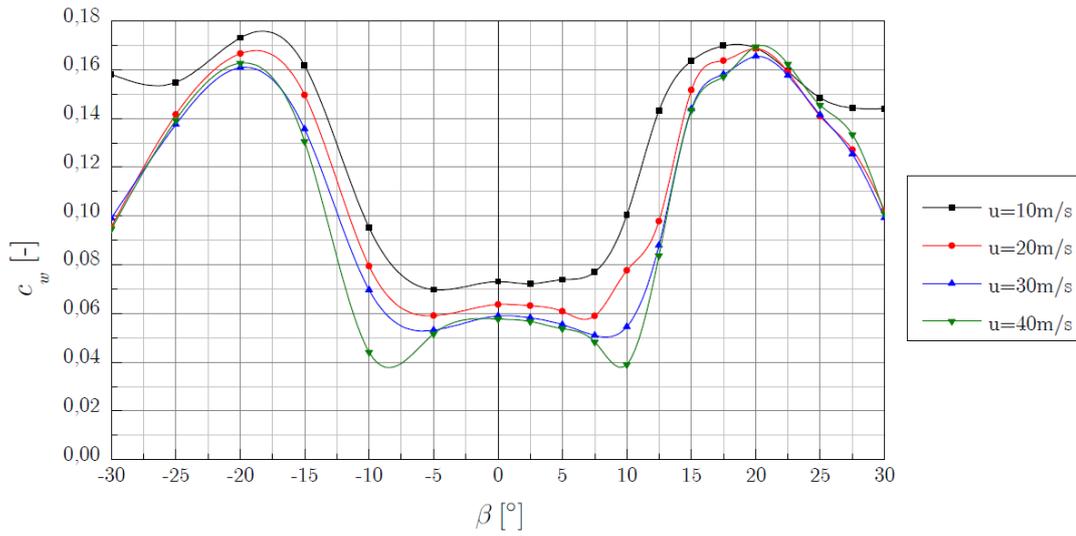
Konfiguration Modell Panther:

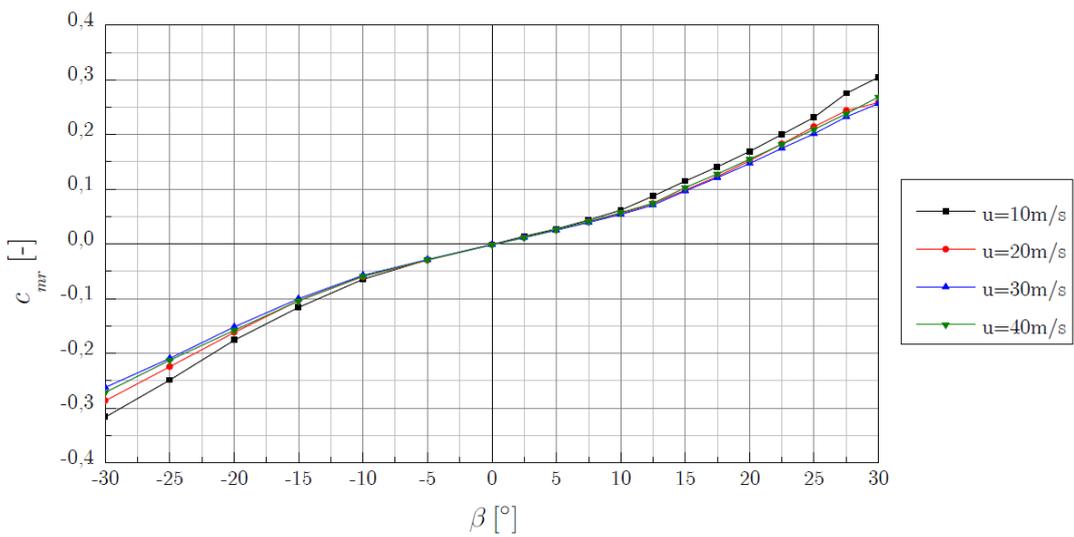
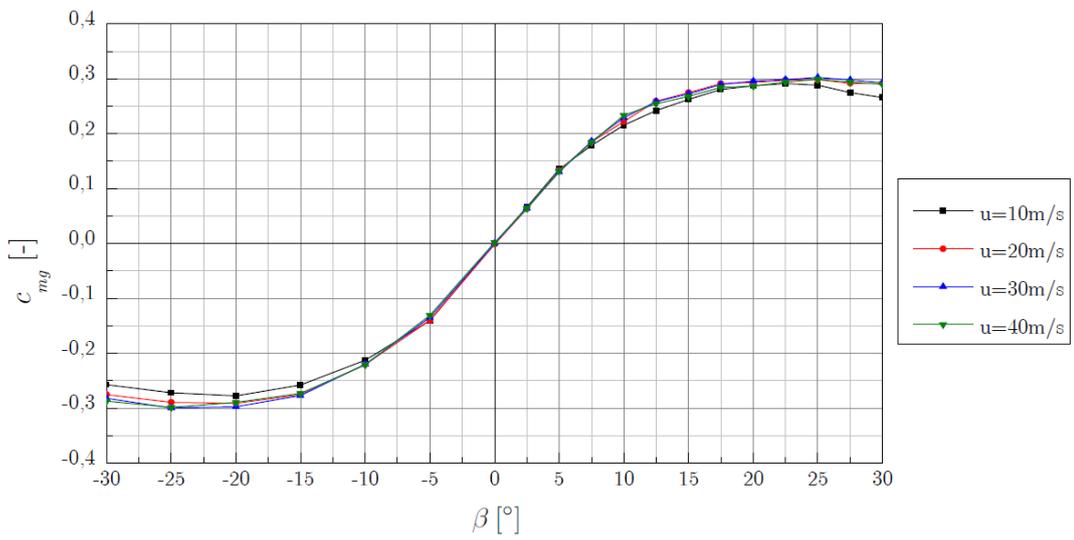
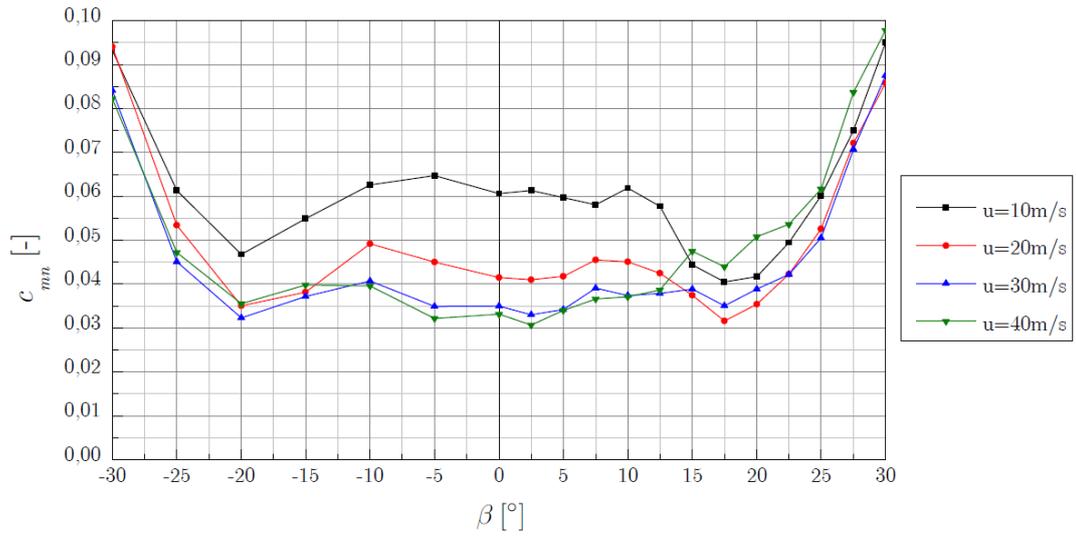


ANHANG C

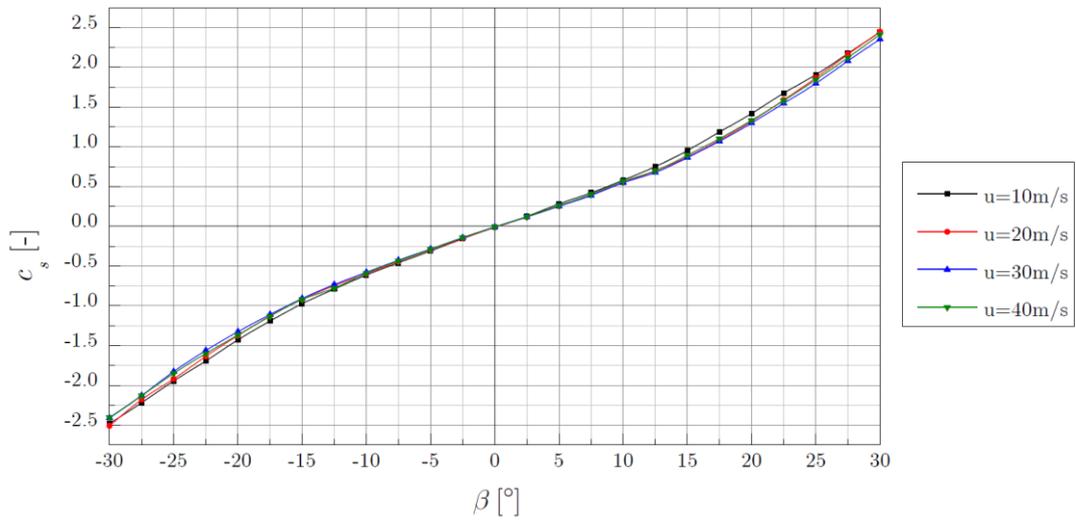
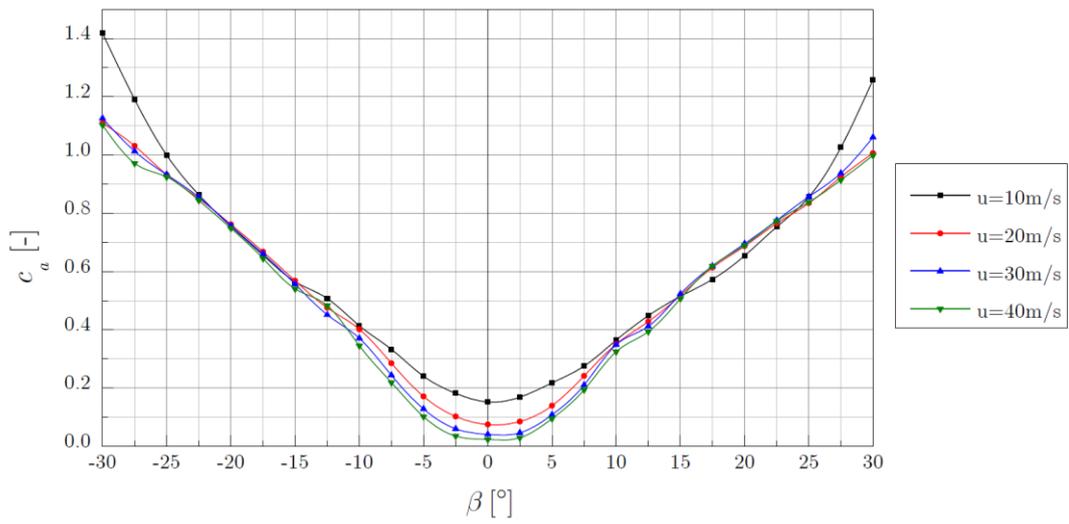
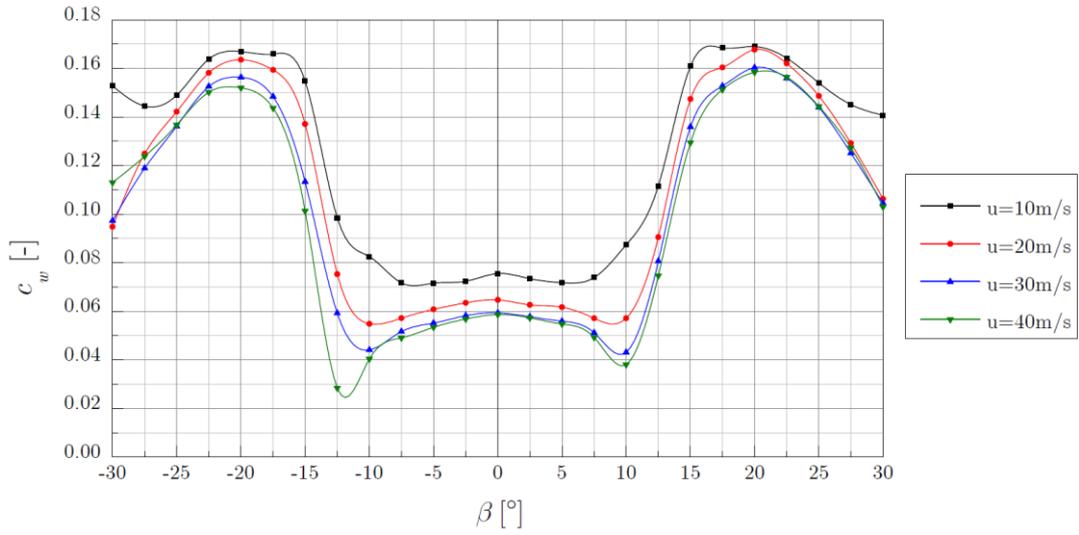
MESSERGEBNISSE

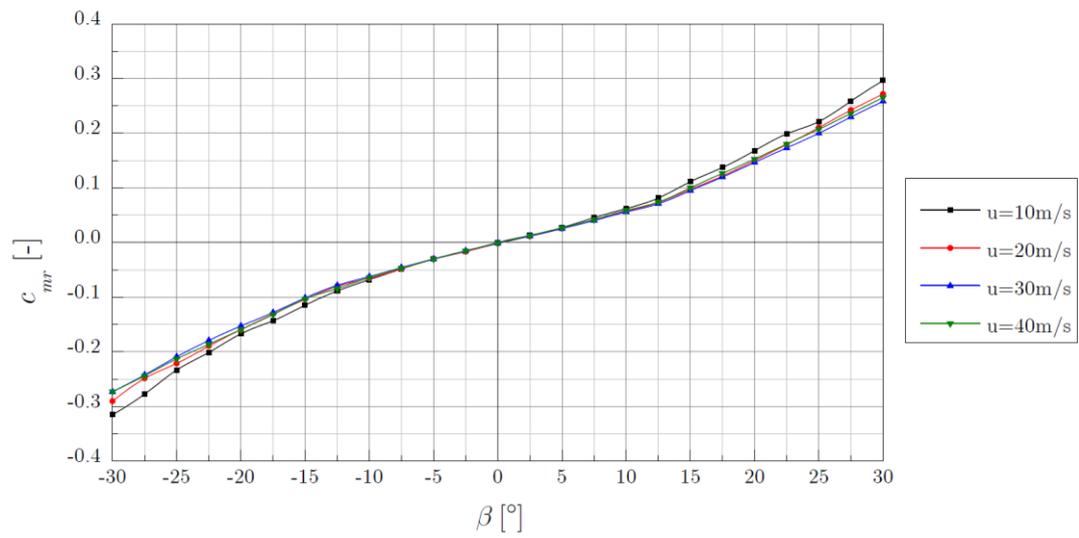
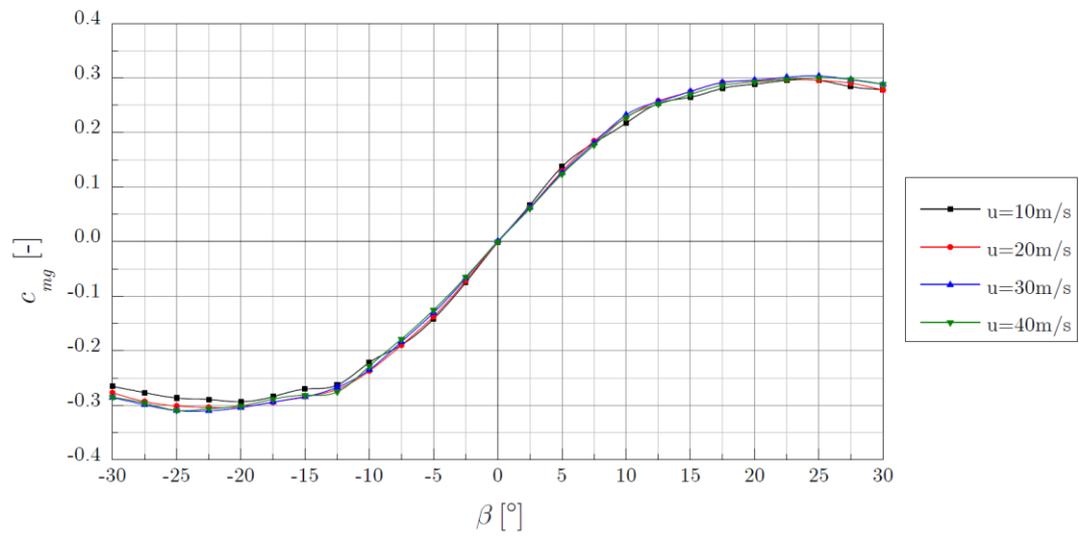
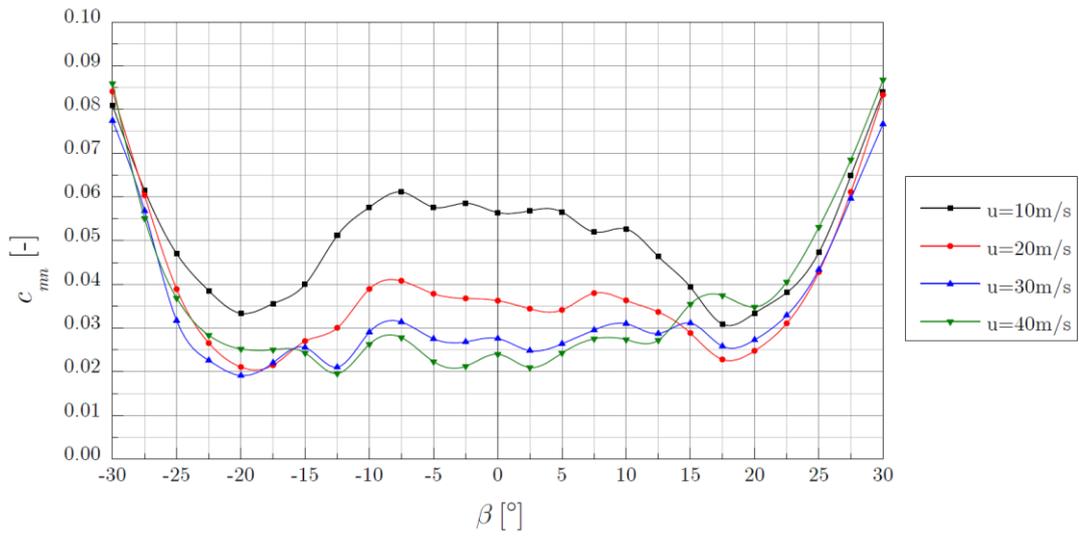
Modell Fennek: Messreihe_2 (hinterer Radkasten geschlossen)



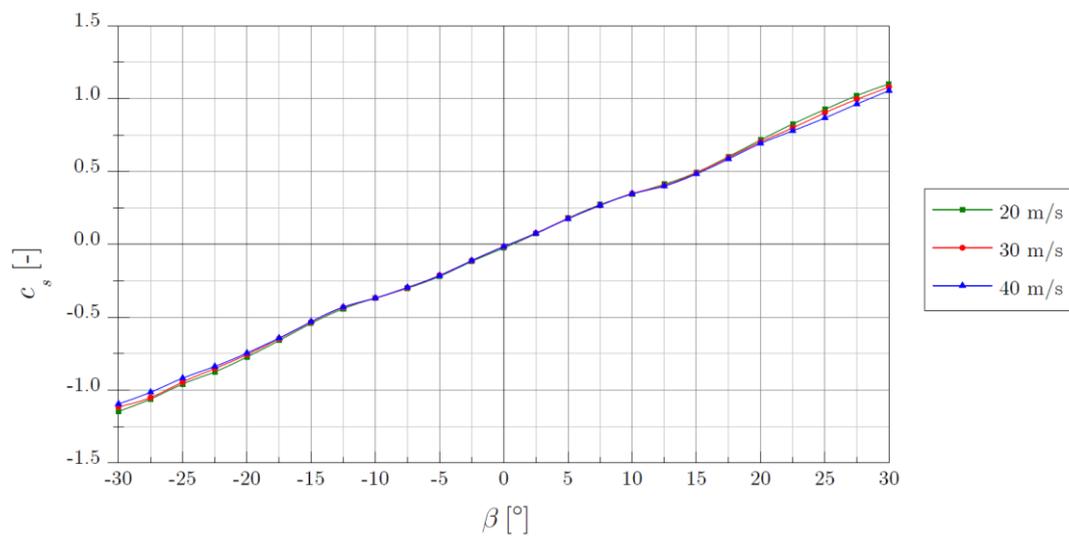
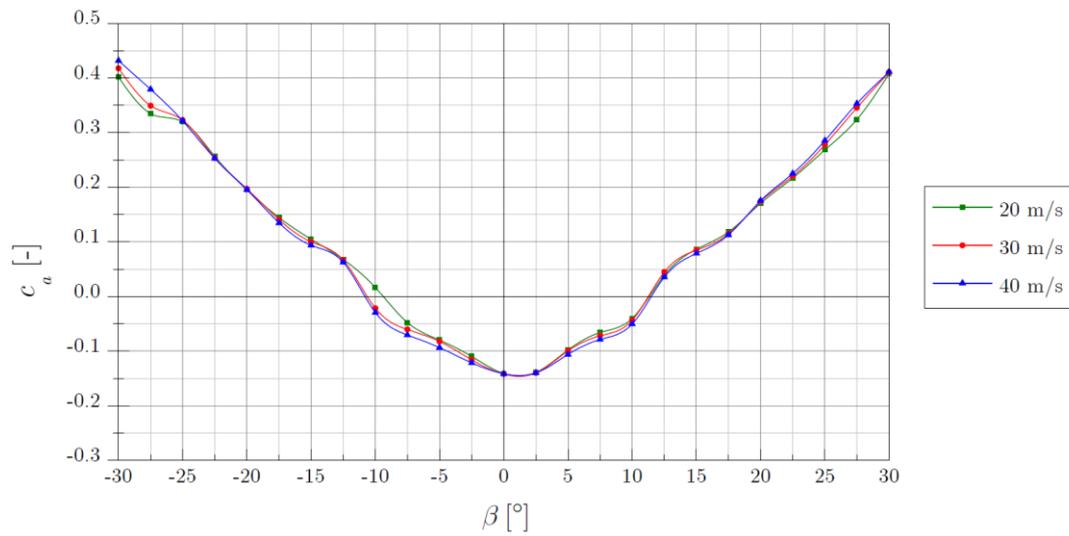
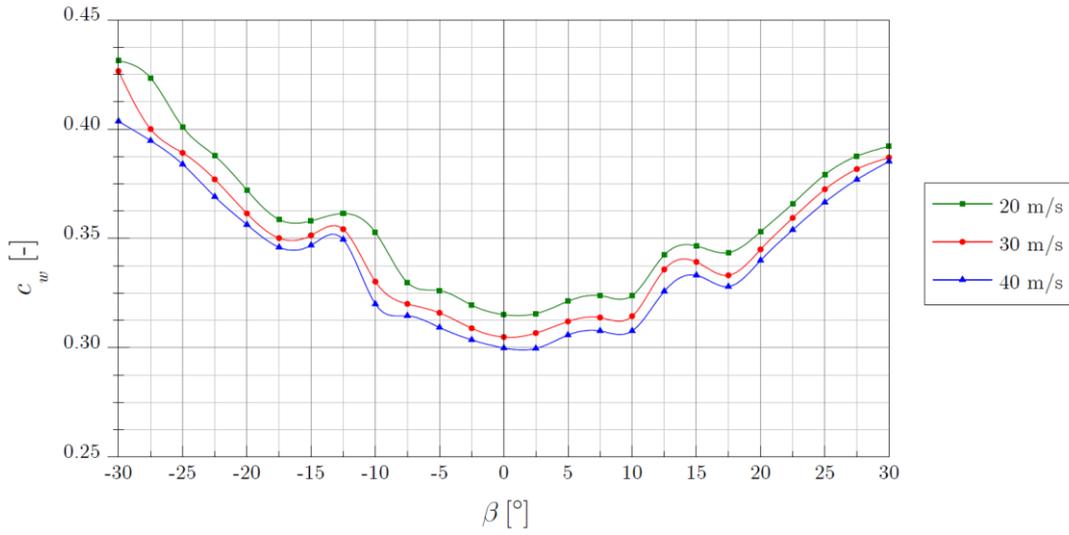


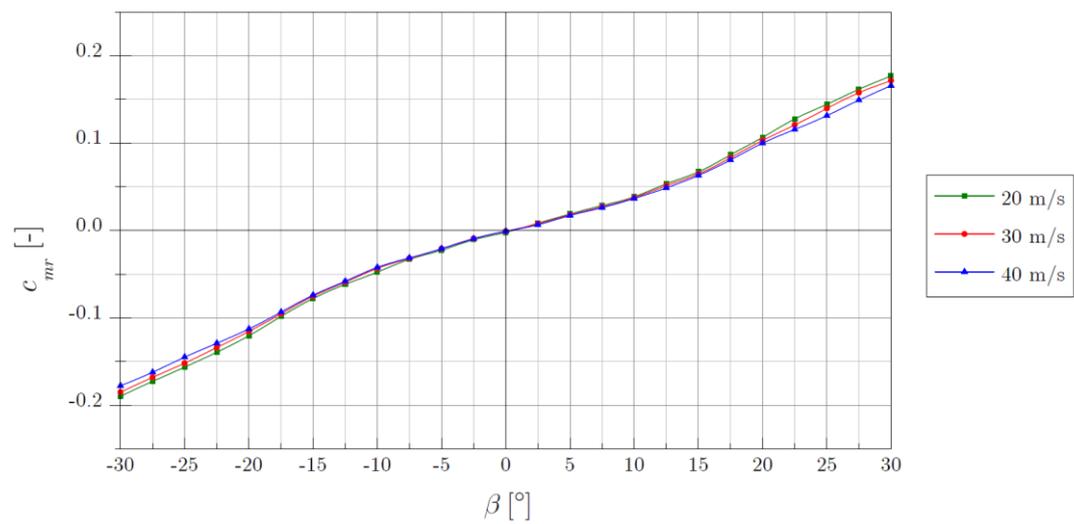
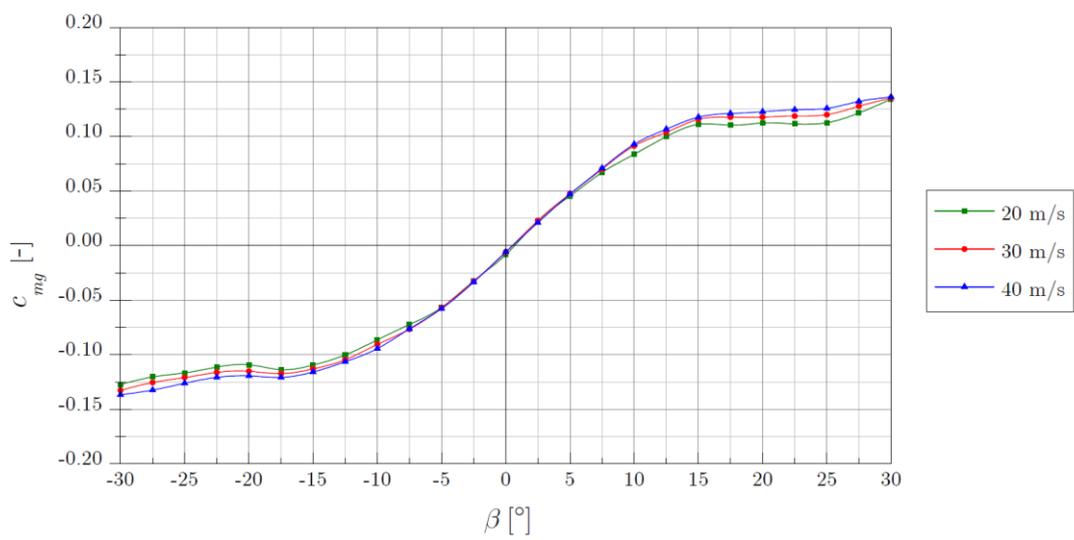
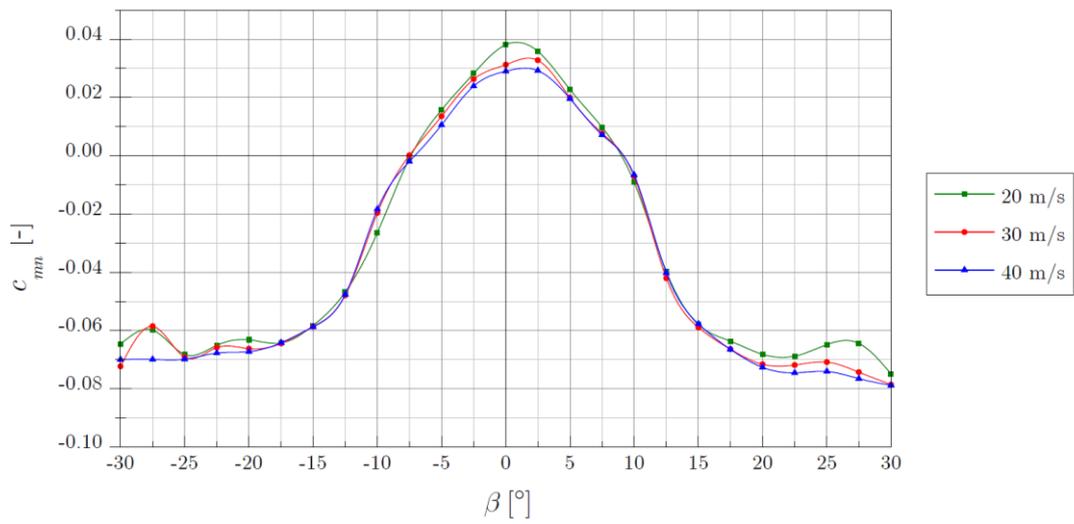
Modell Fennek: Messreihe_3 (hinterer Radkasten offen)



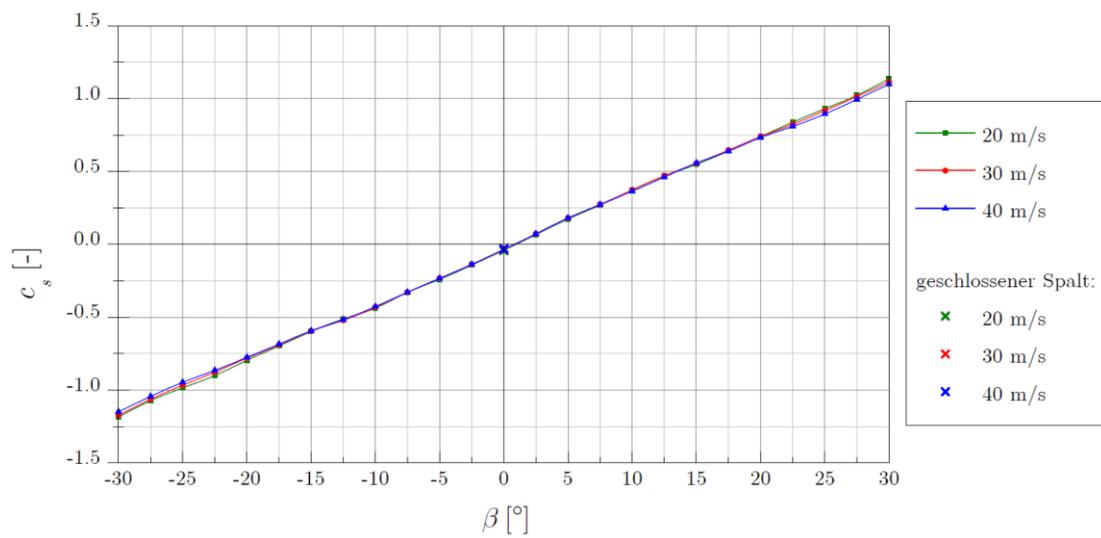
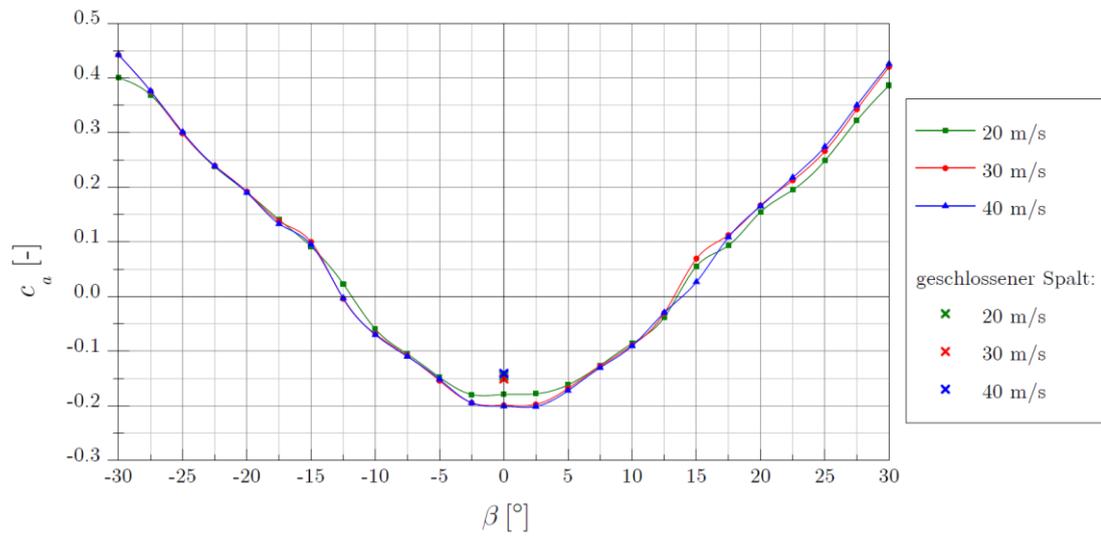
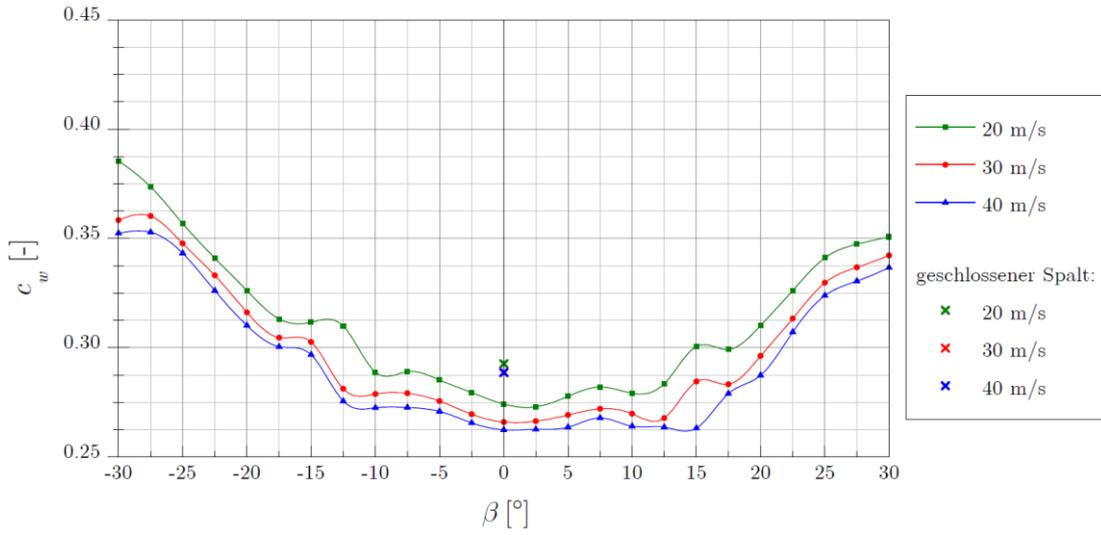


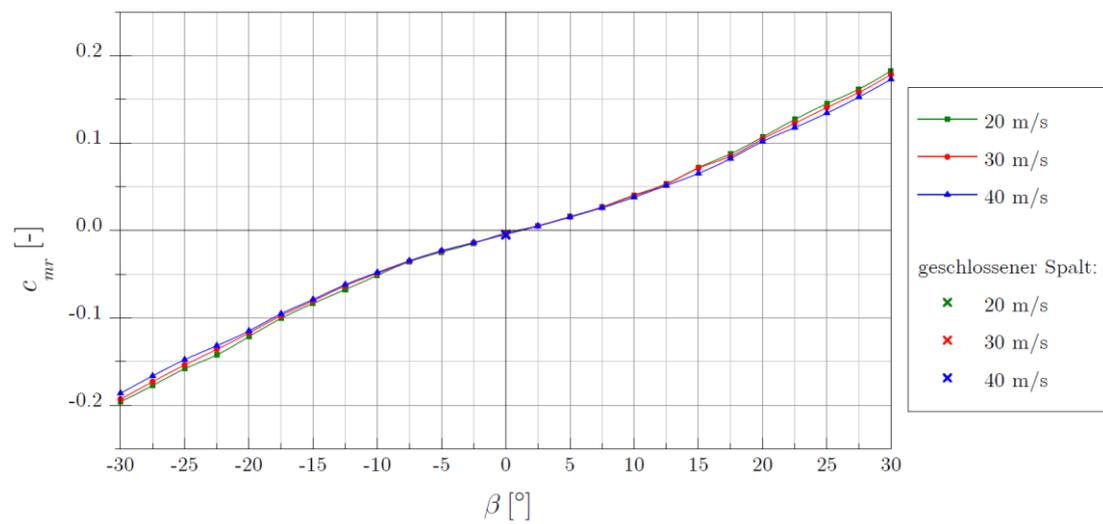
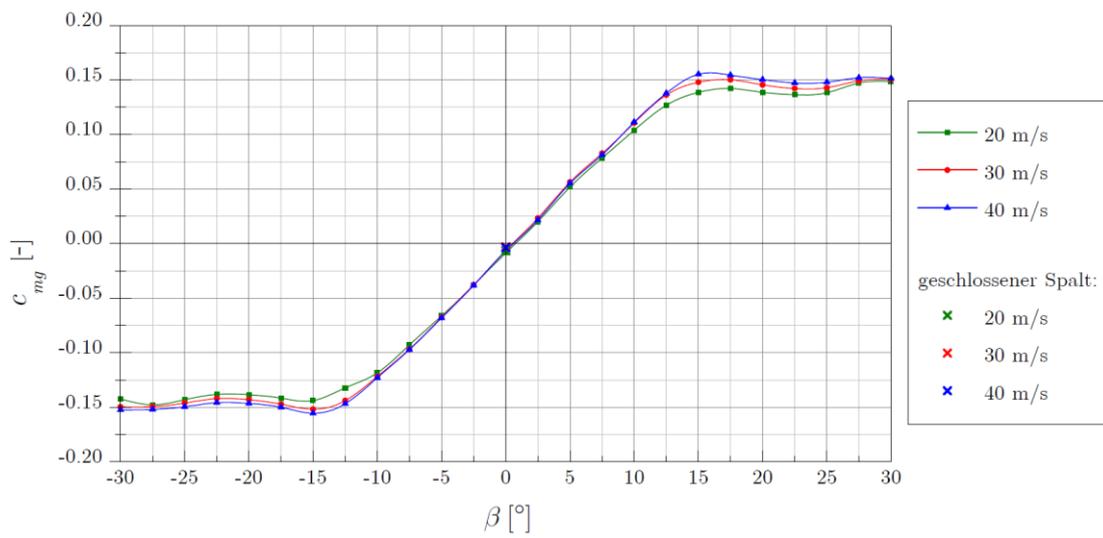
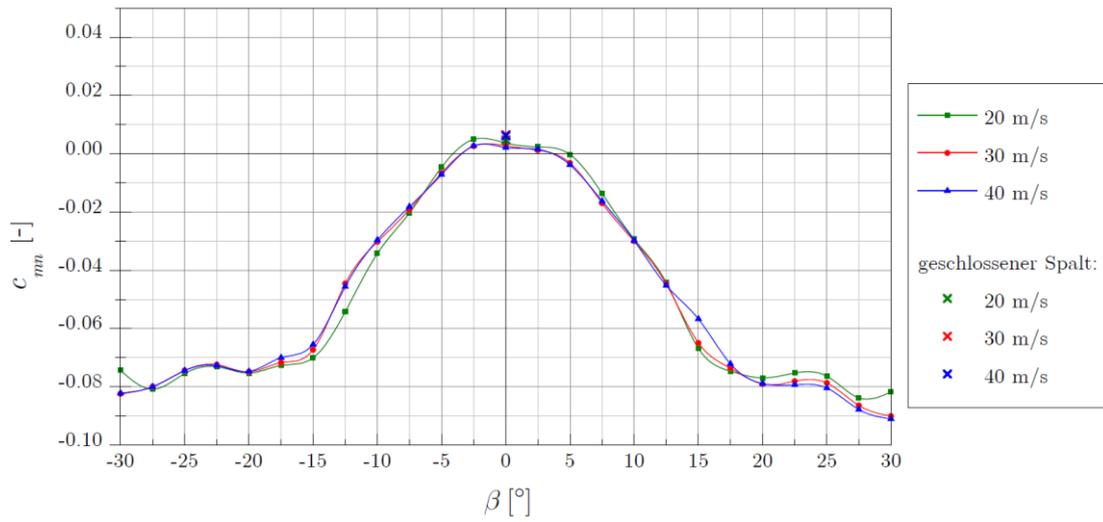
Modell Panther: Messung_01 (Originalversion; enge Spur, mit Radverkleidung)





Modell Panther: Messung_02 (breite Spur, mit Radverkleidung)





Modell Panther: Messung_03 (breite Spur, ohne Radverkleidung)

