



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Diplomarbeit

Studiendepartment Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

**Digitalisierung und konstruktive Veränderung einer
Austin Mini Fahrzeugtür zur rahmenlosen
Fahrzeugtür**

Sven Lapschies

18. August 2011



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
Berliner Tor 9
20099 Hamburg

Verfasser: Sven Lapschies
Abgabedatum: 18.08.2011

1. Prüfer: Prof. Dipl.-Ing. S. Bigalke
2. Prüfer: Prof. M.Sc. A. Piskun



Erklärung zur Diplomarbeit

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und noch nicht anderweitig zu Prüfungszwecken verwendet wurde.

Alle benutzten Quellen und Hilfsmittel sind angegeben, wörtliche und sinngemäße Zitate wurden als solche gekennzeichnet.

Sven Lapschies, Hamburg, den 18.08.2011

I. Kurzfassung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Umbau der Fahrzeugtür eines Austin Mini zu einer rahmenlosen Tür. Dazu wird die Austin Mini Tür ohne Anbauteile in CATIA V5 ausreichend genau digitalisiert und konstruktiv zur rahmenlosen Tür verändert. Zur Digitalisierung wird die Software David-Laserscanner verwendet und auf ihre Tauglichkeit für den Einsatz im Reverse Engineering hin untersucht. Da der Fensterrahmen eine wichtige Aufgabe bei der Scheibenführung übernimmt, werden anschließend Konzepte zur Verbesserung der Scheibenführung dieser rahmenlosen Tür untersucht und bewertet.

II. Arbeitsschritte / Arbeitsinhalte in Stichworten:

Grundlagen David-Laserscanner, Bewertung Scanergebnisse, Konstruktion mit CATIA V5, konstruktive Veränderung zur rahmenlosen Tür, Verbesserung Scheibenführung, Präsentation

III. Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit wurde an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg in der Fakultät Technik und Informatik, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau im Zeitraum vom 30.05.2011 bis 30.08.2011 erstellt. Die Idee dazu entstand während des laufenden Cabriolet-Umbaus eines Austin Mini und den damit einhergehenden baulichen Veränderungen der Seitentüren.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei den Betreuern meiner Diplomarbeit, den Professoren Stefan Bigalke und Alexander Piskun, für Anregungen und Ideen während der Umsetzung dieser Arbeit bedanken, desweiteren bei meinem Kommilitonen Richard Hammett für das zur Verfügung stellen der Seitentür und seinen vielfältigen Erfahrungen über die technischen Besonderheiten des Austin Mini.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern und meiner Schwester, die mich während der Studienzeit immer mit allen ihnen zur Verfügung stehenden Möglichkeiten unterstützten sowie meiner Lebenspartnerin Alexandra Stelzner für die nie nachlassende moralische Unterstützung während der Erstellung der Arbeit.

IV. Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzfassung.....	I
II.	Arbeitsschritte / Arbeitsinhalte in Stichworten:.....	I
III.	Vorwort.....	II
IV.	Inhaltsverzeichnis	III
V.	Abbildungsverzeichnis	VI
VI.	Tabellenverzeichnis.....	VIII
VII.	Abkürzungsverzeichnis	IX
VIII.	Glossar.....	X
1.	Planen und Klären der Aufgaben.....	1
	1.1. Zielsetzung	1
	1.2. Zeitplan	1
	1.3. Erläuterung der Arbeitsschritte.....	2
2.	Einleitung.....	4
	2.1. Der Austin Mini	4
	2.2. Cabriolets	6
	2.3. Reverse Engineering im Fahrzeugbau	7
	2.4. Die verwendete Austin Mini Tür	8
3.	Möglichkeiten zur Digitalisierung.....	10
	3.1. Übersicht über die möglichen Verfahren zur Digitalisierung.....	10
	3.1.1. Taktiles Digitalisieren	10
	3.1.2. Optisches Digitalisieren.....	11
	3.1.3. Auswahl des Verfahrens.....	12
	3.2. Die Software David-Laserscanner	13
	3.3. Die Handmessung	15

4.	Digitalisierung mit David-Laserscanner	18
4.1.	Benötigte Komponenten	18
4.1.1.	Software	18
4.1.2.	Kamera	18
4.1.3.	Linienlaser	18
4.1.4.	Kalibrierkörper	19
4.2.	Scandurchführung	19
4.2.1.	Der Scanaufbau	19
4.2.2.	Durchführung des Scans.....	22
4.3.	Beurteilung der Ergebnisse	34
4.3.1.	Faktoren für die Beeinflussung der Genauigkeit	34
4.3.2.	Ermittlung der Genauigkeit zwischen Scan und Original	35
4.4.	Fazit	40
5.	Konstruktion der Tür in CATIA V5	41
5.1.	Ausrichten der Punktwolken	41
5.2.	Übertragen der von Hand gemessenen Punkte	41
5.3.	Konstruktion der Außenhaut	42
5.3.1.	Konstruktion der Aufsteckfläche für die äußere Wetterleiste.....	44
5.3.2.	Konstruktion der Hauptaußenfläche.....	45
5.3.3.	Konstruieren der Tür-Falze.....	49
5.3.4.	Konstruktion des Verstärkungsbleches für die Spiegelbefestigung.....	52
5.4.	Konstruktion der Seitenscheibe	53
5.5.	Konstruktion des Fensterrahmens	54
5.6.	Konstruktion des Innenblechs und Detaillierung	56
5.6.1.	Konstruktion der Basisflächen	57
5.6.2.	Detaillierung des Innenblechs	59
5.6.3.	Detaillierung der Außenhaut.....	64
5.7.	Im CAD-Modell vereinfachte Bereiche	66
5.8.	Festlegung der Scheibenpositionen	66

5.9 Fazit.....	68
6. Konstruktive Veränderung zur rahmenlosen Tür	69
6.1. Allgemeine Anforderungen an rahmenlose Türen	69
6.2. Übertragene Anforderungen an die Austin Mini Tür	70
6.3. Veränderung zur rahmenlosen Tür	71
6.3.1. Beschnitt des Fensterrahmens.....	71
6.3.2. Untersuchung im CATIA FEM-Modul	72
6.4. Maßnahmen zur Fensterrahmenstabilisierung	76
6.4.1. Auswahl	76
6.4.2. Konstruktion der Dreiecksbleche	76
6.5. Untersuchung der Scheibenführung	83
6.5.1. Verlängerung des Fensterrahmens	85
6.5.2. Verbesserung der Scheibenführung mittels zusätzlicher Führungselemente	86
6.5.3. Möglichkeiten zur Verbesserung des Anpressdrucks der Seitenscheibe	91
6.6. Fazit.....	94
7. Schlussbetrachtung und Ausblick	95
8. Anhang.....	96
8.1. Literaturverzeichnis	96
8.2. Ermittelte Koordinaten der Karosseriepunkte durch Handmessung	97
8.3. Ermittelte Koordinaten der Fensterscheibe durch Handmessung.....	98
8.4. Zeichnungsableitung Dreiecksbleche Version 1	100
8.5. Zeichnungsableitung Dreiecksbleche Version 2	102
8.6. Zeichnungsableitung Verlängerungsstück Fensterrahmen	104
8.7. Zeichnungsableitung der Scheibenführungselemente.....	105

V. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Zeitplan.....	1
Abbildung 2-1:	Zeichnung des Mini von 1956	5
Abbildung 2-2:	Morris Mini Minor von 1959	5
Abbildung 2-3:	Die Austin Mini Karosserie im Fahrzeuglabor der HAW-Hamburg	8
Abbildung 2-4:	Die verwendete Austin Mini MK IV Tür.....	9
Abbildung 2-5:	Seitenscheibe mit einer Klemmschiene	9
Abbildung 2-6:	Fensterheber des Austin Mini MK IV	9
Abbildung 3-1:	Verfahren des taktilen Digitalisierens.....	10
Abbildung 3-2:	Optische Digitalisierungsverfahren	12
Abbildung 3-3:	Das Prinzip der Triangulation	13
Abbildung 3-4:	Das Prinzip des Lichtschnittverfahrens	14
Abbildung 3-5:	Lage der Messpunkte an der Außenhaut.....	15
Abbildung 3-6:	Messpunkte an der Scharnierseite	16
Abbildung 3-7:	Messpunkte an der Schlossseite	16
Abbildung 3-8:	Prinzip der Punktmessung von Hand	17
Abbildung 4-1:	Schematische Darstellung des Scanaufbaus	19
Abbildung 4-2:	Kalibrierwände mit Kalibrierpunkten.....	20
Abbildung 4-3:	Laserwasserwaage Black & Decker LZR 310.....	20
Abbildung 4-4:	Microsoft HD-3000 Webcam.....	21
Abbildung 4-5:	Aufnahmerichtungen der Kamera beim Scannen.....	21
Abbildung 4-6:	David-Laserscanner Startbildschirm	22
Abbildung 4-7:	Kamerakalibrierungsfenster.....	23
Abbildung 4-8:	Fenster "Bildformat ändern"	24
Abbildung 4-9:	Ausrichtung der Tür an der Kalibrierwand.....	24
Abbildung 4-10:	Das Kameraeigenschaften Fenster.....	25
Abbildung 4-11:	Kalibrierte Kameraeinstellung nach Bearbeitung des Kamerabildes mit dem Radierer	26
Abbildung 4-12:	Das Scan-Bildschirmfenster.....	26
Abbildung 4-13:	Anzeige der Scanqualität im Scanfenster.....	27
Abbildung 4-14:	erster Scan der Außenseite	29
Abbildung 4-15:	zweiter Scan der Außenseite.....	29
Abbildung 4-16:	erster Scan der Innenseite	29
Abbildung 4-17:	zweiter Scan der Innenseite	29
Abbildung 4-18:	Das 3D Shapefusion Bildschirmfenster	30
Abbildung 4-19:	Bearbeitungsleiste im 3D-Fenster	30
Abbildung 4-20:	Markierung des Podest für die Löschung.....	31
Abbildung 4-21:	Das Scan-Ausrichtungsfenster.....	31
Abbildung 4-22:	Ausrichten der einzelnen Außenseiten-Scans.....	32
Abbildung 4-23:	Fusionierte Scans der Außenseite.....	32

Abbildung 4-24:	Die Kombinierte Tür-Innenseite.....	33
Abbildung 4-25:	Importfenster in der Workbench "Digitized Shape Editor"	36
Abbildung 4-26:	Ergebnis der Facettierung des Innenseitenscans durch CATIA.....	37
Abbildung 4-27:	Strecken am Außenblech zur Kontrolle der Messgenauigkeit.....	37
Abbildung 4-28:	Strecken am Innenblech zur Kontrolle der Messgenauigkeit	38
Abbildung 5-1:	Erstellte Außenfläche mit den Punkten aus der Handmessung	42
Abbildung 5-2:	Flächenunterteilung Außenhaut	43
Abbildung 5-3:	Aufsteckfläche im Original	44
Abbildung 5-4:	Aufsteckfläche in CATIA V5	44
Abbildung 5-5:	Aufbau einer Beziér-Kurve	45
Abbildung 5-6:	Anschlussarten für Beziér-Kurven.....	46
Abbildung 5-7:	Kurvenverlauf mittels Spline	47
Abbildung 5-8:	Kurvenverlauf mittels Beziér	47
Abbildung 5-9:	Menü "ACA-Abgleich"	48
Abbildung 5-10:	Lichtbandanalyse der durch Strak erstellten Flächen.....	48
Abbildung 5-11:	Ermittlung des Falzradius	49
Abbildung 5-12:	Erstellen der Falzausrundung.....	50
Abbildung 5-13:	Projizieren der Falzkante.....	51
Abbildung 5-14:	CAD-Modell des Verstärkungsblechs für die Spiegelbefestigung.....	52
Abbildung 5-15:	CAD-Modell der Seitenscheibe	53
Abbildung 5-16:	Verengung des Fensterrahmenprofils an der Schlossseite.....	54
Abbildung 5-17:	Fensterrahmen und Außenhaut.....	55
Abbildung 5-18:	Flächenbenennung des Innenblechs.....	56
Abbildung 5-19:	Konstruktion der Konturlinie der Übergangsfläche	57
Abbildung 5-20:	Grundflächen des Türinnenblechs	58
Abbildung 5-21:	Türinnenblech vor Erstellung der Aggregataufnahmen.....	59
Abbildung 5-22:	Sicke im Innenblech.....	60
Abbildung 5-23:	Skizzen der Verprägung am Innenblech.....	60
Abbildung 5-24:	Verprägung mit Kantenverrundung am Innenblech	61
Abbildung 5-25:	Innenblech mit Türschlossausparungen.....	62
Abbildung 5-26:	Verstärkungsblech für Türschlossanbauteile	62
Abbildung 5-27:	Verstärkungsblech an der Scharnierseite	63
Abbildung 5-28:	oberer Falzübergang an der Schlossseite.....	64
Abbildung 5-29:	Konstruktionsgeometrie für die Vertiefung der Außenhaut für den Türgriff	65
Abbildung 5-30:	Detaillierte Außenhaut im Bereich des Türgriffs	65
Abbildung 5-31:	Lage der Scheibe im Fensterrahmen.....	67
Abbildung 5-32:	Scheibenzustände im CAD-Modell.....	67
Abbildung 5-33:	CAD-Modell der Austin Mini Seitentür	68
Abbildung 6-1:	Fensterrahmen rahmenlose Tür	71
Abbildung 6-2:	Spannungen am Ausgangsfensterrahmen	74
Abbildung 6-3:	Verschiebungen am Ausgangsfensterrahmen	74

Abbildung 6-4:	Spannungen am beschnittenen Rahmen	75
Abbildung 6-5:	Verschiebungen am beschnittenen Rahmen	75
Abbildung 6-6:	erste Variante der Dreiecksbleche für den Fensterrahmen	77
Abbildung 6-7:	Spannungen am Rahmen mit Dreiecksblechen	78
Abbildung 6-8:	Verschiebungen am Rahmen mit Dreiecksblechen	78
Abbildung 6-9:	Spannungen an den Übergängen zwischen Fensterrahmen und den Dreiecksblechen	79
Abbildung 6-10:	Formoptimierte Dreiecksbleche	79
Abbildung 6-11:	Spannungen am Rahmen mit formoptimierten Dreiecksblechen	80
Abbildung 6-12:	Verschiebungen am Rahmen mit formoptimierten Dreiecksblechen	80
Abbildung 6-13:	Spannungsverlauf an den formoptimierten Dreiecksblechen	81
Abbildung 6-14:	X-Schnitte zur Ermittlung der Fensterrahmenverlängerung.....	85
Abbildung 6-15:	Verlängerung des Fensterrahmens um 100 mm	86
Abbildung 6-16:	Verbindungselemente zwischen Fensterscheibe und zusätzlicher Scheibeführung	87
Abbildung 6-17:	Montage der Führungselemente	88
Abbildung 6-18:	hinteres zusätzliches Scheibeführungselement.....	89
Abbildung 6-19:	Schnittdarstellung im Bereich der Dreiecksbleche bei $x = - 78,5$ mm	91
Abbildung 6-20:	Erzeugung einer Vorspannung der Scheibe durch Metallseele innerhalb der Dichtung.....	92
Abbildung 6-21:	CAD-Modell der rahmenlosen Austin Mini Seitentür	94

VI. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kamerawerte für Kalibrierung und Scan	27
Tabelle 2:	Vergleich der Messwerte zwischen Punktwolke und Originaltür	38
Tabelle 3:	Vergleich von Spannungen und Verschiebungen des Fensterrahmens mit den Dreiecksblechvarianten	82

VII. Abkürzungsverzeichnis

ACA	A utomotive C lass A , Workbench in CATIA V5 zum Erstellen von Class A Flächen
BMC	B ritish M otor C orporation, ehemaliger Fahrzeughersteller aus Longbridge, England
BMW	B ayrische M otoren W erke, Automobil- und Motorradhersteller aus Deutschland
CAD	C omputer A ided D esign, rechnerunterstützte Konstruktion
FEM	F inite- E lemente- M ethode, numerisches Verfahren zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen
.fps	F rames p er s econd, ein Maß zur Angabe der Bildfrequenz
GSA	G enerative S tructural A nalysis, Workbench in CATIA V5 für FEM-Berechnungen
.pdf	P ortable D ocument F ormat, plattformunabhängiges Dateiformat für Dokumente von Adobe Systems
.stl	S urface T esselation L anguage, Beschreibt eine 3D-Geometrie in Form von angenäherten Dreiecksfacetten

VIII. Glossar

Boolesche Operatoren	logischer Operator, basiert auf einer Verknüpfung aus der Booleschen Algebra
Bördeln	Umform- und Verbindungstechnik in der Blechverarbeitung
Class A Flächen	Qualitätsmerkmal, hier Flächen, die hohen optischen Ansprüchen aufgrund ihrer ständigen Sichtbarkeit genügen müssen
CATIA-Product	Dateiformat in CATIA V5, das auf einzelne vom Anwender ausgewählte CAD-Dateien zugreift und diese zu einer Baugruppe vereint
CATIA V5	Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application, ein CAD-Programm der französischen Firma Dassault Systèmes
Extrusionsfläche	Fläche, die aus einer Kurve oder Linie mittels Parallelverschiebung im Raum erzeugt wird
ICEM-Surf	Freiformflächen Modellierer der Firma ICEM Technologies GmbH, Deutschland
LS-DYNA	Simulationssoftware für nicht-lineare und hochdynamische Berechnungen von der Livermore Software Technology Corporation aus Livermore, USA
Pixel	kleinste Einheit einer digitalen Rastergrafik
Punktwolke	Anhäufung von Punkten, die in kartesischen Koordinaten beschrieben werden
Rapid Prototyping	schneller Modellbau, direkte Herstellung von Musterbauteilen ausgehend von Konstruktionsdaten
Rover Group	britische Automobilmarke
Sketcher	Zweidimensionale Zeichnungsumgebung innerhalb CATIA V5
Spline	Kurve, die aus Polynomen besteht
Strak	die geometrische Darstellung aller kundensichtbaren Flächen im Fahrzeugbau
Translationsflächen	Erzeugen von Flächen mittels Verschieben eines Elementes in eine Richtung

- Von Mises-Spannung*** einachsige Vergleichsspannung, die dieselbe Materialbeanspruchung darstellt wie ein realer, mehrachsiger Spannungszustand
- Workbench*** auf einzelne Anwendungen spezialisierte Arbeitsumgebung in CATIA V5

1. Planen und Klären der Aufgaben

1.1. Zielsetzung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Umbau der Fahrzeugtür eines Austin Mini zu einer rahmenlosen Tür. Dazu wird die Austin Mini Tür ohne Anbauteile in CATIA V5 ausreichend genau digitalisiert und konstruktiv zur rahmenlosen Tür verändert. Zur Digitalisierung wird die Software David-Laserscanner verwendet und auf ihre Tauglichkeit für den Einsatz im Reverse Engineering hin untersucht. Da der Fensterrahmen eine wichtige Aufgabe bei der Scheibenführung übernimmt, werden anschließend Konzepte zur Verbesserung der Scheibenführung dieser rahmenlosen Tür untersucht und bewertet.

1.2. Zeitplan

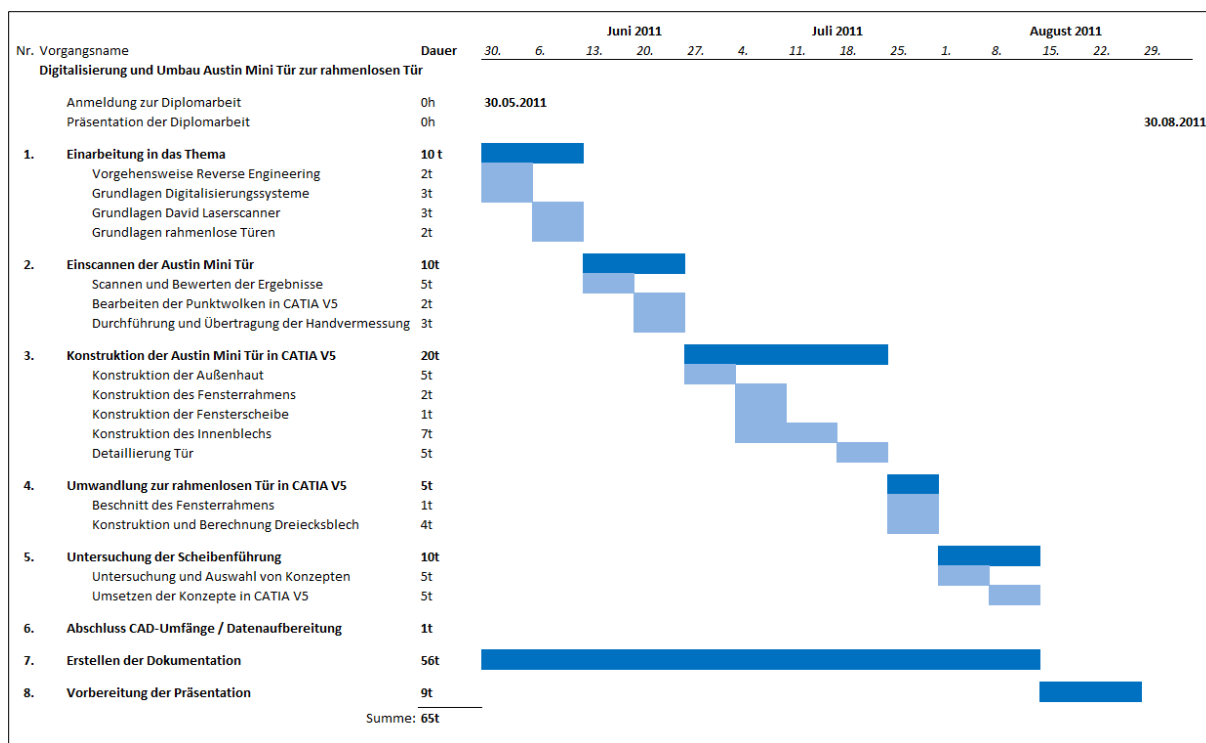


Abbildung 1-1: Zeitplan

1.3. Erläuterung der Arbeitsschritte

1. Einarbeitung in das Thema:

In den ersten Wochen werden die Möglichkeiten und gängigen Verfahren zur Thematik des Reverse Engineering mittels Digitalisierung untersucht und ein geeignetes Verfahren, welches mit niedrigen Kosten zu realisieren ist, ausgewählt.

2. Einscannen der Austin Mini Tür:

Das Einscannen der Tür erfordert die Ermittlung eines geeigneten Aufbaus zur Scandurchführung, das Erlernen der Software, die Durchführung des Scans und dem Übertragen und Bearbeiten der Punktwolken in CATIA V5. Zur Kontrolle der Scangenaugigkeit wird zusätzlich die Kontur der Außenhaut mittels definierten Punkten erfasst.

3. Konstruktion der Austin Mini Tür in CATIA V5:

Nachdem alle erforderlichen Daten zur Türkonstruktion ermittelt wurden, wird diese in Catia V5 erstellt. Dabei werden die einzelnen, für die nachfolgenden Untersuchungen relevanten Bauteile konstruiert und zu einem CATIA-Product zusammengefügt. Ebenso werden die Scheibenpositionen für verschiedene Öffnungszustände dargestellt.

4. Umwandlung zur rahmenlosen Tür in CATIA V5:

Für die Umwandlung zur rahmenlosen Tür wird ein neues CATIA-Product erstellt und der Fensterrahmen beschnitten. Zur Stabilisierung des vorderen Rahmenabschnitts wird ein Dreiecksblech konstruiert und im FEM-Modul von CATIA V5 berechnet.

5. Untersuchung der Scheibenführung:

Da durch den Wegfall eines Großteils des Fensterrahmens von einer verschlechterten Seitenscheibenführung auszugehen ist, werden Möglichkeiten zur Verbesserung der Führung untersucht und auf ihre Umsetzung hin bewertet.

6. Abschluss der CAD-Umfänge / Datenaufbereitung:

Nach Fertigstellen der einzelnen Konstruktionsschritte werden zum Abschluss die CAD-Daten geordnet und für den schriftlichen Teil der Arbeit aufbereitet.

7. Erstellen der Dokumentation:

Parallel zu den vorangegangenen Arbeitsschritten wird der schriftliche Teil der Arbeit erstellt. Dieser wird während der einzelnen Arbeitsschritte formlos niedergeschrieben und anschließend aufbereitet und zusammengefasst.

8. Vorbereitung der Präsentation:

Nach Abgabe der Diplomarbeit werden zur Vorstellung und Verteidigung entsprechende Präsentationsunterlagen erstellt sowie ein Präsentationstermin festgelegt.

2. Einleitung

2.1. Der Austin Mini

Der Austin Mini, anfänglich auch unter dem Namen Austin Seven sowie Morris Mini Minor verkauft, ist einer der erfolgreichsten Kleinwagen in der Geschichte des Automobilbaus. Technisch fast unverändert, wurden von 1959 bis 2000 mehr als 5 Millionen Fahrzeuge hergestellt.

Den Anstoß für die Entwicklung des Mini gab die Suezkrise von 1956, in deren Folge kraftstoffsparende Kraftfahrzeuge an zunehmender Bedeutung gewannen. Alec Issigonis, ein Ingenieur des britischen Automobilherstellers BMC, hatte die Idee, durch den Quereinbau des Motors sowie dem Einsetzen des Getriebes in die Ölwanne in einem kleinen, nur 3 Meter langem Fahrzeug ausreichend Platz für die Insassen zu schaffen. Damit schuf er eine Raumaufteilung von 80% für die Insassen des Fahrzeuges, für Technik und Gepäck mussten 20% des verfügbaren Raumes ausreichen. (vgl. Zumbrunn / Cumberland, 2008, S. 219)

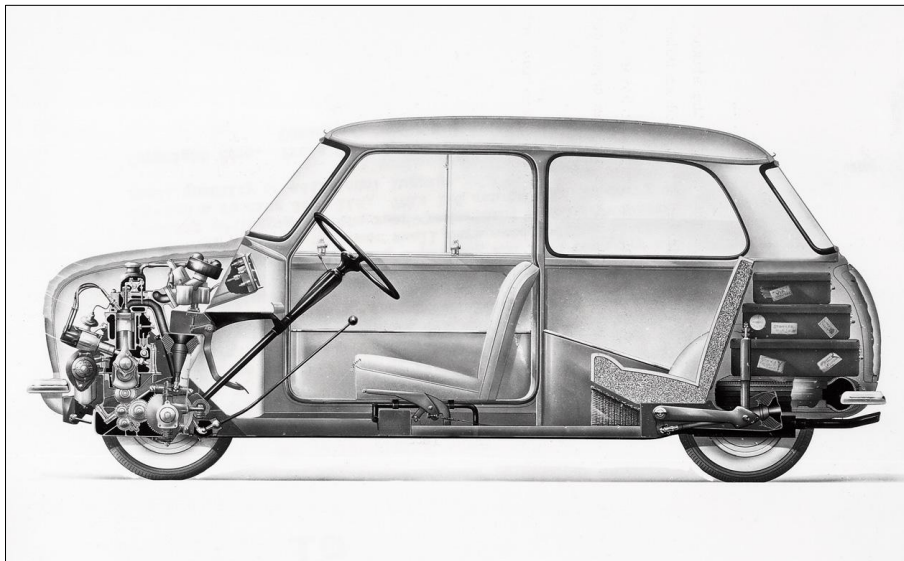


Abbildung 2-1: Zeichnung des Mini von 1959

Vom Konzept her gesehen war dieses Auto ein Meilenstein, die technische Umsetzung jedoch war teilweise sehr mangelhaft. "Die Wagen waren in so mancher Hinsicht grauenvoll: Die Karosserieränder zogen sich nach innen und sorgten dafür, dass Wasser hineinsickern und nicht mehr abfließen konnte. Der Zündverteiler war so platziert, dass der von vorne eindringende Regen einen Kurzschluss auslöste. Issigonis hatte die abwegige Idee, dass ein Fahrer, der sich unbehaglich fühle, aufmerksamer sei, weshalb er als Sicherheitsvorkehrung eine gekrümmte Fahrerhaltung nötig machte." (Zumbrunn / Cumberland, 2008, S. 219)

Und doch setzte sich dieses Fahrzeug trotz oder vielleicht auch gerade wegen seiner Eigenheiten schnell auf dem englischen und europäischen Fahrzeugmarkt durch. Zu einem gewann er in der Cooper Variante die Rallye Monte Carlo in den Jahren 1964 bis 1967 viermal in Folge, zu anderem war er in allen gesellschaftlichen Schichten anerkannt. Besonders bei den Prominenten der 1960er Jahre galt es als schick einen eigenen Mini zu haben.



Abbildung 2-2: Morris Mini Minor von 1959

Nach einigen Jahren des Booms begann jedoch der schleichende Niedergang der englischen Automobilindustrie, die in den darauffolgenden Jahrzehnten immer mehr von den anderen europäischen Automobilherstellern überflügelt wurde. Die verstaatlichte Rover Group, welche den Mini zuletzt herstellte, war hervorgegangen aus verschiedenen Zusammenschlüssen mit anderen britischen Fahrzeugherstellern und wurde 1994 von der BMW-AG übernommen. Mithilfe von BMW begann Rover mit der Entwicklung eines Nachfolgemodells des alten Mini. Im Jahr 2000 trennte sich jedoch die BMW-AG wieder von Rover, behielt jedoch die Rechte an der Marke "Mini" und brachte das neue Modell ab 2001, in England gefertigt, erfolgreich auf den europäischen Fahrzeugmarkt.

Der Original Austin Mini, der bis zum Ende seiner Produktion im Jahre 2000 sieben Mal grundlegend überarbeitet wurde, lässt sich in folgende Baureihen unterteilen:

- MK I (1959-1967): Äußere Türscharniere, Schiebefenster, rundliche Rückleuchten und starrer Hilfsrahmen
- MK II (1967-1969): Eckige Rundleuchten ohne Rückfahrlicht und größere Heckscheibe
- MK III (1969-1976): Innenliegende Türscharniere und Kurbelfenster
- MK IV (1976-1984): gummigelagerter vorderer Hilfsrahmen

- MK V (1984-1992): 12 Zoll Reifen und Scheibenbremsen vorn, Zweikreisbremsanlage
- MK VI (1992-1996): Einspritzanlage, geregelter Katalysator
- MK VII (1996-2000): Fahrerairbag, Gurtstraffer, Seitenaufprallschutz

Auch wenn der Austin Mini heute im Straßenbild immer weniger anzutreffen ist, so erfreut er sich doch weiterhin starkem Zuspruch bei Tunern und Oldtimerfans. Jährliche Liebhabertreffen, eigene Mini-Rennserien, sowie ein Markt für Karosserie-Umbauten und Motortuning halten die Szene am Leben. Durch die hohen Verkaufszahlen, die geringen technischen Veränderungen im Laufe der Serienproduktion und den daraus folgenden niedrigen Preisen bei hoher Bauteilverfügbarkeit machen den Mini vor allem interessant für den Einstieg in den Oldtimer- und Tunermarkt, da sich mit verhältnismäßig geringer Geldinvestition ein individuelles Fahrzeug realisieren lässt.

2.2. Cabriolets

Als Cabriolets werden Fahrzeuge verstanden, deren Dach aufklappbar oder abnehmbar ist und bei welchen die Fenster versenkt werden können. Sie sind in der Regel im Gegensatz zu zweisitzigen Roadstern und Dachlosen Spidern abgeleitete Modelle aus Fahrzeuggroßserien. Ohne festes Dach innerhalb der selbsttragenden Karosserie muss diese strukturell verändert werden, da das Dach mit bis zu 85 % zur Steifigkeit eines Fahrzeuges beiträgt. Der Verlust des Daches führt damit zu einem ungünstigen Schwingungsverhalten und einer sehr schlechten statischen und dynamischen Karosseriesteifigkeit. Ausgeglichen wird dies anhand von Steifigkeitserhöhungen unter anderem an den Längsträgern, Querwänden und Säulenübergängen unter Beachtung der konkurrierenden Anforderungen an Crash-Sicherheit und Fahrzeugleichtbau. Die Dachsysteme können in Stoffverdecke, faltbare Festdächer sowie Mischformen aus Beiden unterschieden werden. Aufgrund des beweglichen Verdecks müssen die Dichtsysteme an den betreffenden Stellen grundlegend überarbeitet werden, es werden meist großvolumige Dichtungen verwendet, um Toleranzen ausgleichen zu können. Desweiteren erfordern Cabriolets rahmenlose Türen, bei welchen durch den Wegfall des Türrahmens die Türscheibe Druck-, Torsions- und Biegekräfte aufnehmen muss. Hervorgerufen werden diese Kräfte durch den Schließgedruck der Tür an der A-Säule und dem Verdeck sowie durch Auszugskräfte durch Unterdruck während der Fahrt an der Türscheibe. Durch diese vielfältigen Änderungen an der Karosserie, aber auch durch geringere Stückzahlen sind Cabriolets in der Entwicklung und Produktion teurer als vergleichbare Limousinen, ihre Zulassungszahlen sind stetig steigend, jedoch bei einem durchschnittlichen Marktanteil von 5 % der Neuzulassungen weiterhin Nischenfahrzeuge. (vgl. Braess / Seiffert, 2007, S. 374 - 379)

2.3. Reverse Engineering im Fahrzeugbau

Der Begriff Reverse Engineering kommt aus dem englischen und kann mit "umgekehrt entwickeln" übersetzt werden. Er beschreibt die Untersuchung und Rückentwicklung eines Produktes, indem das fertige Produkt nach seiner Herstellung wieder in seine einzelnen Bestandteile zerlegt wird. Im Fahrzeugbau wird dieses Verfahren unter anderem verwendet, um in CAD-Systemen konstruierte Bauteile nach ihrer realen Fertigung wieder in digitale Modelle zurückzuführen. Dies ist oftmals nötig, weil sich im Herstellungsprozess aufgrund der verwendeten Werkzeuge und Maschinen Änderungen am realen Bauteil ergeben und es somit nicht mehr der im CAD-System konstruierten Vorgabe entspricht. Das Reverse Engineering hilft dabei, diese Probleme zu beseitigen und einen Abgleich zwischen Soll- und Ist-Daten zu ermöglichen.

Ein weiteres Aufgabenfeld ist die Analyse von Bauteilen und Baugruppen der Mitbewerber am Fahrzeugmarkt, um sie auf Funktion, Aufbau und Herstellungsweise zu untersuchen und mit den gewonnenen Erkenntnissen einen Vergleich zu den eigenen Produkten zu ermöglichen. Dies findet teilweise in einer rechtlichen Grauzone statt, da je nach Genauigkeit der Untersuchung der Bauteile sich diese unter Missachtung der Patentsituation reproduzieren lassen. Besonders China machte in den letzten Jahren immer wieder Schlagzeilen mit industriellen Hochleistungsprodukten, welche ihren Gegenstücken aus Europa oftmals in Funktion und Design täuschend ähnlich waren.

Zusätzlich wird im Zuge des schnellen technischen Fortschrittes im Bereich des Rapid Prototyping auf Methoden des Reverse Engineerings zurückgegriffen, ebenso für die Rekonstruktion von Oldtimern, bei denen die Konstruktionsunterlagen nicht mehr oder nur noch vereinzelt vorhanden sind.

2.4. Die verwendete Austin Mini Tür

Die für diese Diplomarbeit verwendete Tür stammt aus einem Austin Mini MK IV, der am 10.03.1977 zugelassen wurde und bis zum heutigen Tag 17 Besitzer hatte. Abbildung 2-3 zeigt die Karosserie im Vorfeld einer Festigkeitsuntersuchung im Fahrzeuglabor der HAW-Hamburg.



Abbildung 2-3: Die Austin Mini Karosserie im Fahrzeuglabor der HAW-Hamburg

Von den beiden Seitentüren wurde aufgrund ihres besseren Zustandes die rechte Tür gewählt, Abbildung 2-4 zeigt sie bereits im geweißtem Zustand, der für das spätere Scannen nötig ist. Es ist nicht mehr festzustellen, ob die verwendete Tür bereits seit der Erstauslieferung im Fahrzeug ist oder im Laufe der Zeit erneuert wurde. Auszugehen ist jedoch von mindestens einem Außenhautwechsel, da die Türfalze, welche das Innenblech mit der Außenhaut verbinden, an einigen Stellen nicht optimal umgelegt wurden. Die Tür wurde ohne die meisten Anbauteile untersucht, sie besteht aus der Außenhaut, dem Innenblech, dem Fensterrahmen, einem Verstärkungsblech zur Spiegelbefestigung an der Außenhaut, jeweils einem Verstärkungsblech zur Scharnier- und Schlossanbindung sowie den Türscharnieren.



Abbildung 2-4: Die verwendete Austin Mini MK IV Tür

Desweiteren lagen die Türscheibe (Abbildung 2-5) sowie der Fensterheber (Abbildung 2-6) im ausgebauten Zustand zur Rekonstruktion vor.



Abbildung 2-5: Seitenscheibe mit einer Klemmschiene



Abbildung 2-6: Fensterheber des Austin Mini MK IV

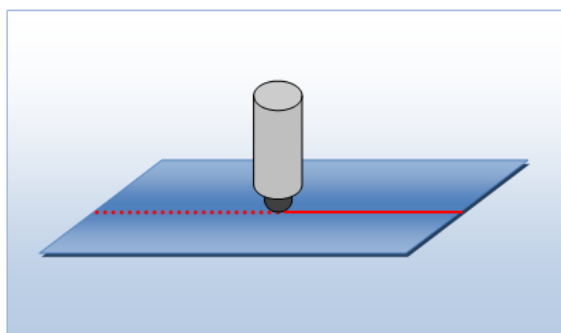
3. Möglichkeiten zur Digitalisierung

3.1. Übersicht über die möglichen Verfahren zur Digitalisierung

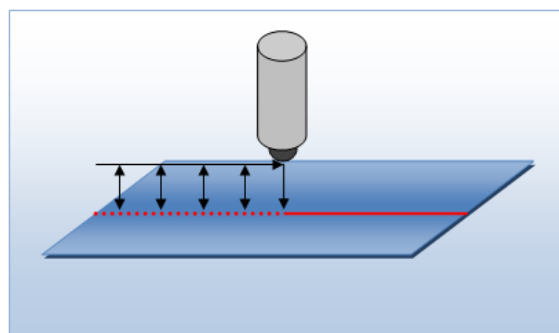
Im Maschinenbau versteht man unter Digitalisierung rechnergestütztes, punktweises Erfassen von Oberflächen reeller Körper. Das Ergebnis sind 3D-Punkte, die das Objekt mithilfe einer oder mehrerer Punktwolken beschreiben. Das Erfassen der Punkte kann dabei optisch (berührungslos) oder taktil (berührend) erfolgen, die dabei erzeugten Punkte werden entweder reihenweise oder ungeordnet erfasst.

3.1.1. Taktilen Digitalisieren

Beim taktilen Digitalisieren wird die Oberfläche eines Objekts mittels eines Tasters vermessen, dabei wird jedoch nicht der Berührungspunkt mit dem Objekt, sondern die Position des Tasters erfasst. Dabei werden messende und schaltende Tastverfahren unterschieden. Beim messenden Tastverfahren wandert der Tastkörper die Oberfläche des Objekts kontinuierlich schleifend ab, beim schaltenden Verfahren fährt der Tastkörper in einem kleinem Abstand über der Oberfläche und senkrecht zur Messung auf die Oberfläche hinab. Durch die indirekte Flächenbeschreibung des taktilen Digitalisierens müssen anschließend die Koordinaten des gemessenen Punktes an der Oberfläche mithilfe der Form des Tasterkopfes errechnet werden.



Messendes taktilen Verfahren



Schaltendes taktilen Verfahren

Abbildung 3-1: Verfahren des taktilen Digitalisierens

Die Vorteile des taktilen Digitalisierens liegen unter anderem in seiner hohen Genauigkeit bis in den Submikrometerbereich, in weitestgehend unabhängigem Messverhalten bezüglich Oberflächen- und Materialverhalten, einer guten Zugänglichkeit an den zu messenden Stellen mittels spezieller Tasterkonfigurationen, einem geringen Nachbereitungsaufwand der Messergebnisse, seine Vollautomatisierbarkeit und in der genauen Erfassung von Beschnitt- und Bördelkanten. (vgl. Hassler, 2004, S. 38)

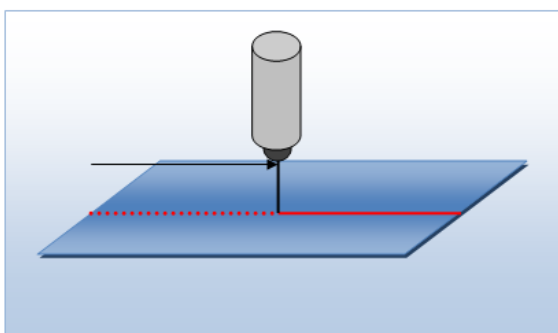
3.1.2. Optisches Digitalisieren

Optisches Digitalisieren hat den großen Vorteil der berührungslosen Ermittlung der einzelnen Punkte einer Oberfläche, womit auch sehr nachgiebige Werkstoffe wie Modelliermasse, Ton oder Schaumstoff erfasst werden können. Somit ist das optische Digitalisieren besonders in der Designphase der Neuentwicklung von Kraftfahrzeugen sehr hilfreich. Dort wird mithilfe eines speziellen Tons, dem sogenannten "Clay", aus den Entwürfen der Fahrzeugdesigner ein 1:1 Modell erstellt, dessen Außenflächen mit Punktwolken erfasst und anschließend in Programmen wie ICEM-Surf oder CATIA V5 gestrukt. Allgemein lässt sich die optische Digitalisierung in drei Verfahren einteilen. (vgl. Abbildung 3-2)

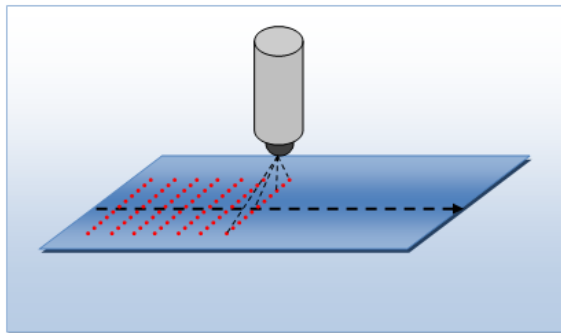
Beim **punktweisen Digitalisieren** fährt ein Koordinatenmessgerät wie bei der taktilen Digitalisierung die Oberfläche des Körpers ab, Anstatt des Tastkopfes ist jedoch eine Meßoptik eingebaut, die die Punkte linienförmig aufnimmt.

Im **streifenförmige Digitalisieren** wird eine Laserlinie mithilfe eines Spiegels über das Objekt bewegt, die dabei entstehende Form der Laserlinie auf der Oberfläche des Objektes wird von einer Kamera aufgenommen und ihr Formverlauf mittels Software ausgewertet.

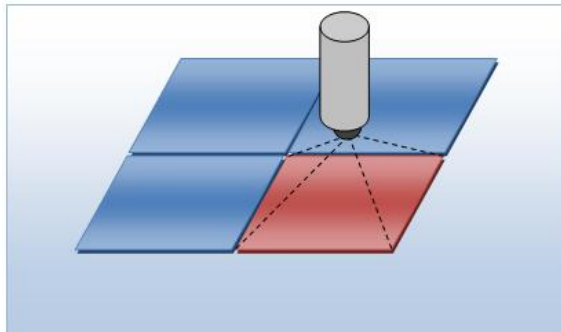
Die **flächigen Digitalisierungsverfahren** verwenden mehrere unterschiedlich positionierte Kameras, die große Flächen mithilfe einer Analysesoftware in sehr kurzer Zeit digitalisieren können.



Punktweises Digitalisieren



Streifenförmiges Digitalisieren



Flächiges Digitalisieren

Abbildung 3-2: Optische Digitalisierungsverfahren

Alle Verfahren haben jedoch den Nachteil, dass sich die Scanergebnisse verschlechtern, wenn glänzende oder spiegelnde Oberflächen erfasst werden. Ebenso sind steile Flächen, die annähernd parallel zur Messlinie liegen, problematisch, sowie Abschattungen an Stellen, die nur schlecht von der Optik erfasst werden können.

Die Vorteile der optischen Digitalisierungsverfahren sind neben der Berührungslosen Erfassung vor allem die schnelle flächendeckende Erfassung von Objekten sowie ein mobiler Einsatz für ein breites Spektrum von Aufgaben. (vgl. Hassler, 2004, S. 38)

3.1.3. Auswahl des Verfahrens

Bei der Wahl des Digitalisierungsverfahrens zur Konstruktion der Austin Mini Tür wurde versucht, eine möglichst kostengünstige und frei verfügbare Methode zu finden. Dabei fiel die Wahl schnell auf die Software David-Laserscanner, welche nach dem Prinzip des streifenförmigen Digitalisierens arbeitet. Da diese Software und die benötigten Komponenten im Vergleich zu den verwendeten Geräten im Fahrzeugbau extrem preisgünstig sind, wäre ein Einsatz auch für den privaten Anwender sowie kleine Unternehmen interessant. Um die Genauigkeit des Verfahrens zu kontrollieren und das Ziel der Arbeit, die Digitalisierung der Tür in CATIA V5 und deren Umbau zur rahmenlosen Tür,

bei ungenügender Genauigkeit nicht zu gefährden, wird die Tür zusätzlich von Hand vermessen.

3.2. Die Software David-Laserscanner

Die Software David-Laserscanner wurde im Institut für Robotik und Prozessinformation der Technischen Universität Braunschweig von den Informatikern Dr. Simon Winkelbach und Sven Molkenstruck sowie dem Institutsleiter Prof. Friedrich M. Wahl entwickelt. Für den wissenschaftlichen Artikel zu diesem Verfahren erhielten sie im Jahr 2006 den Hauptpreis der Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Mustererkennung. (vgl. TU Braunschweig Homepage, 2011)

Die Software arbeitet nach dem Lichtschnittverfahren, welches ein Unterverfahren der aktiven Triangulation ist.

Bei der Aktiven Triangulation werden von einer Beleuchtungseinheit definierte Lichtmuster auf das Objekt geworfen und von mindestens einer Kamera erfasst. Das Verfahren beruht dabei auf den Schnitt räumlicher Strahlen, da Kamerastrahl und Beleuchtungsstrahl zusammen mit der Verbindungslinie der beiden Projektionszentren ein Triangulationsdreieck bilden. Sind nun Position und Orientierung von Kamera und Projektionseinheit bekannt, lassen sich daraus die Objektpunktkoordinaten berechnen. (vgl. Gühring 2002, S. 16)

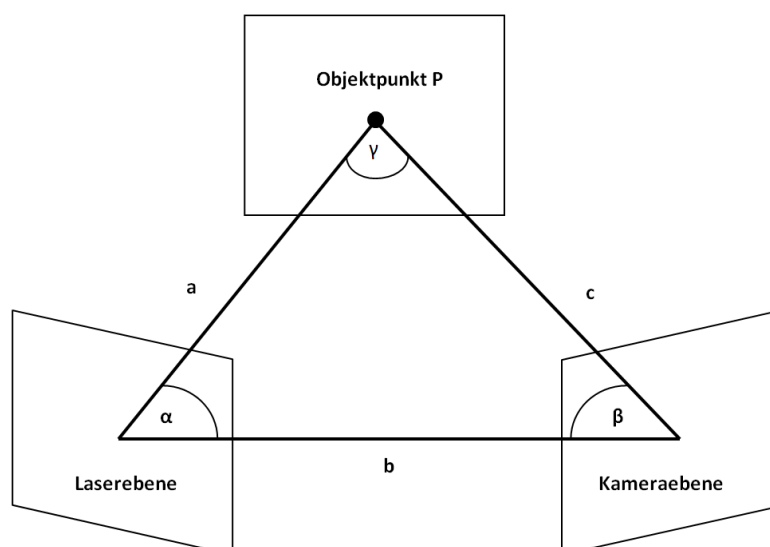


Abbildung 3-3: Das Prinzip der Triangulation

Beim Lichtschnittverfahren "wird eine dünne Linie, in der Regel erzeugt durch einen Laserstrahl, welcher über eine Zylinderlinse aufgeweitet wird, auf das Objekt projiziert. Der resultierende Linienverlauf wird von einer Kamera erfasst und daraus ein dichtes Profil berechnet" (Gühring 2002, S. 17)

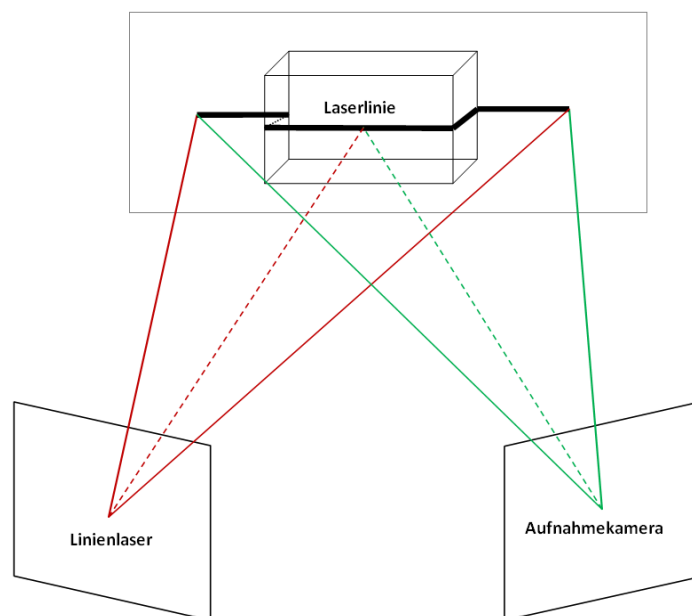


Abbildung 3-4: Das Prinzip des Lichtschnittverfahrens

Da im Gegensatz zu der üblichen festen Scananordnung in der Industrie bei David-Laserscanner der Linienlaser frei von Hand bewegt wird, benötigt die Software eine bekannte Referenzgeometrie. Mit Hilfe dieser kann die Laserlinie, die auf das Scanobjekt trifft, mit der Laserlinie auf der Referenzgeometrie verschnitten und berechnet werden. Dafür muss die Kamera mithilfe von Referenzpunkten kalibriert werden. Desweiteren muss die Laserlinie während der Aufnahme immer auf dem zu scannenden Objekt sowie dem Kalibrierhintergrund deutlich zu erkennen sein.

3.3. Die Handmessung

Um die Genauigkeit des Laserscans zu kontrollieren, werden alle relevanten Maße der Tür zusätzlich mit der Hand gemessen. Besonders wichtig ist dies bei der Außenhaut, da diese maßgeblich die Form der Tür bestimmt. Dazu wird die Tür auf eine plane, ausreichend große Oberfläche gelegt, die als Zeichenebene dient. Hierzu wurde eine für den Scanvorgang genutzte Kalibrierplatte ohne Kalibriermuster verwendet. Auf die Platte wird ein Raster von jeweils 50 mm Größe über die gesamte Fläche gezeichnet, auf dem später die x- und z-Koordinaten der Türpunkte übertragen werden. Für die Handmessung werden 49 Punkte auf der Türaußenhaut bestimmt, ihre Lage ist so gewählt dass sie die Besonderheiten der Außenhautform wiedergeben.

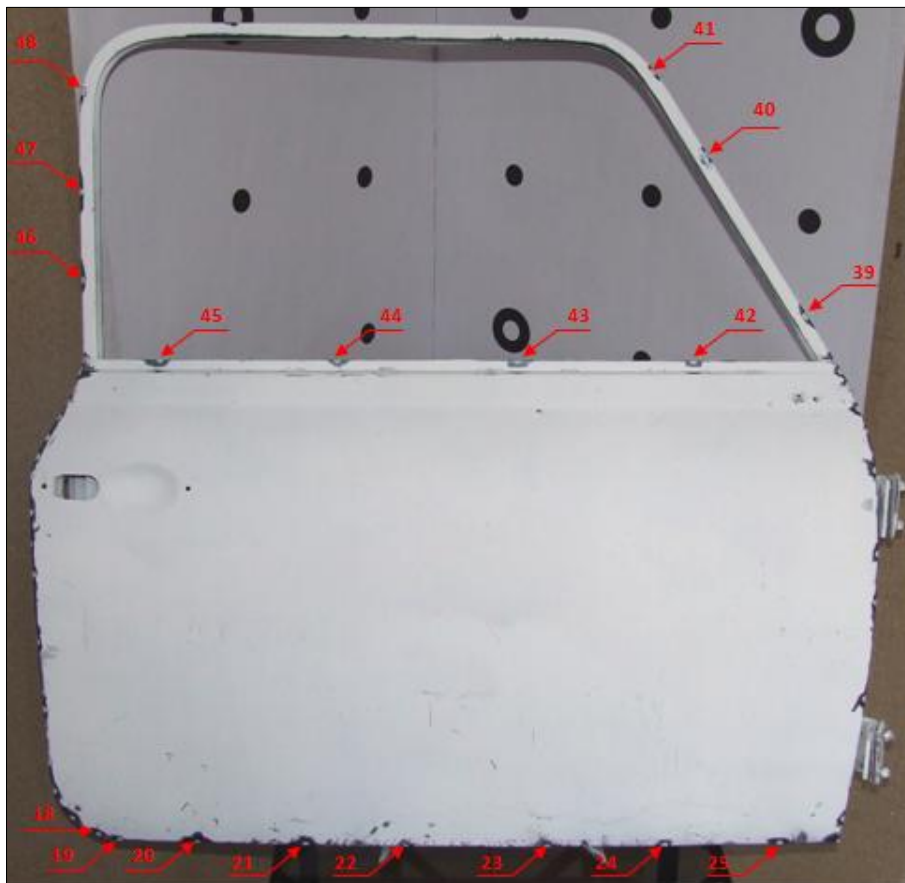


Abbildung 3-5: Lage der Messpunkte an der Außenhaut

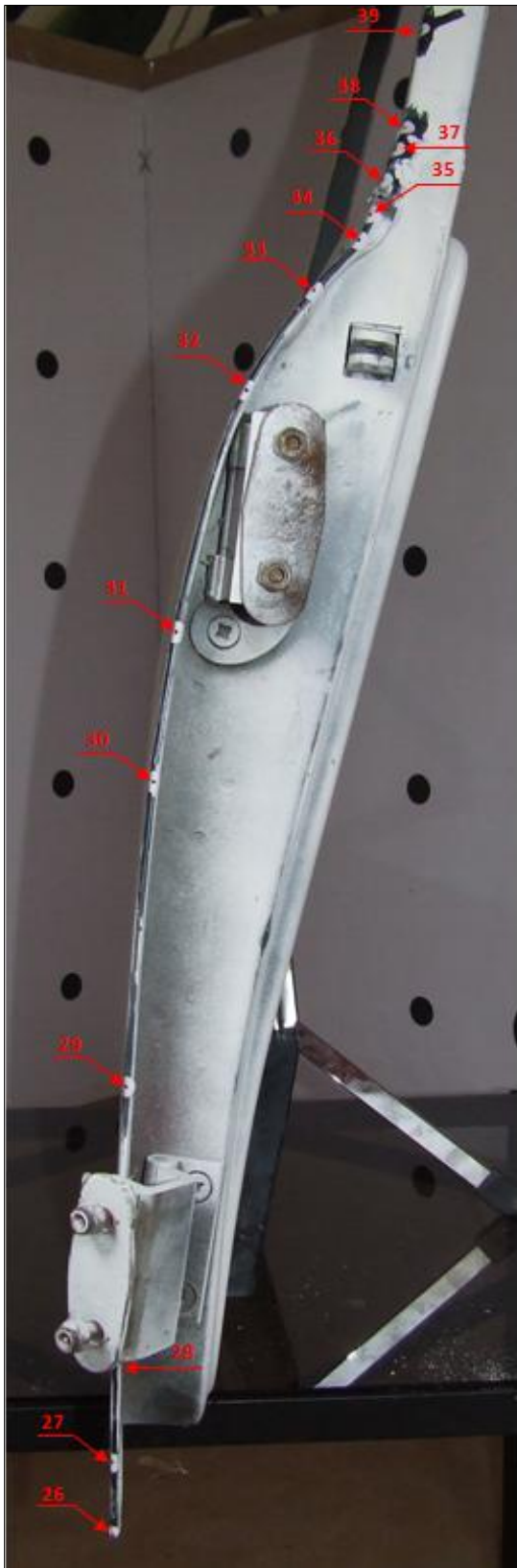


Abbildung 3-6: Messpunkte an der Scharnierseite



Abbildung 3-7: Messpunkte an der Schlossseite

Anschließend werden die Koordinaten der einzelnen Karosseriepunkte ermittelt. Dazu wird mithilfe eines Zirkels von 2 nahe zusammenliegenden Schnittpunkten des Linienrasters aus die Strecke ZS_1 beziehungsweise ZS_2 gemessen. Mit dem senkrechten Abstand Karosseriepunktes zur Rasterebene lassen sich mittels Satz des Pythagoras die Strecken a und b berechnen. Diese Längen werden anschließend mit dem Zirkel in die Rasterebene eingezeichnet, überträgt man den gemeinsamen Schnittpunkt wiederum parallel zum Linienraster, erhält man die Koordinaten z_1 sowie x_1 .

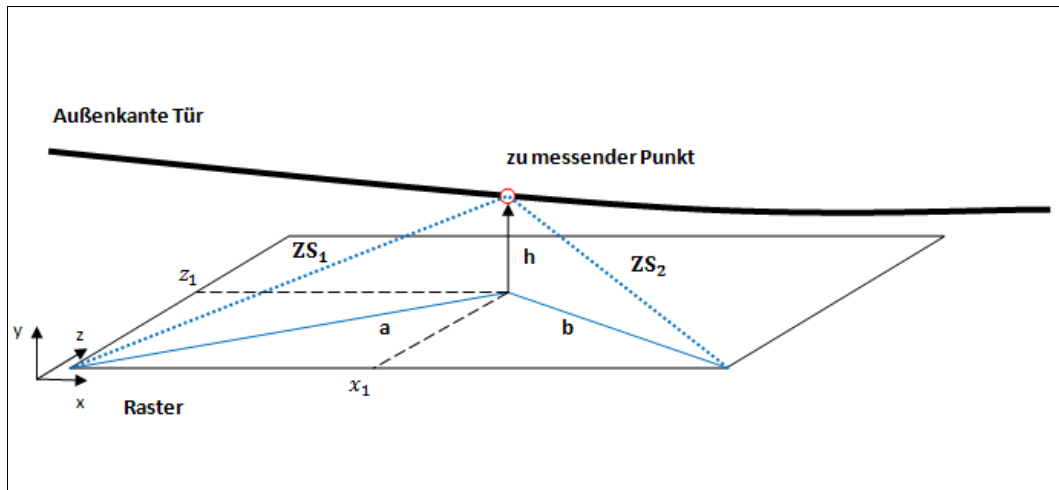


Abbildung 3-8: Prinzip der Punktmessung von Hand

Die Werte werden in eine Excel-Tabelle aufgenommen und berechnet, die Tabelle ist im Anhang 8.1 zu finden.

4. Digitalisierung mit David-Laserscanner

4.1. Benötigte Komponenten

4.1.1. Software

Eine kostenlose Demoversion von David-Laserscanner kann unter "<http://www.david-laserscanner.com>" heruntergeladen werden. Diese Version ist bereits teilweise voll funktionsfähig, jedoch ist ein Speichern der Punktwolke sowie die Shapefusion des digitalisierten Objekts nicht möglich. Dafür muss die Demoversion zur Professional Edition aufgewertet werden.

Als Systemvoraussetzungen werden ein Standard-PC mit Windows 2000, XP, Vista oder Windows 7 mit 32- oder 64-bit sowie ein freier USB-Anschluss angegeben. Empfohlen wird eine Konfiguration mit mindestens 2GHz CPU, 1GB Ram sowie eine 3D-Grafikkarte. (vgl. David-Shop, 2011)

4.1.2. Kamera

Bei der Wahl der Aufnahmekamera kann eine günstige Webkamera ebenso wie eine teure Videokamera gewählt werden. Entscheidend hierbei ist das zu digitalisierende Objekt, wobei gilt: Je detailreicher das Objekt, desto hochwertiger sollte die Kamera sein. Hohe Auflösungen sind durchaus hilfreich, machen aber nur bei einem hochwertigen Laser mit einer sehr dünnen Linie Sinn. Sollen keine Texturen des Objekts aufgenommen werden, ist eine Graubildkamera vorteilhaft, da bei einer Farbkamera die Bildpixel erst umgerechnet werden müssen. (vgl. David-Wiki, 2011)

4.1.3. Linienlaser

Bei einem Linienlaser wird der Laserstrahl, welcher im Normalfall punktförmig aus der Lasereinheit kommt, mittels einer Linse zu einer ebenen Linie aufgefächert. Auch hier können günstige Lösungen ebenso wie teure genutzt werden, wobei in der Regel ein einfacher Linienlaser aus dem Baumarkt ausreichend ist. Hilfreich ist ein einstellbarer Fokus des Lasers, um bei Entfernungsänderungen des Lasers zum Objekt immer eine scharfe und dünne Laserlinie zu erhalten. (vgl. David-Wiki, 2011)

4.1.4. Kalibrierkörper

Der Kalibrierkörper dient zum Kalibrieren der Kamera sowie als Hintergrund während des Scannens. Er sollte aus zwei Platten bestehen, die mit den von der David-Software bereitgestellten Kalibriermustern beklebt werden. Wichtig dabei ist, dass die beiden Platten genau rechtwinklig zueinander stehen und eine plane Oberfläche besitzen. (vgl. David-Wiki, 2011)

4.2. Scandurchführung

4.2.1. Der Scanaufbau

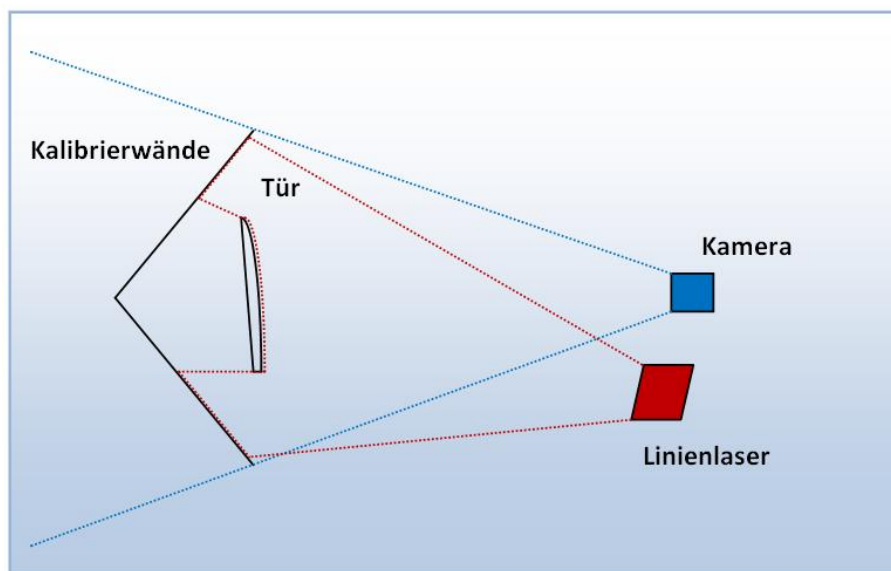


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Scanaufbaus

Die Scans wurden in einem abgedunkelten Raum durchgeführt, da sich während des Scanvorganges das Umgebungslicht nicht mehr verändern darf. Die mitgelieferten Kalibriermuster wurden auf einer Größe von A0 ausgedruckt und auf zwei Sperrholzplatten mit den Maßen 1000 mm x 1500 mm aufgeklebt. Die Sperrholzplatten sollten eine ausreichende Dicke besitzen, damit sie sich nicht unter ihrem Eigengewicht verformen. Anschließend werden die beiden Platten in einem 90° Winkel aneinandergeschraubt und aufgestellt.



Abbildung 4-2: Kalibrierwände mit Kalibrierpunkten

Bei dem Scanvorgang wurde die Linienlaser-Wasserwaage LZR 310 von Black & Decker verwendet. Das Gerät ist im Baumarkt oder Internet erhältlich und projiziert eine gerade und sehr helle Laserlinie.



Abbildung 4-3: Laserwasserwaage Black & Decker LZR 310

Als Kamera wurde eine Webcam von Microsoft benutzt, die HD-3000 mit einer maximalen Auflösung von 1280 x 720 Bildpunkten. Sie hat eine automatische Bildhelligkeitsregulierung, welche für die Scans jedoch ausgeschaltet werden sollte. Die Installation der Webcam ist einfach und erfolgt automatisch mit dem Einstecken der USB-Verbindung am Computer.



Abbildung 4-1: Microsoft HD-3000 Webcam

Da die Tür mit einem Metalliclack lackiert ist wurde sie vor dem Scanvorgang mit Kreidespray eingesprüht, um ungewünschte Reflektionen des Lasers und daraus resultierenden Messfehler zu vermeiden. Desweiteren darf sie während des Einscannens nicht bewegt werden, weshalb sie auf einem Ständer gestellt wurde.

Zur Probe wurden einige Testläufe mit verschiedenen kleineren Objekten durchgeführt, um die Software und den Umgang damit kennenzulernen. Dabei wurde deutlich, dass das zu scannende Objekt auf einer erhöhten Position stehen muss. Dies ist nötig, da die Laserlinie das Objekt aus einem großen Winkel von oben trifft. Durch die räumliche Versetzung von dem zu scannenden Objekt und den Kalibrierplatten liegt die Laserlinie tiefer auf den Kalibrierplatten als auf dem Objekt. Da David-Laserscanner jedoch nur die Lage des Objektes im Raum bestimmen kann, wenn die Laserlinie auf dem Objekt und gleichzeitig auf den beiden Kalibrierplatten zu sehen ist, wurde ein kleines Podest genutzt.

Um die Tür möglichst komplett zu digitalisieren, musste sie aus verschiedenen Winkeln gescannt werden. Deshalb wurden mehrere Scandurchgänge durchgeführt, die jeweilige Lage der Kamera zum Objekt ist im nachfolgenden Bild zu sehen.

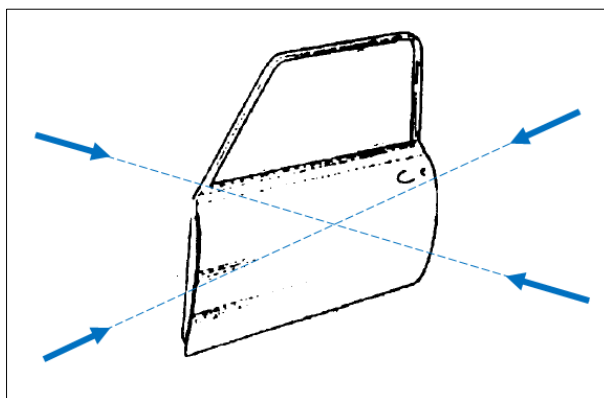


Abbildung 4-2: Aufnahmerichtungen der Kamera beim Scannen

4.2.2. Durchführung des Scans

Nach dem Start der Software erscheint als erstes das Startfenster, in dem die Sprache, eine Hilfefunktion sowie erweiterte Einstellungen aufrufbar sind. Die erweiterten Einstellungen sind für das Scannen der Tür nicht relevant und werden hier nicht näher behandelt.

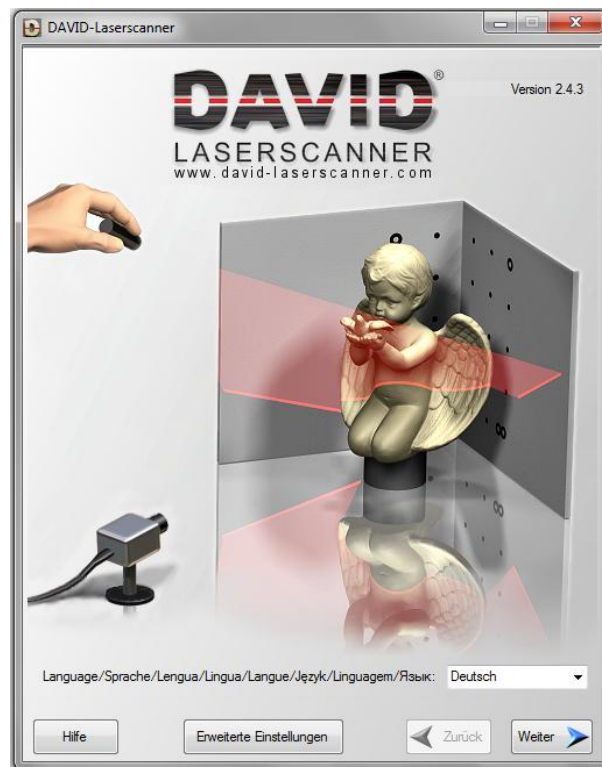


Abbildung 4-6: David-Laserscanner Startbildschirm

Mit dem Feld "Weiter" gelangt man direkt zur Kamerakalibrierung.



Abbildung 4-7: Kamerakalibrierungsfenster

Unter „**1. Wählen Sie eine Kamera und passen sie Position und Helligkeit an:**“ wird im ersten Reiterfeld die gewünschte Aufnahmekamera ausgewählt. Erkennt David-Laserscanner diese fehlerfrei, so öffnet sich zusätzlich ein weiteres Bildschirmfenster mit einer Echtbildanzeige der Kameraaufnahme.

Unter „**Einstellungen**“ werden später die Kameraparameter für den Scan eingestellt.

Der Button „**Bildformat ändern**“ ermöglicht es, die Einzelbildrate, das Farbspektrum sowie die Auflösung der Kamera zu verändern. Das Farbspektrum kann bei einer Farbkamera auf RGB 24 gelassen werden. Bei der Einzelbildrate gilt, je höher der einstellbare Wert, desto besser. Die Kameraauflösung, zu sehen unter dem Feld „**Ausgabegröße**“, sollte sinnvoll gewählt werden, da hier ein hoher Wert nur bessere Werte mit einer sehr feinen Laserline liefert.

Für die Scans der Tür wurde das Farbspektrum auf RGB 24 eingestellt, sowie eine Ausgabegröße von 800 x 600 Pixel. Die Einzelbildrate betrug 10 fps.

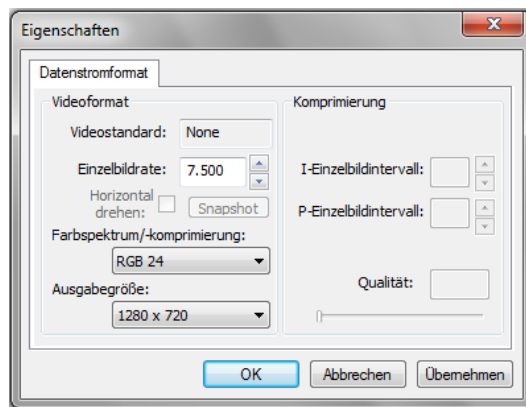


Abbildung 4-8: Fenster "Bildformat ändern"

Anhand der Echtbildanzeige des Kamerafensters sollte nun als erstes die Kamera so ausgerichtet werden, dass sie mittig vor den Kalibrierwänden steht und alle Kalibrierpunkte von ihr erfasst werden. Es ist sinnvoll, bereits jetzt das zu scannende Objekt vor die Kalibrierwand zu stellen und die Kamera daran auszurichten.



Abbildung 4-9: Ausrichtung der Tür an der Kalibrierwand

Ist die Kamera soweit ausgerichtet, dass sie das zu scannende Objekt sowie die Kalibrierwände vollständig erfasst, müssen unter **„Einstellungen“** die Kamerawerte angepasst werden. Unter dem Reiter **„Kamerasteuerung“** lässt sich der Kamerazoom

einstellen, sowie die Kamera Schwenken und Kippen. Alle hier vorgenommenen Einstellungen dürfen nach dem Kalibrieren nicht mehr verändert werden.

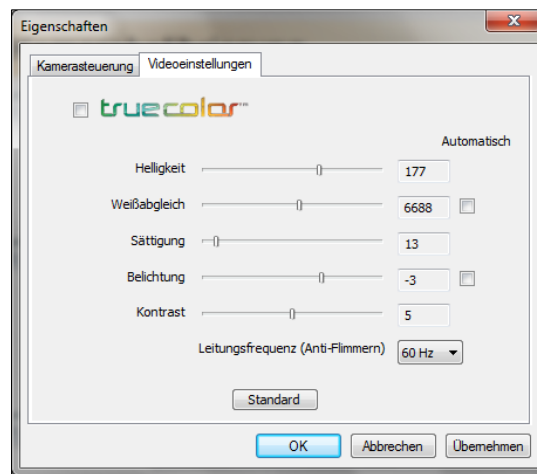


Abbildung 4-10: Das Kameraeigenschaften Fenster

Unter den Videoeinstellungen lassen sich verschiedene Kamerawerte verändern. Ziel hierbei ist, die Kalibrierpunkte als Schwarze Kreise vor einem weißen Hintergrund hervorzuheben. Dies lässt sich am besten bei normaler Raumbelichtung bewerkstelligen. Bei der hier verwendeten Kamera war es wichtig, die „truecolor“ Funktion auszuschalten. Desweiteren wurde der Weißabgleich auf der Automatikeinstellung gelassen. Alle anderen Werte sind in obenstehender Abbildung zu sehen. Nun muss für den anschließenden Kalibriervorgang die Tür wieder aus dem Kamerabereich entfernt werden.

Unter „**2. Geben Sie die Rasterweite der Kalibrierpunkte ein**“ werden die Abstände der Kalibrierpunkte untereinander eingetragen. Diese sind auf den ausgedruckten Kalibrierblättern am Blattrand als Gerade eingezeichnet und lassen sich mithilfe eines Lineals messen. Der Abstand der Kalibrierpunkte auf der Blattgröße A0 betrug 238 mm.

Für den Fall, dass man helle Kalibrierpunkte auf einem dunklen Untergrund verwendet, kann dies mit dem Button „Invertieren“ eingestellt werden.

Anschließend wird die Kamera unter „**3. Kalibriermodus- / Unterstützung**“ kalibriert. In den meisten Fällen reicht dabei die automatische Kalibrierung aus. Bringt diese jedoch keine brauchbaren Ergebnisse, so können in dem Reiter „Radierer“ störende Elemente im Kamerabild für das Kalibrieren entfernt werden. Im Reiter „Manueller Modus“ können die Kalibrierpunkte manuell gesetzt werden, dies ist jedoch nur in den seltensten Fällen nötig und wird hier nicht näher beschrieben. Nach erfolgreicher Kalibrierung dürfen Kamera und Kalibrierwände nicht mehr bewegt werden, sonst muss der Kalibriervorgang erneut durchgeführt werden.



Abbildung 4-11: Kalibrierte Kameraeinstellung nach Bearbeitung des Kamerabildes mit dem Radierer

Nach erfolgreicher Kalibrierung geht es über den Button „weiter“ zum 3D Laserscanner Bildschirmfenster.



Abbildung 4-12: Das Scan-Bildschirmfenster

Unter "**1. Scanvorgang starten**" kann nun, nachdem das Scanobjekt wieder vor die Kalibrierwand gestellt wurde, der 3D-Scan durchgeführt werden. Zuvor muss noch der verwendete Laser eingestellt werden, je nachdem ob er eine Rote oder Grüne Laserlinie hat.

"*Dünne Schattenlinie*" wird bei einem Scan verwendet, bei dem anstatt eines Lasers eine Schattenlinie verwendet wird. Dabei wird eine helle Lichtquelle auf das Scanobjekt gerichtet und zum Beispiel mithilfe eines Bindfadens dazwischen eine dünne Linie auf das Objekt geworfen. (vgl. David-Wiki, 2011)

Das Feld "*Reduzierte Anzeigehäufigkeit*" aktualisiert das während des Scannens aufgenommene Tiefenbild nur einmal pro Sekunde. Dies kann hilfreich sein, wenn der verwendete Computer eine geringe Leistung hat.

Für den Scan der Tür wurde nun der Raum komplett abgedunkelt und die Kameraeinstellung für den Scan verändert. Dabei sollte man den Laser auf das Objekt ausrichten und im Kamerafenster das Bild so einstellen, "dass die Laserlinie klar im Kamerabild sichtbar ist, während der Rest des Bildes so dunkel wie möglich sein sollte" (David-Wiki, 2011)

Die Kamerawerte für die Kalibrierung sowie dem Scan der Tür sind in nachfolgender Tabelle zu sehen:

	Kalibrieren	Scannen
Helligkeit	135	107
Weißabgleich	automatisch	automatisch
Sättigung	32	32
Belichtung	-1	-2
Kontrast	10	9
Leitungsfrequenz	60 Hz	60 Hz

Tabelle 1: Kamerawerte für Kalibrierung und Scan

Nun wird durch einen Klick auf den Button "*Start*" der Scanvorgang gestartet. Dabei sollte zu Beginn die Laserlinie noch außerhalb des Kamerabereiches liegen. Anschließend lässt man die Laserlinie langsam und gegebenenfalls mehrfach über das Objekt wandern, im Kamera-Bildschirmfenster sind dabei die bereits erfassten Teilbereiche zu sehen. Desweiteren befindet sich im Kamera-Bildschirmfenster eine Anzeige über die Qualität des gerade erfassten Bildes:

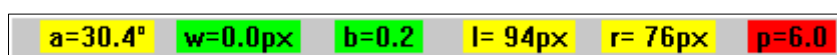


Abbildung 4-13: Anzeige der Scanqualität im Scanfenster

Die Einzelnen Werte bedeuten dabei folgendes (vgl. David-Wiki 2011):

a = Schnittwinkel in [°] zwischen Laserlicht-Ebene und Kamera-Blickrichtung, dieser Wert sollte zwischen 30° und 60° liegen

w = Durchschnittliche Laserlinien-Breite [Pixel], sollte so gering wie möglich sein

b = Durchschnittliche Helligkeit des gesamten Bildes, sollte möglichst gering sein

l = Länge [Pixel] der Laserlinie auf dem linken Kalibrier-Panel, sollte nicht zu kurz sein

r = Länge [Pixel] der Laserlinie auf dem rechten Kalibrier-Panel, sollte nicht zu kurz sein

p = "Qualität der Laserebene", Genauigkeit der berechneten Raumlage der Laserlichtebene, sollte möglichst gering sein

Der farbliche Hintergrund gibt einen groben Richtwert über die Qualität des einzelnen Bildes, dabei ist die Farbe Rot schlecht, Gelb ist ausreichend und Grün ein guter Wert zum Scannen. Ist man mit dem Scanergebnis zufrieden, beendet man den Scanvorgang mit dem Button "*Stop*".

Möchte man die Textur der Oberfläche des Scanobjektes aufnehmen, kann dies unter: "**2. Textur aufnehmen**" erfolgen. Dafür müssen gegebenenfalls die Kamerawerte angepasst werden. Für den Scan der Tür war eine Texturaufnahme jedoch nicht nötig.

Unter "**3. Ergebnisse anzeigen und speichern**" lässt sich der Scan in 3D anzeigen, automatisch bearbeiten sowie speichern. Mit den Feldern "Interpolieren", "Average-Glättung" und "Median-Glättung" lassen sich Lücken im Scan schließen, im Rahmen des Türscans war eine automatische Bearbeitung jedoch nicht erwünscht, da sie die Ergebnisse unnötig verfälschen könnte.

Bei "**In 3D anzeigen**" lässt sich ein 3-dimensionales Bild des Scans anzeigen, um die Qualität des Scans visuell zu beurteilen.

Im Feld "*Speichern*" lässt sich der Scan auf einem Datenträger speichern, mit dem Feld "*Weiterreichen*" wird der Scan zum Programmbereich "*3D Shapefusion*" weitergegeben. Für die Tür des Mini wurden 4 Scans aus verschiedenen Winkeln durchgeführt, wobei jeweils die Außen- und Innenseite zweimal gescannt wurde.

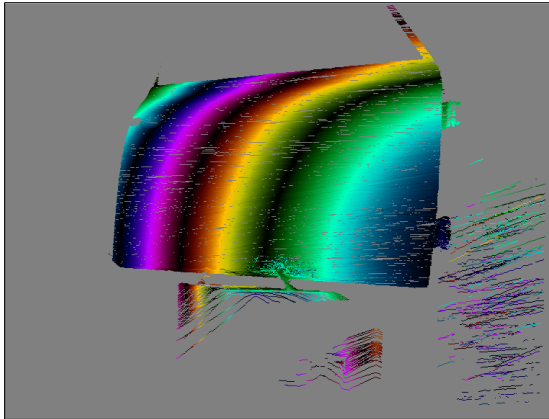


Abbildung 4-14: erster Scan der Außenseite

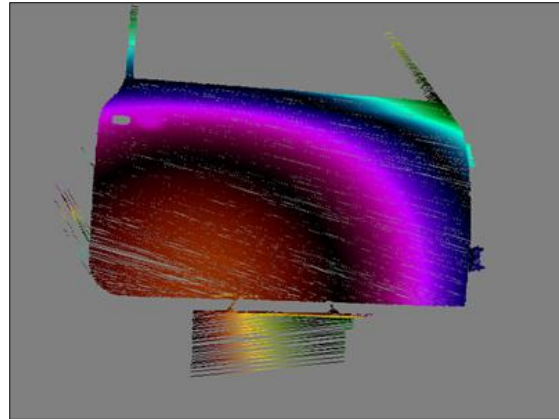


Abbildung 4-15: zweiter Scan der Außenseite

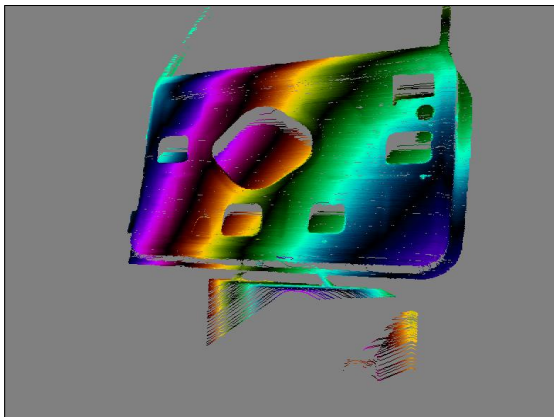


Abbildung 4-16: erster Scan der Innenseite

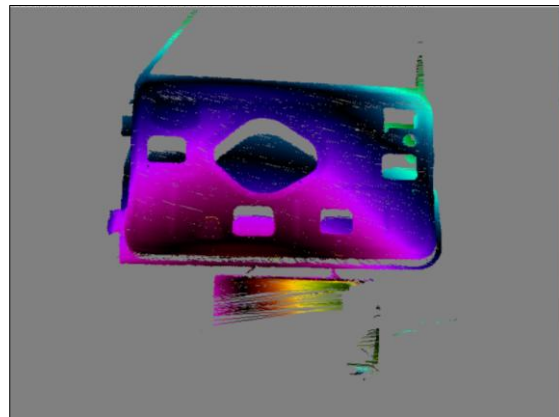


Abbildung 4-17: zweiter Scan der Innenseite

Nachdem alle Scans in den Programmbereich "3D Shapefusion" weitergereicht wurden, können diese nun bearbeitet und zusammengefügt werden.

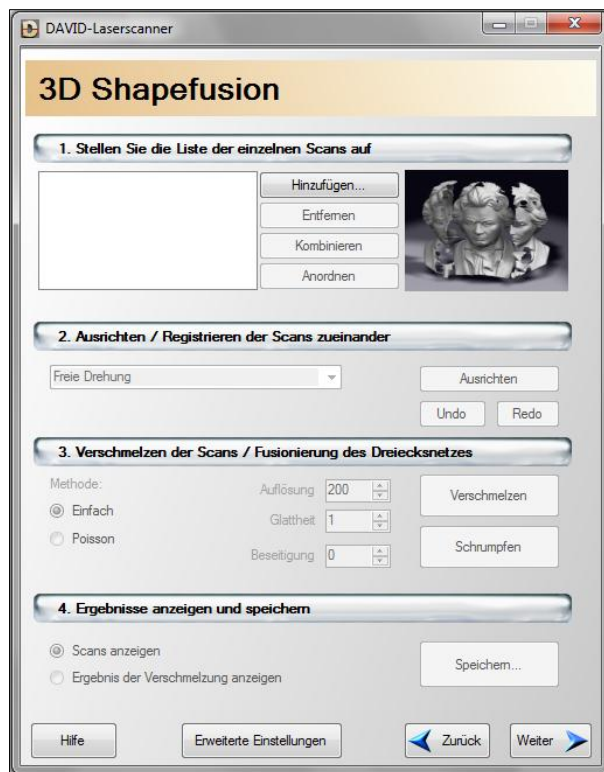


Abbildung 4-18: Das 3D Shapefusion Bildschirmfenster

Die zuvor weitergereichten Scans sind nun einzeln aufrufbar unter **"1. Stellen Sie die Liste der einzelnen Scans auf"**. Es ist sinnvoll, hier die Scans einzeln aufzurufen und diese im 3D-Fenster zu bearbeiten.



Abbildung 4-19: Bearbeitungsleiste im 3D-Fenster

In der Bearbeitungsleiste lassen sich die Kanten, Texturen und Normalen im 3D-Bild anzeigen, desweiteren können die Lichtverhältnisse auf dem Scan geändert werden. Zusätzlich lassen sich Teilbereiche des Scans markieren, um diese zu löschen. Dies ist hilfreich, um fehlerhafte Teilbereiche sowie zum Beispiel das Podest zu entfernen. Das entfernen sollte vorerst grob erfolgen, da sich in CATIA V5 die Punktwolken genauer bearbeiten lassen.

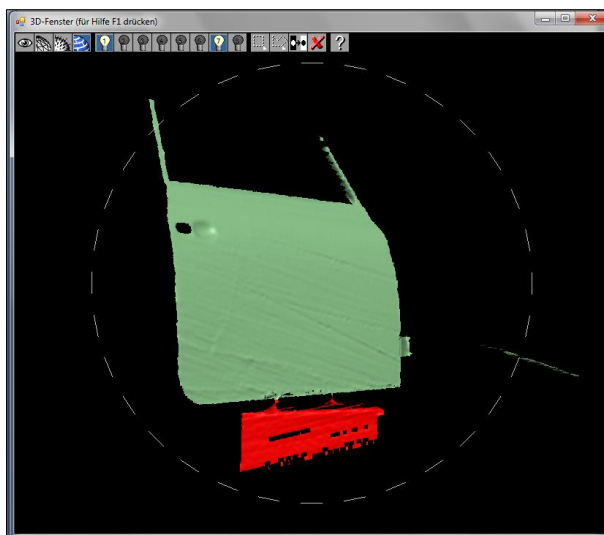


Abbildung 4-20: Markierung des Podest für die Löschung

Nachdem die vier Scans der Tür ausreichend bearbeitet wurden, können sie anschließend fusioniert werden. Dies geschieht für Außen- und Innenseite separat. Dafür werden die beiden zusammengehörenden Scans angewählt und unter **"2. Ausrichten / Registrieren der Scans zueinander"** miteinander verschmolzen. Dazu wählt man den Befehl "Ausrichten" aus und es öffnet sich ein neues Fenster, in dem die automatische Ausrichtung erfolgt.

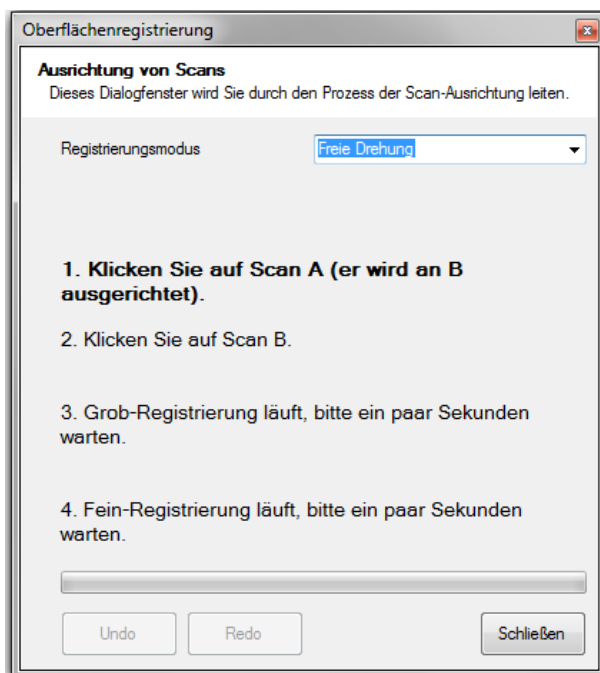


Abbildung 4-21: Das Scan-Ausrichtungsfenster

Im Feld "Registriermodus" kann die Fusion mithilfe mehrerer Auswahlmöglichkeiten, zum Beispiel entlang einer bestimmten Richtung, erfolgen. Der Modus "Freie Drehung" brachte bei der Tür aber bereits gute Ergebnisse. Dazu ist im 3D Fenster der erste Scan auszuwählen und anschließend der zweite Scan, an dem nun der erste Scan ausgerichtet wird.

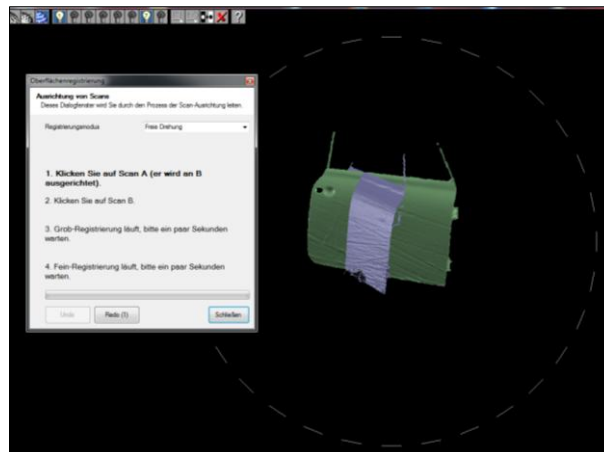


Abbildung 4-22: Ausrichten der einzelnen Außenseiten-Scans

Dies geschieht zuerst mit einer Grob-Registrierung, in dem die Software nach übereinstimmenden Punkten sucht und anhand dieser die Scans zueinander ausrichtet. Ist die Grobregistrierung erfolgreich, wird anschließend eine Fein-Registrierung durchgeführt, die das Ergebnis in den meisten Fällen noch einmal verbessert. Eine gute Ausrichtung ist erfolgt, wenn es an vielen Stellen Oberflächendurchdringungen gibt, das heißt die Farbe der überlappenden Oberflächen sollten flackern, wenn das Objekt gedreht wird. (vgl. David-Wiki, 2011)

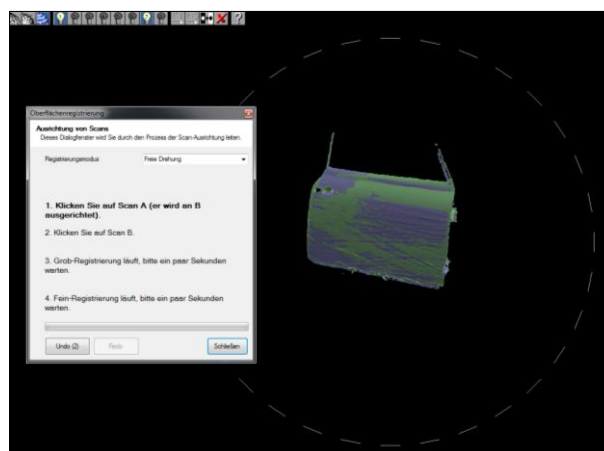


Abbildung 4-23: Fusionierte Scans der Außenseite

Die Ausrichtung der Scans zueinander erfolgt dabei nach dem Zufallsprinzip, sollte also die Fusion beim ersten Versuch fehlschlagen, kann mittels der Befehle *"Undo"* und *"Redo"* ein erneuter Versuch gestartet werden.

Sind die jeweils zusammengehörigen Scans der Tür aneinander ausgerichtet, werden beide unter **"1. Stellen Sie die Liste der einzelnen Scans auf"** miteinander zu einer einzelnen Punktwolke mit dem Befehl *"Kombinieren"* zusammengefügt.

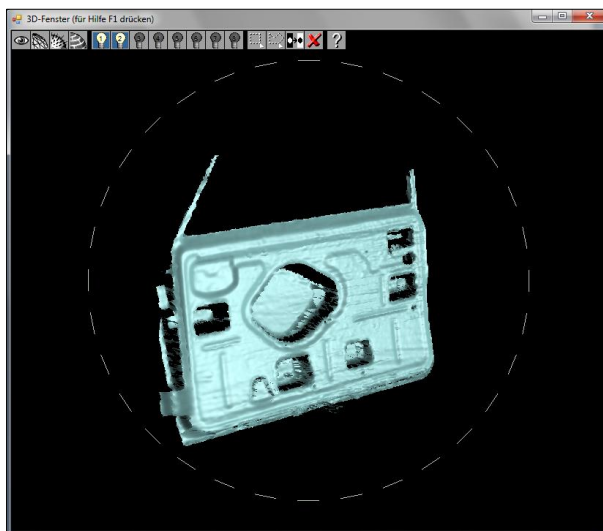


Abbildung 4-24: Die Kombinierte Tür-Innenseite

Unter **"3. Verschmelzen der Scans / Fusionierung des Dreiecksnetzes"** lassen sich anschließend die Scans miteinander zu einem 360° Scan zusammenschließen. Dies war bei der Tür jedoch nicht möglich, da sie auf dem Podest sowie dem Ständer gedreht werden musste, um alle Seiten zu erfassen. Leider gibt es keine Spiegelfunktion bei David-Laserscanner, womit die Fusion der Außen- und Innenseite der Tür in CATIA V5 erfolgen musste.

Zum Abschluss werden die Scans in **"4. Ergebnisse anzeigen und speichern"** im .stl Format gespeichert. Hier lässt sich noch ein Skalierungsfaktor für die Speicherung einstellen, bei der Tür wurde er aber auf 1,0 belassen.

4.3. Beurteilung der Ergebnisse

Auf den ersten Blick sind die Ergebnisse der Scans zufriedenstellend, besonders wenn man die Anschaffungskosten für David-Laserscanner mit denen von hochspezialisierten Industriescannern vergleicht. Trotzdem sind einige Anmerkungen zu machen. Während des Scanvorganges war sehr schnell zu erkennen, dass David-Laserscanner für die Größe der Tür und dem sich daraus ergebenden großen Kameraabstandes nicht optimal ist. So war es nicht immer möglich, einen perfekten Triangulationswinkel von circa 30° mit dem Linienlaser einzuhalten. Desweiteren traten aufgrund der Türform, besonders beim Innenblech, immer wieder Abschattungsprobleme auf. Ebenso verlaufen die Außenkanten der gescannten Tür selten glatt. Dies ist zum Großteil auf die Falzverbindung zwischen Außen- und Innenblech zurückzuführen und verursacht bei den meisten optischen Digitalisierungsverfahren Probleme. Der Scanvorgang selbst geht sehr schnell, allgemein nimmt die Vorbereitung des Scans mit der Kamerakalibrierung und Einstellung um einiges mehr Zeit in Anspruch als der Scanvorgang selbst. Die Bearbeitung der Scanergebnisse mithilfe der Software von David-Laserscanner ist einfach und intuitiv, jedoch wären mehr Bearbeitungs- und Einstellmöglichkeiten hilfreich, besonders bei der Shapefusion. Dort wäre eine Spiegelungsfunktion nützlich, da eine Fusion von Vorder- und Rückseite sonst nur an gescannten Objekten möglich ist, bei denen die Drehrichtung während der Aufnahme aller Objektseiten streng eingehalten wird.

4.3.1. Faktoren für die Beeinflussung der Genauigkeit

Die Genauigkeit der Scan-Ergebnisse ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wird aber zum Großteil von den Faktoren Kamera, Laser sowie Kalibrierkörper bestimmt. Desweiteren ist eine nicht spiegelnde oder glänzende Oberfläche des zu scannenden Objekts wichtig, auch sollten im Scan-Aufbau mögliche Abschattungsprobleme bedacht werden.

Für eine optimale Genauigkeit sollte die verwendete Kamera:

- so wenig Rauschen wie möglich erzeugen
- eine hohe Lichtempfindlichkeit besitzen
- eine Graubildkamera anstelle einer Farbkamera sein (Farbpixel werden interpoliert)
- eine möglichst hohe Bildauflösung besitzen (beeinflusst hauptsächlich die Auflösung des Dreiecksnetzes)
- eine Glaslinse statt einer Plastiklinse besitzen

Der Laser sollte:

- ein fokussierbarer Laser sein, um eine möglichst dünne Laserlinie zu erzeugen
- so hell wie möglich sein
- eine perfekte gerade Linie erzeugen
- bei einer Farbkamera eine rote oder grüne Laserfarbe besitzen

Beim Kalibrierkörper ist zu beachten:

- die Stellwände müssen immer einen exakten Winkel von 90° einnehmen
- das Papier mit den Kalibriermarken darf sich nicht wellen

Allgemein wird der Fehler kleiner als 1 % des Kameraabstandes angegeben (vgl. David-Wiki, 2011). Geht man von diesem angegebenen Messfehler aus, ergibt sich bei einem durchschnittlichem Kameraabstand zur Tür von 1,5 m eine Messungengenauigkeit von $\leq 1,5$ mm. Dieser Wert ist für eine Verwendung im Fahrzeugbau nicht akzeptabel, da hier Genauigkeiten von wenigen zehntel Millimetern erforderlich sind.

Innerhalb der Software ist es leider nicht möglich, eine Aussage über die Genauigkeit zu treffen, weshalb externe Programme für einen Genauigkeitsvergleich zwischen realen und gescannten Objekt herangezogen werden müssen.

4.3.2. Ermittlung der Genauigkeit zwischen Scan und Original

Die Beurteilung der Genauigkeit erfolgt in CATIA V5. Dazu werden die erhaltenen und kombinierten Punktwolken der Außen- und Innenseite der Tür mittels der Workbench "Digitized Shape Editor" bearbeitet und in jeweils separaten Dateien gespeichert. Wählt man in der Workbench unter "*Einfügen*" den Befehl "*Import von Punktwolken*", öffnet sich ein Fenster, mit dem sich verschiedene Parameter des Einlesens verändern lassen.

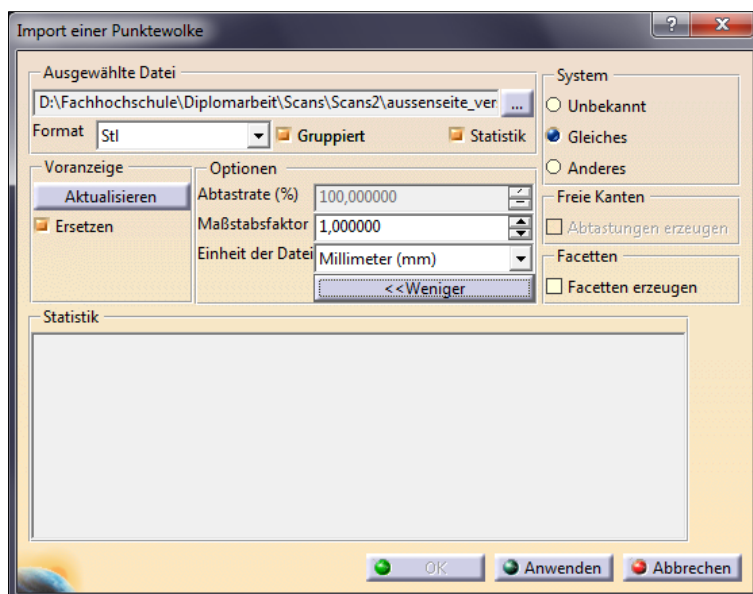


Abbildung 4-25: Importfenster in der Workbench "Digitized Shape Editor"

Unter "Ausgewählte Datei" wird die gespeicherte Punktwolke im Format ".stl" ausgewählt. Desweiteren wird unter "System" der Punkt "Gleiches" ausgewählt, da das verwendete Betriebssystem des Computers das selbe ist wie das des Scancomputers. Die "Abtaste" bleibt bei 100 %, desweiteren wird der "Maßstabsfaktor" auf 1,00 belassen. Da David-Laserscanner mit der Einheitengröße "mm" arbeitet, wird bei "Einheit der Datei" auch die Einheitengröße "mm" eingestellt. Anschließend wird die Punktwolke über den Befehl "Anwenden" importiert. Die Punktwolken beinhalten beim Außenblech 252.532, beim Innenblech 240.910 Punkte, die Punktabstände zueinander variieren dabei und liegen im Bereich von 0,5 - 2,5 mm. Das liegt unter anderem an der Tatsache, dass mehrmals mit dem Laser über das Objekt "gestrichen" wurde sowie am Zusammenfügen der Scanergebnisse mittels Shapefusion.

Neben dem Import als Punktwolke lassen sich die Scandaten auch als Polyederflächen-Verband importieren, dies geschieht durch den Befehl "Facetten erzeugen". Dabei werden zwischen jeweils drei benachbarten Punkten automatisch Dreiecksflächen erzeugt. Gut anwendbar ist diese Art der Scan-Darstellung jedoch nur bei geordnet aufgenommen Koordinatenpunkten mit einer niedrigen Fehlpunktquote. David-Laserscanner ist dafür weniger geeignet, Abbildung 4-26 zeigt einen Ausschnitt der importierten Punktwolke der Innenseite der Tür und das Ergebnis der automatischen Facettierung, welches in dieser Qualität kaum für die Flächenerzeugung verwendbar ist.

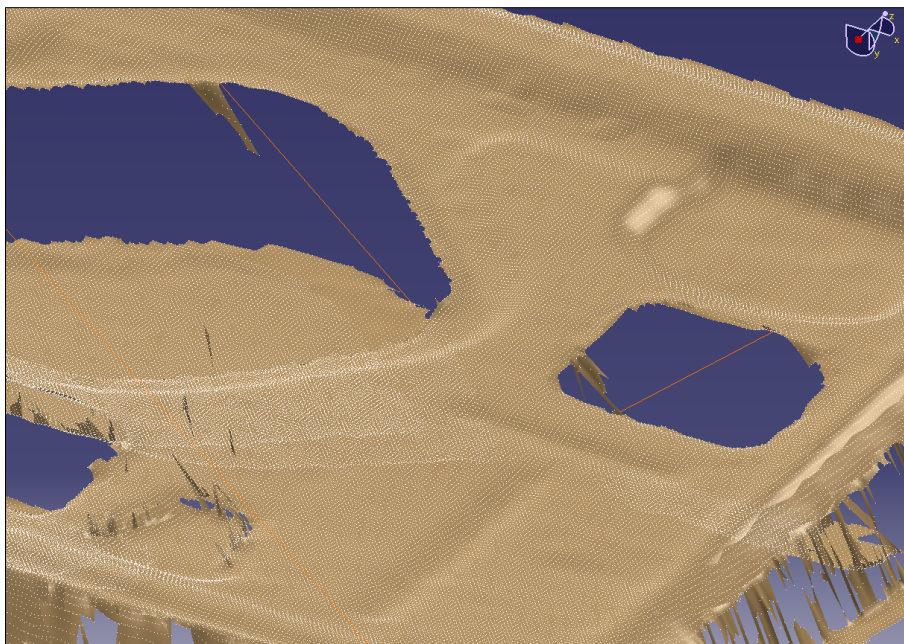


Abbildung 4-26: Ergebnis der Facettierung des Innenseitenscans durch CATIA

Um die Genauigkeit der Scans im Vergleich zum Original beurteilen zu können, müssen nun Geraden innerhalb der Punktwolken definiert, deren Längen gemessen und mit den Werten der Tür verglichen werden. Ein Problem dabei ist jedoch, geeignete Strecken zu definieren, die auch an der Originaltür gut zu messen sind. Insbesondere die Krümmung der Tür ist dabei hinderlich. Am Außenblech wurden folgende Strecken definiert:

- S1 als der Abstand zwischen den Außenkanten des Fensterrahmens
- S2 für das Höhenmaß im Bereich der Aussparung des Türgriffes

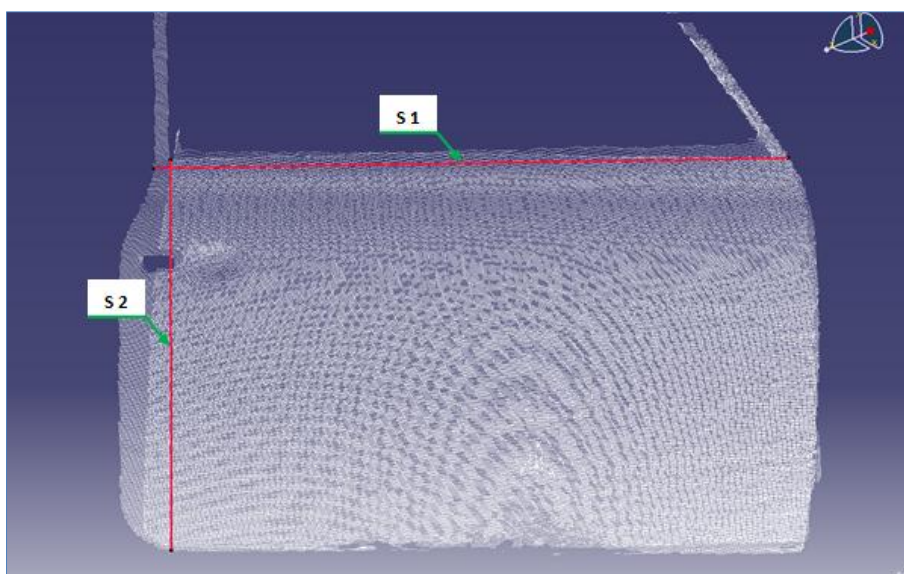


Abbildung 4-27: Strecken am Außenblech zur Kontrolle der Messgenauigkeit

Am Innenblech wurden folgende Strecken festgelegt:

- S3 zwischen den Außenkanten des Fensterrahmens
- S4 für den Abstand der Aussparungskanten im vorderen Bereich des Innenblechs
- S5 mit dem Abstand zwischen der Unterkante der unteren linken Aussparung und dem Außenblech

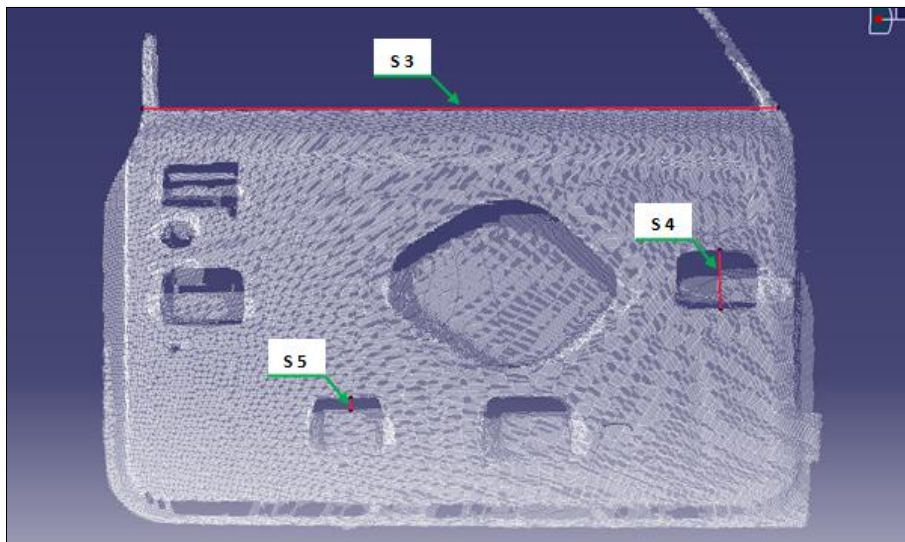


Abbildung 4-28: Strecken am Innenblech zur Kontrolle der Messgenauigkeit

Vergleicht man die in Catia gemessenen Strecken mit dem Original, erhält man folgende Ergebnisse:

Strecke	Länge Originaltür [mm]	Länge Punktwolke [mm]	Differenz [mm]	Differenz [%]
S1	867,5	865,081	+ 2,42	- 0,279
S2	558	557,465	- 0,535	- 0,096
S3	846,35	848,52	+ 2,17	+ 0,256
S4	79,5	79,646	+ 0,146	+ 0,184
S5	44,5	45,065	+ 0,565	+ 1,27

Tabelle 2: Vergleich der Messwerte zwischen Punktwolke und Originaltür

Besonders auffällig sind starke Differenzen auf den langen Strecken über die gesamte Tür, während die Ungenauigkeiten bei den kurzen Strecken vertretbar sind. Der Grund hierfür liegt zum einen im Scanaufbau, da jede Seite der Tür aus zwei verschiedenen Richtungen aufgenommen werden musste, um alle Kanten erfassen zu können. Da jedoch optische Digitalisierungsprogramme Probleme beim Erfassen von Kanten mit Falzausrundungen haben und die einzelnen Scans mittels Shapefusion zusammengefügt wurden, ist der mögliche Fehlergrad hoch. Hier zeigt sich, dass die Software David-Laserscanner bei komplexen Formen mit abgerundeten Kanten sowie einer relativ weiten Kameraentfernung zum Scanobjekt (hier im Schnitt 1,5 Meter) Probleme hat. Umgehen lässt sich diese am ehesten mit einer besseren Scan-Hardware wie einem leistungsstärkeren, fokussierbaren Laser oder einer hochauflösenden Graubildkamera. Trotzdem bleibt, geht man von dem vom Hersteller angegebenen Fehlergrad von kleiner 1 % des Kameraabstandes aus, das Problem der unzureichenden Genauigkeit für den Einsatz im Reverse Engineering. Damit kommen andere Einsatzmöglichkeiten, wie zum Beispiel während der Planungs- und Formfindungsphase von Bauteilen, wo es noch nicht auf eine hohe Genauigkeit der vermessenden Teile ankommt, eher in Betracht. So können Bauteile mit Freiformflächen aus Clay oder anderen, gut formbaren Werkstoffen von Hand modelliert werden, um sie anschließend ohne hohen Aufwand mit David-Laserscanner zu digitalisieren.

Als nächstes wurden die Punktwolken überarbeitet und störende Fehlpunkte entfernt. Dabei wurde offensichtlich, dass die Punktwolken bei der in David durchgeführten Shapefusion nicht immer perfekt zueinander ausgerichtet waren, desweiteren sind die Türträger teilweise sehr ungleichmäßig erfasst.

Deshalb wurden in David-Laserscanner noch einmal mit zwei Außenscans eine Shape-Fusion zu einem Scan durchgeführt, um ein besseres Ergebnis als das der ersten Punktwolke zu erhalten. Diese Fusion war qualitativ etwas besser, jedoch immer noch an den Rändern sehr unregelmäßig. Anschließend wurde versuchsweise mit beiden Außenscans weitergearbeitet. Während des Strahls der Außenhaut stellte sich jedoch heraus, dass die zweite Fusion die besser nutzbare ist.

Im Scan der Innenseite der Tür sind Aussparungen und Sicken erkennbar, jedoch wies auch diese Punktwolke einige größere Lücken auf, besonders im Bereich der Falze. Da diese Lücken auch auf der Außenseite auftraten und die Kontur der Tür mittels Handvermessung erfasst wurde, konnte die Punktwolke trotz dieser Fehler weiterverwendet werden.

4.4. Fazit

Nach einer kurzen Einarbeitungszeit ist das Durchführen von Oberflächenscans mittels David-Laserscanner verhältnismäßig einfach durchzuführen. Die Kosten der Software sowie der zugehörigen Komponenten sind sehr günstig im Vergleich zu professionellen Scansystemen, jedoch erreicht David-Laserscanner nicht annähernd deren Genauigkeit. Das liegt zum einen an der optischen Erfassungsmethode mittels Streifenprojektion, die zwar ein sehr schnelles Erfassen von Oberflächen ermöglicht, jedoch Probleme an abgerundeten Oberflächenkanten durch die schlagartige Veränderung des Schnittwinkels zwischen Laserlicht-Ebene und Kamera-Blickrichtung hat. Desweiteren ist David-Laserscanner nicht für die Flächenrückführung im Maschinenbau entwickelt worden, sondern ein Projekt zum schnellen und kostengünstigen Digitalisieren von Objekten, was sich an den großen Punktabständen innerhalb der Punktwolke widerspiegelt. Für eine gute Flächenbeschreibung der Tür wären maximale Punktabstände von weniger als 1 mm nötig. Professionelle Systeme zur Oberflächenerfassung erzeugen zum Beispiel Punktwolken mit mehreren Millionen Punkten bei einer Messgenauigkeit von wenigen Mikrometern. Eine Anwendung von David-Laserscanner im Reverse Engineering ist damit ausgeschlossen, ein Einsatz zum Erfassen von Oberflächen innerhalb der Designfindungsphase bei der Entwicklung von Bauteilen wäre jedoch durchaus möglich. Da der Kameraabstand zum Objekt ausschlaggebend für die Messgenauigkeit des Scans ist, sollten die Objekte bedeutend kleiner als die hier verwendete Tür sein, zusätzlich verringert eine einfache Oberflächenform die Fehlerquote. Da die Software ständig verbessert wird, ist vor allem im Zuge der technischen Weiterentwicklung von Hardware wie zum Beispiel Kamera und Laser, in Zukunft durchaus von einer sich stetig verbesserten Genauigkeit auszugehen. Somit ist David-Laserscanner für den Einstieg in das optische Digitalisieren aufgrund seines Preises ideal für Anwendungen, bei welchen es noch nicht auf eine sehr hohe Messgenauigkeit ankommt.

5. Konstruktion der Tür in CATIA V5

Nachdem die Kontur über das Scanverfahren sowie die wichtigsten Formgebungspunkte durch die Handmessung ermittelt waren, wird die Tür in CATIA V5R16 konstruiert. Die nachfolgende Beschreibung des Konstruktionsvorganges befasst sich mit den wichtigsten Aspekten und auftretenden Problemen der Nachkonstruktion in CATIA V5, ist jedoch keine detaillierte Anleitung und Auflistung aller einzelnen Arbeitsschritte, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

5.1. Ausrichten der Punktwolken

Die Ausrichtung der Punktwolken der Außen- und Innenseite wurden in der Workbench "Assembly Design" durchgeführt. Die Ausrichtung der beiden Punktwolken zueinander, in der Flächenrückführung als *Fitten* bezeichnet, ist schwierig, da es fast unmöglich ist identische Punktepaare mit einem gemeinsamen Koordinatenursprung in beiden Wolken zu finden. Aus diesem Grund erfolgt die Ausrichtung manuell mittels des Manipulations-Befehls und wird im Laufe der Konstruktion immer wieder angepasst, um ihre Lage zu optimieren.

5.2 Übertragen der von Hand gemessenen Punkte

Die 49 von Hand gemessenen Punkte der Außenhaut wurden in einem neuen CATIA Part in der Workbench "Generative Shape Design" übertragen. Dabei wurden die X-Werte mit positivem Vorzeichen eingetragen, damit die konstruierte Tür der Fahrertür entspricht. Da die Originaltüren auf Fahrer- und Beifahrerseite in den Abmessungen identisch sind, entfällt somit das spätere Spiegeln des CAD-Modells. Um eine Beurteilung der Qualität der gemessenen Punkte zu erhalten, werden sie anschließend mit Splines miteinander verbunden. Hier war bereits eine tangentialstetige Ausrichtung der Splines teilweise nur schwer durchführbar, da durch die erzwungenen Punktdurchgänge der Kurven diese schon bei Abweichungen von einem halben Millimeter "wellig" werden.

Die daraus entwickelten Flächen für die Außenhaut der Tür waren somit von minderer Qualität und für eine Weiterverwendung nicht geeignet. Die schlechte Qualität der Außenhaut wird deutlich in Abbildung 5-1 anhand der Knicke im Lichtverlauf, nachdem die Beleuchtung in CATIA auf den Leuchtröhreneffekt umgestellt wurde.

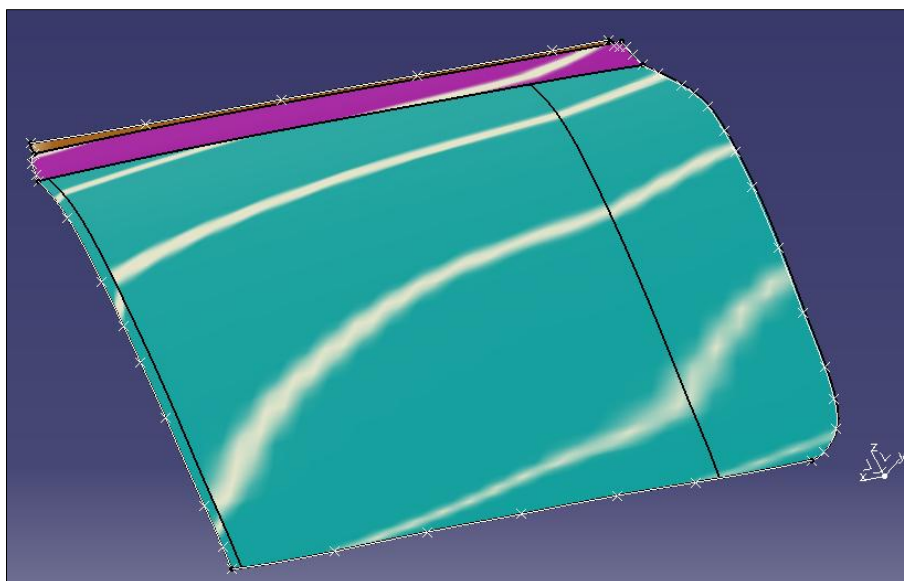


Abbildung 5-1: Erstellte Außenfläche mit den Punkten aus der Handmessung

Um die Flächen neu zu überarbeiten, wurde die erstellte Außenhaut der Tür sowie die Punktwolken der Außenhaut in der Workbench "Assembly Design" so aneinander ausgerichtet, dass sie sich durchdringen. Dabei war festzustellen, dass bereits die Außenform der Tür mit der Form der Punktwolke übereinstimmte. Dies war so zu erwarten, da die Handmessung mit großer Sorgfalt durchgeführt wurde, jedoch mussten die Kurven zur Bestimmung der Außenhautfläche überarbeitet werden.

5.3. Konstruktion der Außenhaut

Um die Qualität der Außenhaut zu erhöhen, wurden die Kurven der bisher erstellten Außenhaut neu konstruiert. Dabei wurden bei Bedarf wichtige Maße direkt an der Originaltür abgemessen. Im Idealfall waren dies die Abstände des zu messenden Objektes zu den von Hand aufgenommenen Punkten oder markanten Türbereichen, welche im Original wie im CAD-Modell identisch sind. Die Blechstärke der Tür beträgt 1 mm, für bessere Vergleichbarkeit der hier gezeigten Fotos zwischen Original und Modell wurden die in CATIA erstellten Teile gespiegelt.

Die Außenhaut der Tür lässt sich konstruktiv in drei verschiedene Flächenabschnitte unterteilen (Abbildung 5-2). Die oberste Begrenzung der Außenhaut wird durch die Fläche zum Aufstecken der äußeren Wetterleiste bestimmt. Diese Wetterleiste ist eine Dichtleiste aus Gummi, welche den Türinnenraum bei geschlossener Scheibe vor eindringendem Wasser schützt. Dies geschieht mittels direktem Kontakt der Dichtfläche zur Scheibe, weshalb die

Leisten auch gleichzeitig Einfluss auf die Scheibenführung nehmen. Die Fläche selber kann als gerade angesehen werden.

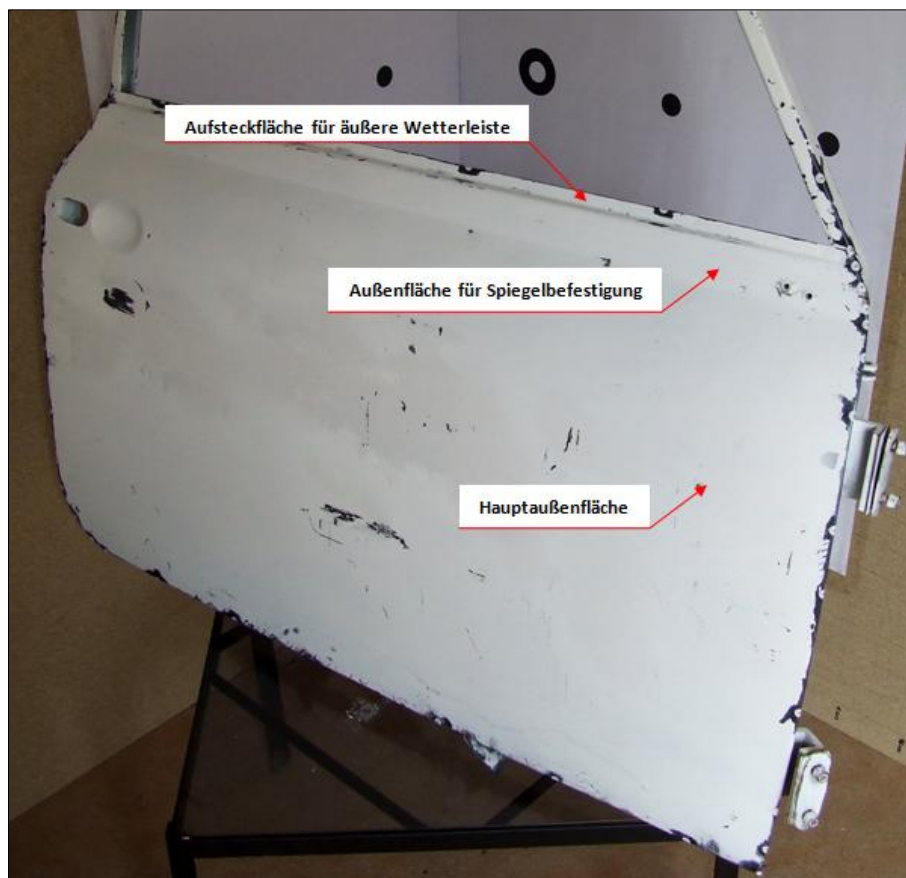


Abbildung 5-2: Flächenunterteilung Außenhaut

Unterhalb der Aufsteckfläche befindet sich mit einem pfeilähnlichen Absatz zur Vorderseite die Außenfläche für die Spiegelbefestigung. Sie dient bereits der äußeren Formgebung der Tür und geht mit einem starken Knick in die Hauptaußenfläche über, welche hauptsächlich die Außenform der Tür beschreibt. Die Verbindung der Außenhaut mit dem Innenblech geschieht mittels Falzflächen, die an der Vorder-, Rück- und Unterseite umlaufend sind. Diese feste Verbindung mittels Bördeln wird zusätzlich noch werksseitig durch zwei Schweißpunkte an den obersten Verbindungspunkten stabilisiert.

5.3.1. Konstruktion der Aufsteckfläche für die äußere Wetterleiste



Abbildung 5-3: Aufsteckfläche im Original

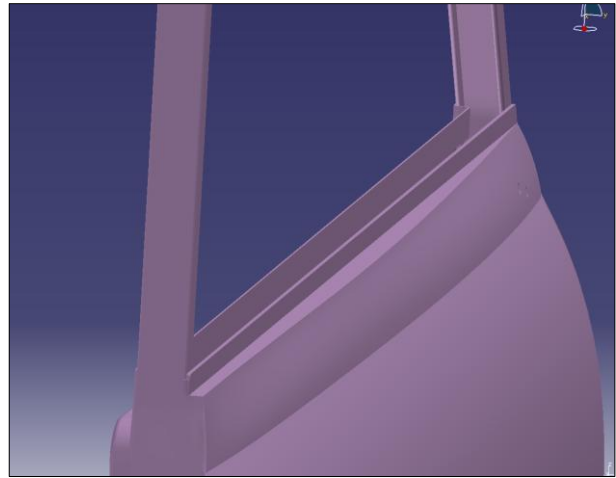


Abbildung 5-4: Aufsteckfläche in CATIA V5

Die Aufsteckfläche für die äußere Wetterleiste an der Türaußenhaut ist ein gerades Blechstück, das aufgrund des Alters der Tür an einigen Stellen leicht verbogen ist. Diese Stellen wurden geglättet, da sie nicht den Auslieferungszustand der Tür darstellen. An der unteren Kante ist es im 90° Winkel gebogen und verläuft Pfeilförmig gekrümmt bis zum Übergang zur Außenfläche der Tür. Durch die Ausrichtung der Punktwolken sowie der handgemessenen Punkte, bei denen das gemeinsame Koordinatenursprungssystem auf die vordere, äußere Kante der Aufsteckfläche gelegt wurde, konnte die Kontur der Aufsteck- und Übergangsfläche zur Fläche für die Spiegelbefestigung mittels Skizzierer in der Workbench "Generativ Shape Design" konstruiert werden. Anschließend wurden die erstellten Flächen zum Blech aufgedickt.

5.3.2. Konstruktion der Hauptaußenfläche

Da die Fläche für die Spiegelbefestigung sowie die Hauptaußenfläche Designelemente des Gesamtfahrzeuges sind und ihre Formgebung von den angrenzenden Bereichen des Fahrzeuges abhängt, ist eine so genaue Rekonstruktion der Form wie möglich anzustreben. Die Flächen müssen einen sehr guten optischen Eindruck machen, was bedeutet, dass ihre Krümmungsverläufe gleichmäßig sind und Knicke in ihrem Verlauf nur als gewollte Designelemente auftreten. Dies war durch einfaches Verbinden der von Hand gemessenen Punkte durch Kurven nicht möglich. Für ein reines Erstellen der Kurven anhand der Punktwolken ist die Qualität dieser zu schwankend und die Punktdichte allgemein zu niedrig. Aus diesem Grund wurde ein Kompromiss aus beiden Möglichkeiten gewählt. Die von Hand gemessenen Punkte dienen als Basis für eine Kurvenneuentwicklung, die Krümmung der Kurven wurde während ihrer Erstellung anhand der Punktwolken überprüft und angepasst. Als Methode zur Neuentwicklung der Außenhaut entschloss ich mich zur Kurvenerstellung mittels Strak in CATIA V5. Die dazugehörige Workbench "Automotive Class A" ähnelt in ihrer Funktionsweise stark dem Programm "ICEM SURF", was nicht verwundert, da es als Konkurrenzmodul entworfen wurde. Die dabei erzeugte Geometrie wird mittels Beziér-Kurven und Flächen erstellt.

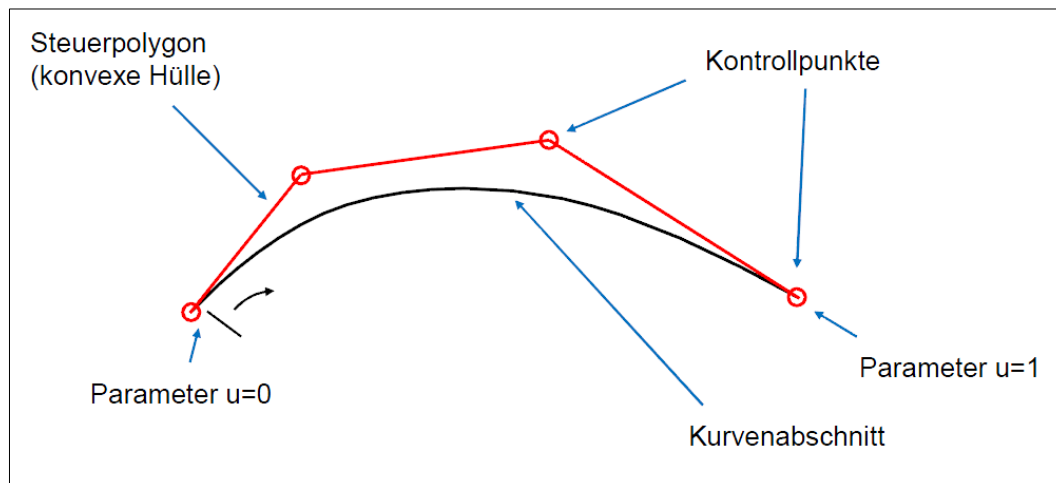


Abbildung 5-5: Aufbau einer Beziér-Kurve (Schneefuss / Lender, 2008, S. 1)

Der Vorteil der Beziér-Kurven besteht darin, dass sie sich verhältnismäßig einfach mathematisch mithilfe eines Polygonzuges beschreiben lassen. Dies geschieht durch eine Algorithmus-Verfahren, das in den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts bei Citroen von Paul de Faget de Casteljau entwickelt wurde. Der Algorithmus besagt, dass sich eine Beziér-Kurve auch von zwei aneinandergesetzten Beziér-Kurven darstellen lässt. Diese Unterteilung lässt sich soweit fortführen, bis der die Beziér-Kurve beschreibende Polygonzug annähernd dem der Form der Beziér-Kurve entspricht. Diese Anwendung des Algorithmus für die

Kurvenberechnung des CAD-Programms ermöglicht es dem Anwender, sehr einfach Freiformkurven und Flächen zu erstellen und zu bearbeiten.

Wichtig für die Konstruktion mithilfe dieser Kurven ist jedoch ein sehr sorgfältiges Arbeiten, da die Steuerung der Kurven anhand der Polygone nur in fest definierten Ansichten erfolgen sollte. Zusätzlich müssen zusammenhängende Kurven je nach gewünschter Qualität aneinander angeschlossen werden. Die Möglichkeiten dabei sind ein Punkt-, Tangenten- und Krümmungstetiger Anschluss und ist in Abbildung 5-6 zu sehen. Desweiteren gibt es noch die Möglichkeit einer torsionsstetigen Verbindung, die aber selten genutzt wird. Für die Außenflächen der Tür wird die Krümmungstetige Kurverzeugung gewählt.

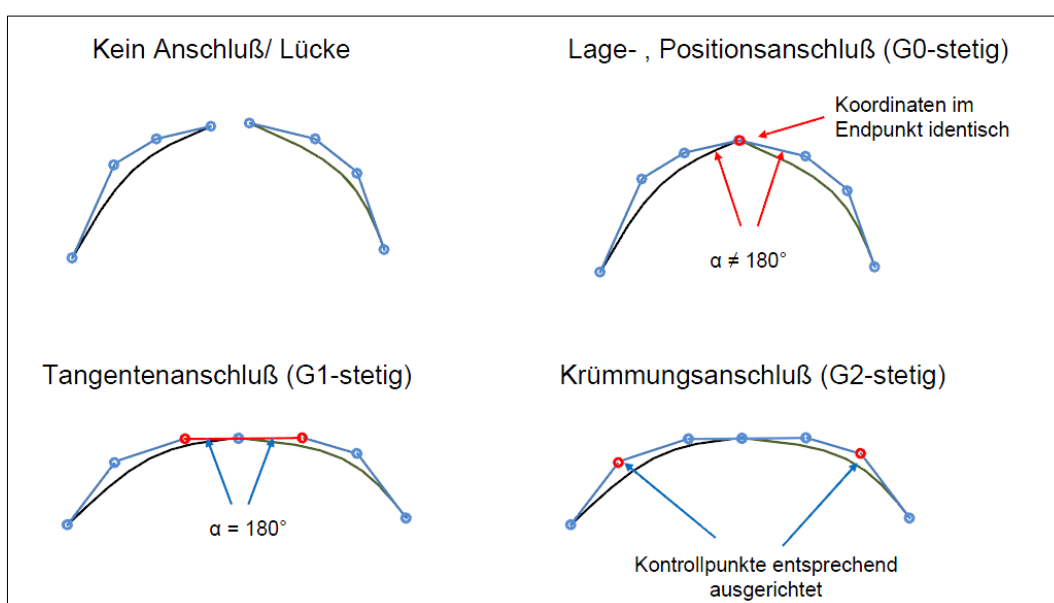


Abbildung 5-6: Anschlussarten für Beziér-Kurven (Schneefuss / Lender, 2008, S. 3)

Dazu werden durch wichtige Eckpunkte, die Anfang und Ende eines besonderen Kurvenverlaufs darstellen, mittels Befehl "ACA-Kurvererstellung" die Beziér-Kurven erstellt. Extrem wichtig dabei ist, unter "Art der Erzeugung" die Auswahl "durch Punkte" auszuwählen. Fährt man anschließend mit dem Mauszeiger über den Punkt, bildet dieser einen roten Kreis, erst dann darf der Punkt ausgewählt werden. Bei der Erstellung der Kurven kann ihr Grad beliebig verändert werden. Der Grad der Kurve entspricht dabei der Anzahl der Kontrollpunkte und bestimmt gleichzeitig ihre Ordnung. Allgemein gilt, dass eine einzelne Kurve der 6. Ordnung besser zu handhaben ist als eine Kurve der 15. Ordnung. Deshalb sollten die erstellten Kurven nach Möglichkeit immer nur verhältnismäßig einfache Geometriebereiche wiedergeben und gegebenenfalls aufgeteilt werden.

Die Darstellung der Kontrollpunkte muss für die Kurven einzeln aktiviert werden, dies ist möglich unter "Einfügen -> Generische Tools -> Aufbereitung". Bevor man beginnt, die Beziér-Kurven in die gewünschte Form zu bringen, sollte man sich mithilfe der

Krümmungsanalyse die Kurvenkrümmung anzeigen lassen. Desweiteren ist ein Arbeiten in festen Ansichten ratsam, da sich ein unbedachtes Verschieben der Kontrollpunkte im freien Raum nur sehr schwer rückgängig machen lässt. Zu beachten ist weiterhin, dass sich mit dem Bearbeiten der ACA-Kurven das Fenster "Szene" öffnet, in dem nach der Kurvenbearbeitung entweder das Ergebnis mit dem Befehl "Ok" bestätigt oder mit "Abbrechen" verworfen wird. Ein Zurücknehmen der Arbeitsschritte wie sonst üblich in CATIA V5, ist nicht möglich.

Die Neuerstellung der Kurven sollte sich dann anhand der Form der Punktwolken und gegebenenfalls der alten Kurven richten und mithilfe der Krümmungsanalyse harmonisch verlaufen. In Abbildung 5-7 ist der mit Handmessung erzeugte Kurvenverlauf der Spline an der Scharnierseite sowie in Abbildung 5-8 der neu erzeugte ACA-Kurvenverlauf mithilfe der Beziér-Kurve sichtbar.

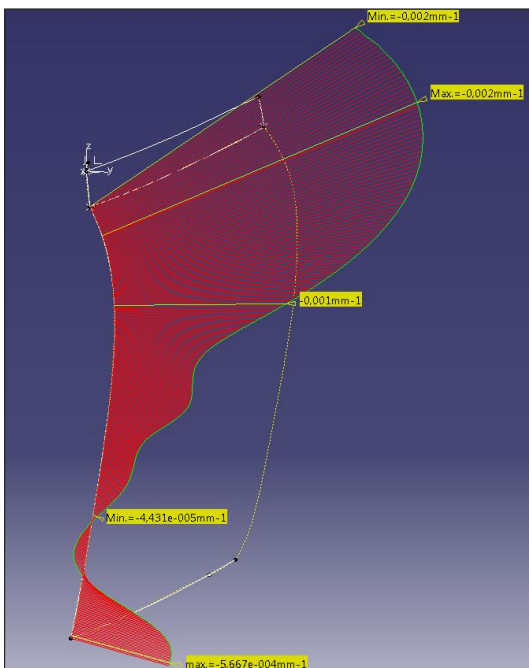


Abbildung 5-7: Kurvenverlauf mittels Spline

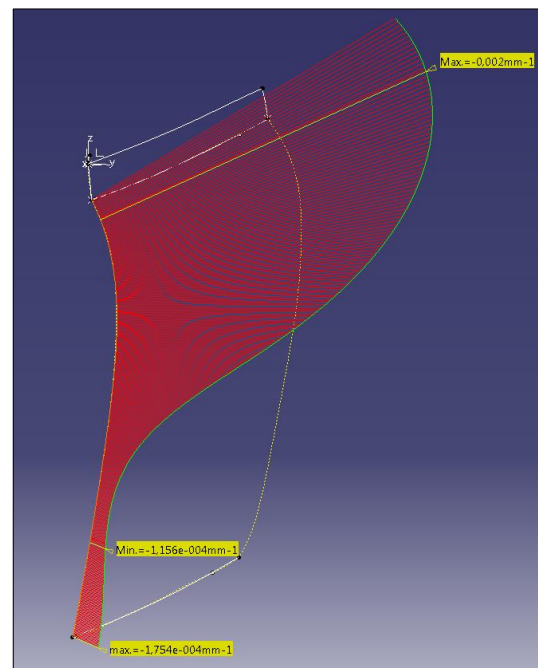


Abbildung 5-8: Kurvenverlauf mittels Beziér

Nach Erstellung der Kurven sollte als nächstes ihr Anschluss untereinander kontrolliert werden. Dies geschieht über "Einfügen -> Formänderung -> ACA-Abgleich". Anschließend wählt man zwei zu überprüfende Kurven aus und kontrolliert, ob die geforderten Anschlussbedingungen eingehalten sind. Ebenso ist es möglich die Anschlussart zu ändern, jedoch ändert dies natürlich auch den Kurvenverlauf, womit gegebenenfalls eine neuerliche Überprüfung des Kurvenverlaufs mittels Krümmungsanalyse durchgeführt werden muss.

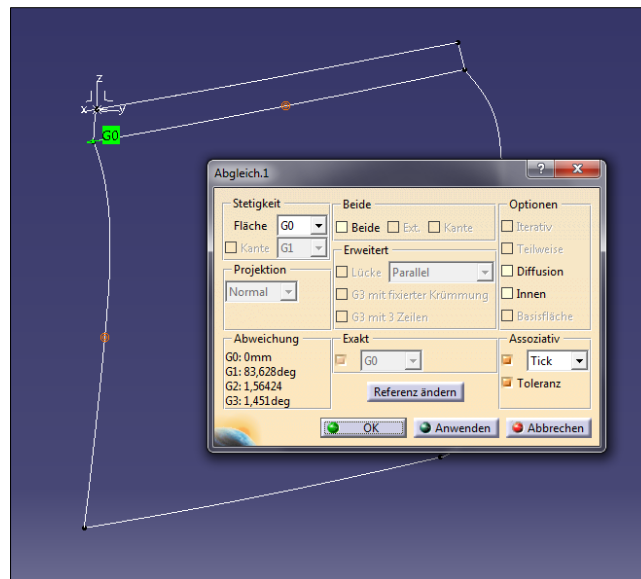


Abbildung 5-9: Menü "ACA-Abgleich"

Zum Abschluss wird die Fläche durch "Einfügen -> Flächen erzeugen -> ACA-Flächenstück von Kurven" erzeugt. Die neue Fläche sollte nun mittels der Lichtbandanalyse oder Flächenkrümmungsanalyse auf ihre Qualität überprüft werden. Bei der Lichtbandanalyse ist auf einen glatten, harmonischen Verlauf des Lichtbandes auf der Oberfläche zu achten. Ist dies nicht der Fall, muss die Oberfläche neu überarbeitet werden.

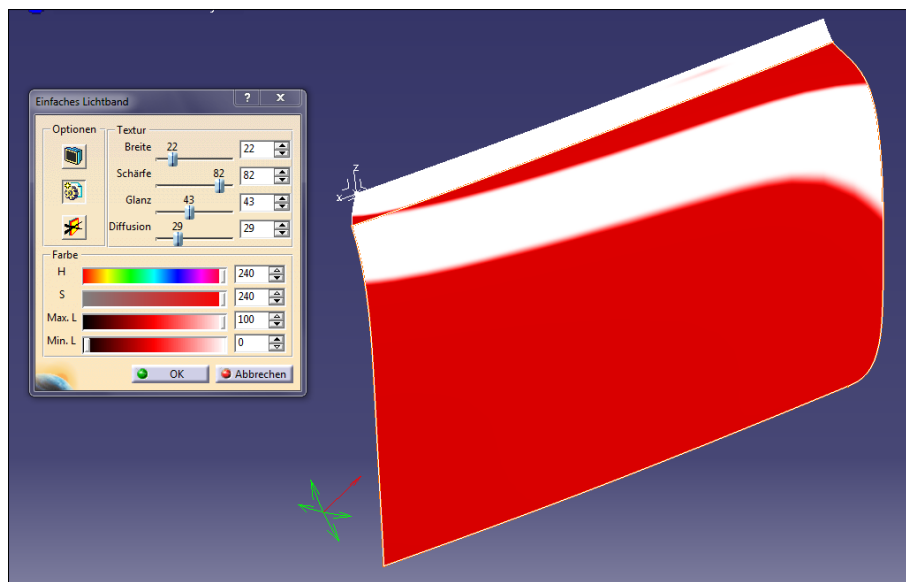


Abbildung 5-10: Lichtbandanalyse der durch Strak erstellten Flächen

Die beiden erstellten Flächen der Spiegelbefestigung sowie der Hauptaußenfläche wurden anschließend nach einem Wechsel in die Workbench "Generative Shape Design" aufgedickt und mit der Aufsteckfläche für die Wetterleiste verbunden.

5.3.3. Konstruieren der Tür-Falze

Das Innenblech der Tür ist durch Falze und zwei Schweißpunkten mit dem Außenblech fest verbunden. "Falze werden verwendet, um zwei Bauteile ohne Beeinträchtigung der Qualität der Designoberfläche zu verbinden. Beim Falzen werden beim Zusammenbau von einem äußeren Bauteil Blechbereiche am Bauteilrand, die Falze, um ein inneres Bauteil umgeklappt und verpresst." (Brill, 2009, S. 211)

Die Ermittlung des Falzradius wird in Abbildung 5-11 dargestellt.

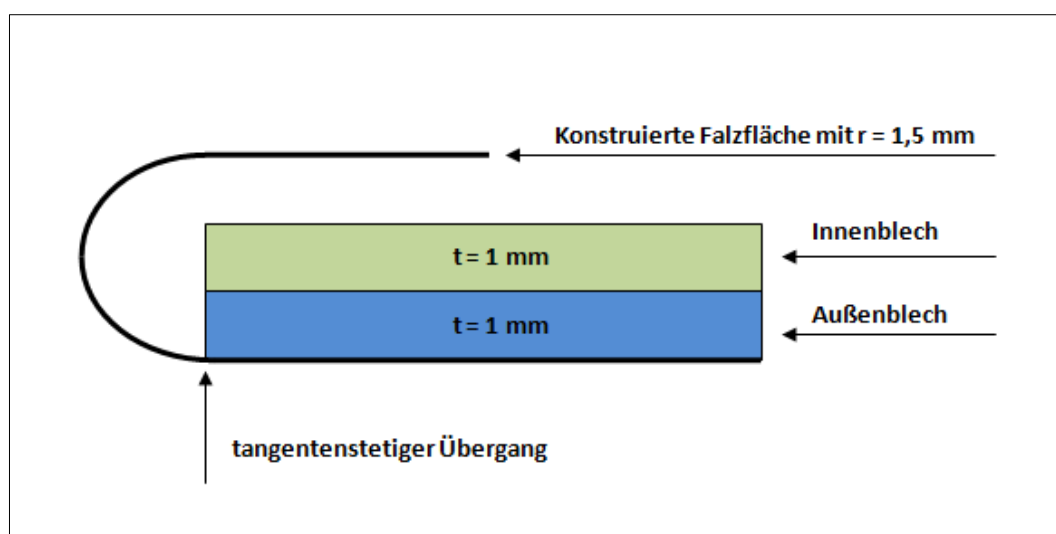


Abbildung 5-11: Ermittlung des Falzradius

Da bei der Tür die Außenmaße der Handmessung an der äußersten Falzkante gemessen wurden und auch die Scans nur die äußere Sichtkante erfassten, müssen die Türaußenflächen an Schloss-, Scharnier- und Unterseite um 1,5 mm nach innen beschnitten werden. Anschließend werden die Falze jeweils einzeln für die Scharnier-, Schloss- und Unterseite in der Workbench "Generative Shape Design" erstellt, die folgende Konstruktionsbeschreibung wurde am Beispiel der Scharnierseite durchgeführt. Dort wurde der Verlauf der Außenkante des Außenblechs mittels "Parallele Kurve" als spätere Führungskurve 1 neu erstellt. Zusätzlich wird am Beginn der jeweiligen Kurve senkrecht zur Außenfläche eine Gerade mit einer Länge von 3 mm erzeugt, mit der durch

"*Profilflächenerzeugung mit Referenzkurve*" eine neue Fläche erstellt wird. Der Kurvenverlauf an der oberen Kante der erstellten Fläche wird ebenfalls mit dem Befehl "*Parallele Kurve*" kopiert. Sie dient als Führungskurve 2. Nun kann über "*Profilflächenerzeugung mit 2 Führungselementen und Radius*" die Falzausrundung erzeugt werden. CATIA schlägt dabei verschiedene Lösungen vor, die über das Feld "*Lösung(en)*" ausgewählt werden können.

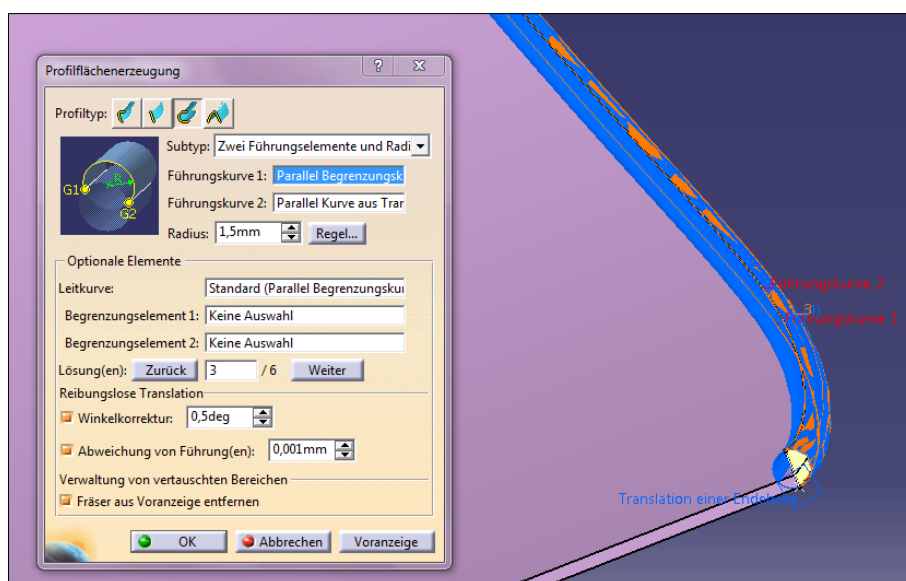


Abbildung 5-12: Erstellen der Falzausrundung

Für die Falzfläche wurde an der oberen Kante der erstellten Falzausrundung tangential eine Gerade mit der Länge von 10 mm und im Anschluss die Falzfläche mittels Profilflächenerzeugung erstellt. Der Konstruktionsidee nach sollte nun die Falzfläche einen konstanten Abstand zur Innenseite des Außenblechs von 2 mm haben. Darin wird dann das Innenblech hineingelegt. Die Kontrolle des Abstandes ergab aber stark schwankende Abstandswerte, mit einem Minimum von 1,861 mm und einen Maximalabstand von 2,973 mm. Damit der Verlauf der Falzfläche wie gefordert dem Verlauf des Außenblechs entspricht, musste die Falzfläche neu angepasst werden. Dazu wurde die Außenkante der Falzfläche auf die Innenseite des Außenblechs krümmungsstetig projiziert.

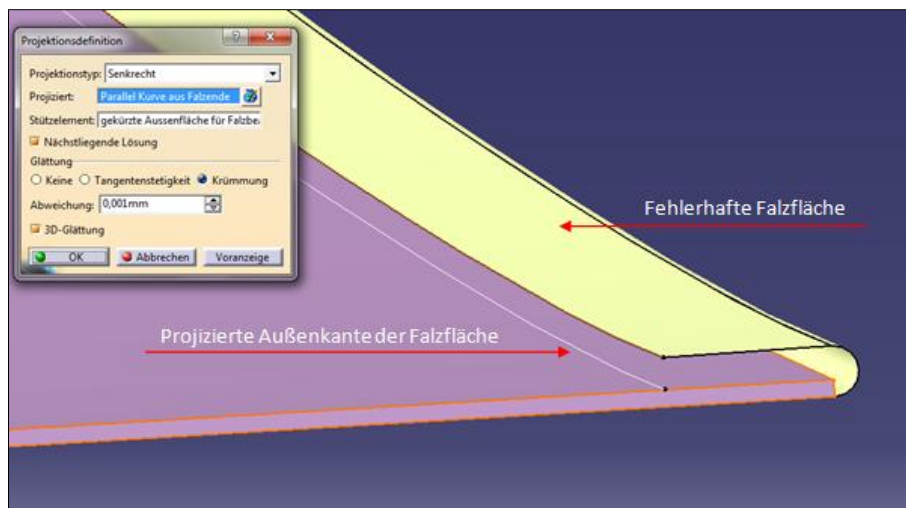


Abbildung 5-13: Projizieren der Falzkante

Anschließend wurde eine neue Leitkurve von 2 mm Höhe senkrecht zur Innenfläche erstellt und daran entlang ein neues "Höhenprofil" mit der projizierten Außenkante der Falzfläche erstellt. Die obere Kante des neuen "Höhenprofils" entspricht nun der Endkante der Falzfläche, sie wird über "*Profilflächenerzeugung Begrenzung und Mitte*" neu erstellt. Dadurch wurde der Maximalabstand der Falzfläche zur Innenseite des Außenblechs auf 2,002 mm, der Mindestabstand auf 1,981 mm verringert. Diese Werte sind befinden sich im vertretbaren Rahmen, da die Falze der Originaltür teilweise sehr ungleichmäßig sind und mit hoher Wahrscheinlichkeit von Hand erstellt wurden. Die Konstruktion der Falzflächen wurde an dieser Stelle bis zum Abschluss der Innenblechkonstruktion unterbrochen, da sie sich auf Höhe der Außenfläche für die Spiegelbefestigung um 90° verdrehen und dort auf den oberen Seitenflächen des Innenblechs aufliegen.

5.3.4. Konstruktion des Verstärkungsbleches für die Spiegelbefestigung

Entlang der gesamten Innenseite der Aufsteckfläche für die Wetterleiste verläuft ein zugeschnittenes Verstärkungsblech von 1 mm Stärke mit Aussparungen für die Spiegelbefestigung. Es ist mit der Außenhaut sowie dem Fensterrahmen mittels Punktschweißverbindungen verbunden. Das Blech ist nötig, damit durch die Spiegelbefestigung die Außenhaut nicht beschädigt wird, zusätzlich versteift es die Aufsteckfläche für die Wetterleiste. Die Aussparungen sind auf beiden Seiten symmetrisch, wodurch das Blech in der linken wie rechten Fahrzeurtür eingebaut werden kann. Durch die schlechten Lichtverhältnisse innerhalb der Tür sowie des kleinen Spaltes zwischen den Aufsteckflächen für die Wetterleisten war es nicht möglich, ein Foto mit ausreichend guter Qualität des Originalbleches zu machen, Abbildung 5-14 zeigt das CAD-Modell.

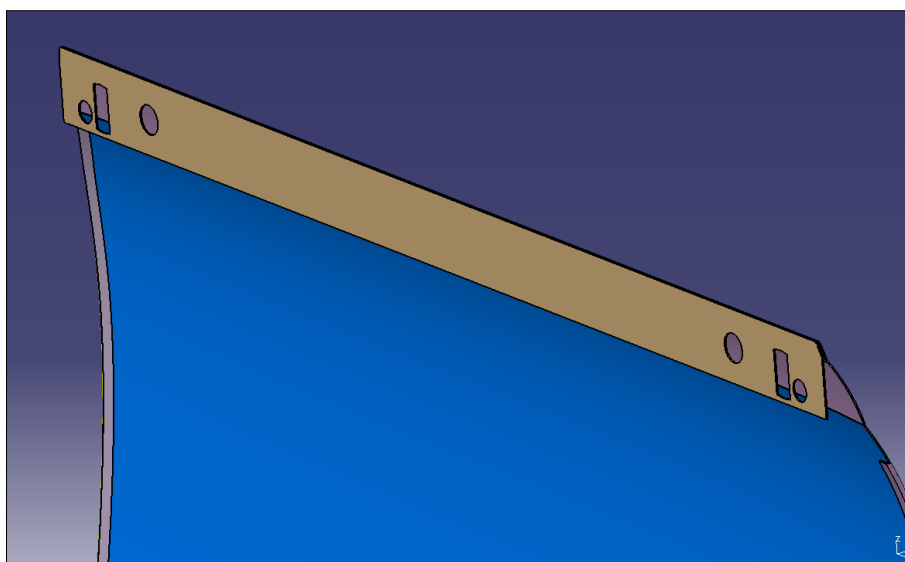


Abbildung 5-14: CAD-Modell des Verstärkungsblechs für die Spiegelbefestigung

Die Konstruktion erfolgte in der Workbench "Generative Shape Design" und wurde mittels Sketcher entlang der Innenkante der Aufsteckfläche für die Wetterleiste entwickelt. Mittels Symmetriebedingungen wurden anschließend die Aussparungen erzeugt und die Flächen zum Blech aufgedickt.

5.4. Konstruktion der Seitenscheibe

Die Seitenscheibe ist eine nichtgekrümmte Fensterscheibe aus Fahrzeugglas mit einer Wandstärke von 5 mm. An ihrer Unterseite befinden sich 2 Klemmschienen, die mit dem Kurbel-Fensterheber verbunden sind, die Führung der Scheibe erfolgt durch den Fensterrahmen. Aufgrund ihrer planen Oberfläche gestaltete sich ihre Konstruktion in CATIA verhältnismäßig einfach. Sie wurde fest auf einen Zeichenkarton gelegt und ihre Kontur übertragen. Anschließend sind 44 Punkte festgelegt und mit Zirkeln abgemessen wurden. Ihre Koordinaten sind im Anhang 8.3 zu finden.

Nach Übertragen der Punktkoordinaten in der Workbench "Generative Shape Design" wurden sie mit Geraden sowie Splines tangentialstetig verbunden. Die Fensterfläche wurde mit dem Befehl "Füllen" erzeugt und in der Workbench "Part Design" auf ihre Stärke von 5 mm aufgedickt. Die Verrundung der Außenkanten wurde zum Abschluss mit 2,5 mm durchgeführt und der Werkstoff Glas zugeordnet.

Die Klemmschienen werden im Anschluss an die untere Fensterscheibenkante konstruiert. Sie bestehen aus drei Teilen. Ein den Scheibenrand umschließender Gummischutz, in den die Scheibe geklemmt ist, ein 1,5 mm dickes Umschließungsblech zum Befestigen des Gummis und eine 1 mm starke Führungsschiene für den Fensterheber. Im CAD-Modell wird eine Klemmschiene mittels Sketcher und Translationsflächen erzeugt, die zweite Klemmschiene durch Symmetrie.

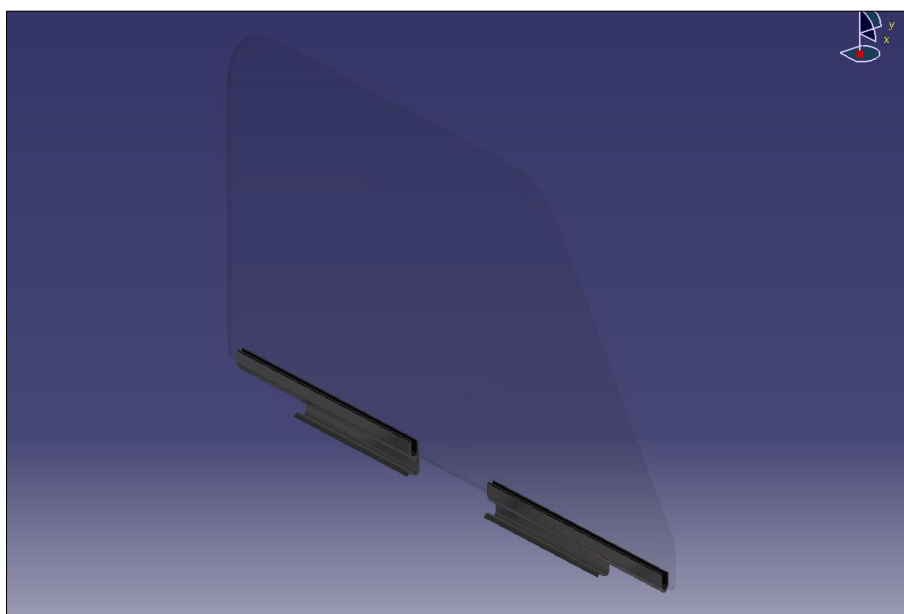


Abbildung 5-15: CAD-Modell der Seitenscheibe

5.5. Konstruktion des Fensterrahmens

Der Fensterrahmen des Austin Mini ist ein teilweise gebogenes U-Profil mit einer Wandstärke von 1 mm. Er ist mit den obersten Enden des Außen- und Innenblechs fest verbunden und wird von diesen an seinen Außenseiten teilweise umschlossen. Im Innenprofil des Fensterrahmens ist eine umlaufende Fensterdichtung aus Gummi eingepasst. Diese Dichtung dient bei geschlossener Seitenscheibe zur Abdichtung des Innenraums gegen Nässe, vermindert störende Windgeräusche durch entstehende Turbulenzen zwischen Fensterfläche und Fensterrahmen und dämpft mögliche Klappergeräusche der Seitenscheibe. Die Enden des Fensterrahmens verlaufen parallel in den Türinnenraum hinein und besitzen die selbe Länge. Auf der Schlossseite des Fensterrahmens verengt sich zusätzlich das Profil im Türinnenraum, um eine bessere Scheibenführung zu ermöglichen. Entlang des Fensterrahmenprofils im Inneren der Tür sind desweiteren Filzflächen von bis zu 10 mm Stärke eingeklebt, auch sie dienen zur Scheibenführung und Geräuschvermeidung. Da die Kontur der Seitenscheibe annähernd identisch ist mit der Kontur des Fensterrahmens, kann dieser ausgehend von der Seitenscheibe aus konstruiert werden. Dabei ist jedoch die Fensterrahmendichtung zu beachten, die im CAD-Modell nicht dargestellt wird und zwischen der Außenkante der Scheibe und der Innenfläche des Fensterrahmens circa 2 mm Platz einnimmt.

Der Fensterrahmen wurde mittels Translationen in der Workbench "Generativ Shape Design" erstellt und dann auf eine Wandstärke von 1 mm aufgedickt. Besonders herausfordernd war jedoch die Verengung des Profils an der Schlossseite. Da das Fensterrahmenprofil im Original aus einem Stück gefertigt wurde, ist die Verengung im Profil mittels eines Umformverfahrens erzeugt wurden. Daraus folgend muss die abgewinkelte Profillänge an der Verengung mit dem Rest des Fensterrahmens identisch sein. Die dabei erzeugten Übergangskurven mussten einzeln mittels "*Verbindungskurven*" tangential an die geraden Bereiche des Fensterrahmens konstruiert werden, um einen realen Flächenübergang zu erzeugen.

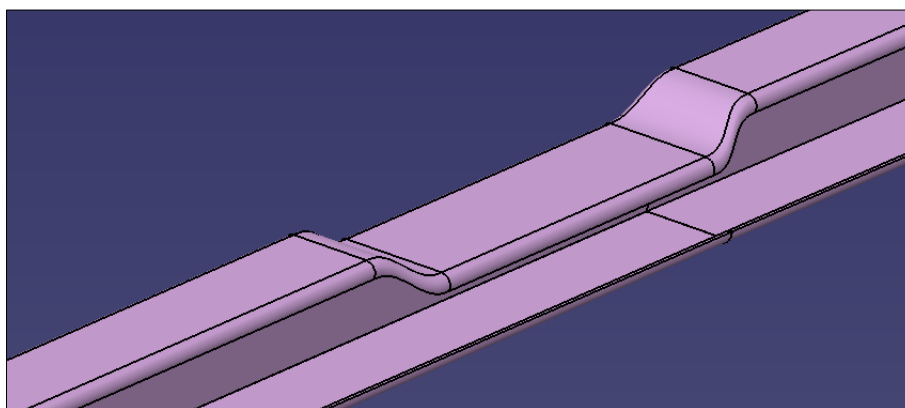


Abbildung 5-16: Verengung des Fensterrahmenprofils an der Schlossseite

Zur Festlegung der Fensterrahmenposition im Gesamtmodell der Mini-Tür wurden anschließend an der Außenhaut wie am Fensterrahmen Fixierpunkte erstellt, mit deren Hilfe dann in der Workbench "Assembly Design" der Fensterrahmen an der Außenhaut positioniert wurde.

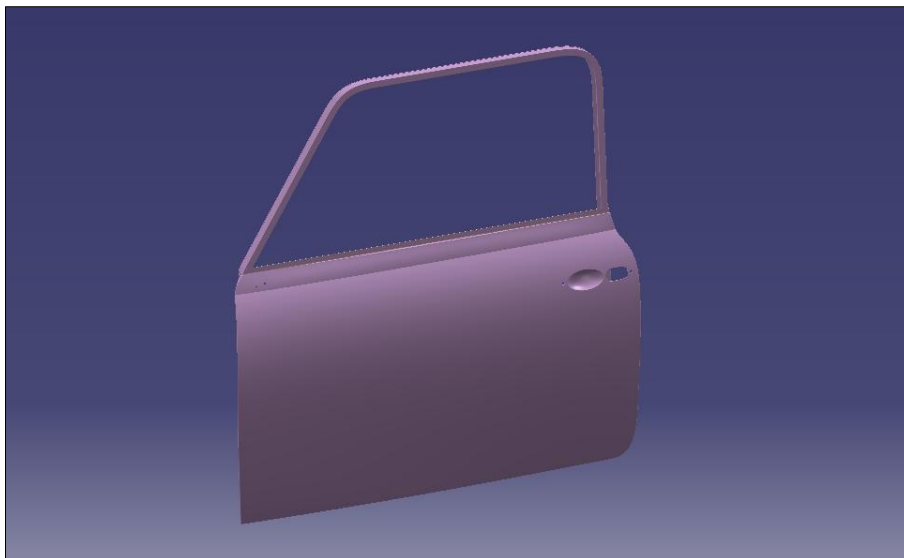


Abbildung 5-17: Fensterrahmen und Außenhaut

5.6. Konstruktion des Innenblechs und Detaillierung

Das Tür-Innenblech dient zur Aufnahme und Befestigung der Türanbau- und Funktionsteile wie Fensterheber, Scharniere, Schloss und Ähnlichem. Im Gegensatz zum Außenblech ist es keine Class A Fläche, da es an der Außenseite von dem Außenblech, an der Innenseite von der Türverkleidung verdeckt wird. Die Form des Türinnenbleches entspricht an ihren Verbindungsflächen dem des Außenblechs. Der Krümmungsverlauf der Hauptfläche für die spätere Aggregataufnahme muss jedoch neu ermittelt werden, da er nicht dem der Außenkontur entspricht.

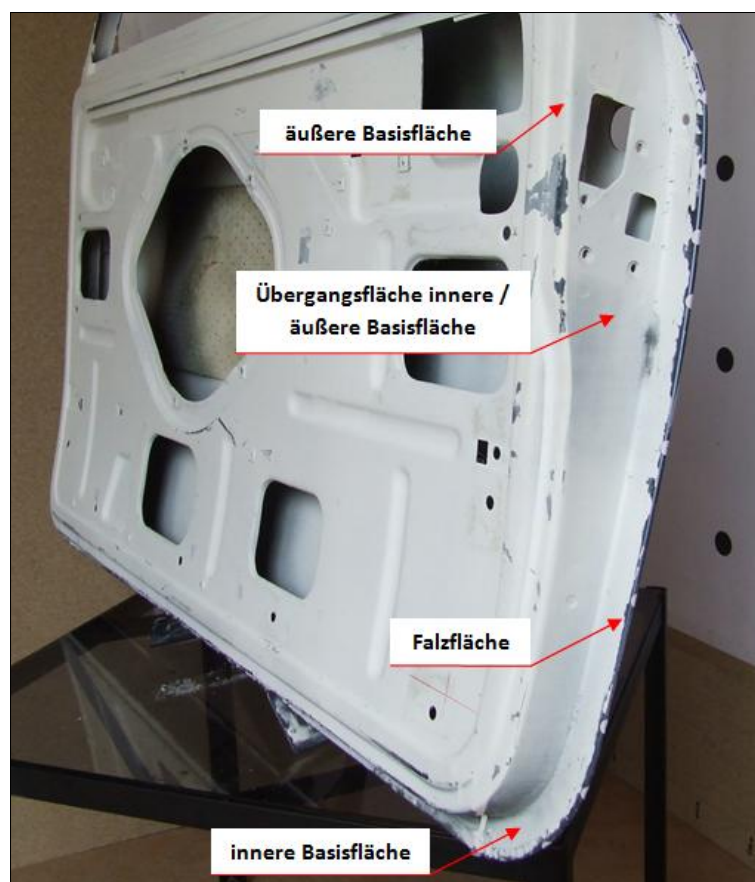


Abbildung 5-18: Flächenbenennung des Innenblechs

5.6.1. Konstruktion der Basisflächen

Nachdem ein neues CATIA-Part erstellt und die Volumenflächen des Außenblechs durch "Einfügen und Verknüpfen" hineinkopiert wurden, werden die Innenflächen mittels eines Offsets von 0 mm als innere Basisfläche abgeleitet. Der nächste Schritt ist die Ermittlung der Kontur der Übergangsfläche zur äußeren Basisfläche. Die Kontur ist an sich kann in den meisten Bereichen als geradlinig angesehen werden, Ausnahmen bilden die Übergänge in den Eckbereichen. Anschließend wurde an ausgewählten Punkten aus der Handvermessung der Außenkontur der Abstand zur Übergangsfläche zwischen Basis- und Höhenfläche gemessen und Linien mit dem jeweiligen Abstand zur Außenkante erzeugt. Zu beachten ist dabei, dass der gemessene Abstand nicht dem Abstand im CAD-Modell entspricht, da die Handmessungspunkte auf dem Falz der Außenfläche liegen. Diese sind jedoch noch nicht in der abgeleiteten Basisfläche enthalten, was damit zur Verringerung des gemessenen Maßes um 1,5 mm führt. Zur Vereinfachung der Konstruktion wurden die Linien auf eine Ebene über der Türfläche projiziert, dort erfolgte dann ihre Bearbeitung. In die Konturlinie wurden anschließend die gemessenen Eckausrundungen eingefügt, anschließend erfolgte eine Rückprojektion auf die innere Basisfläche.

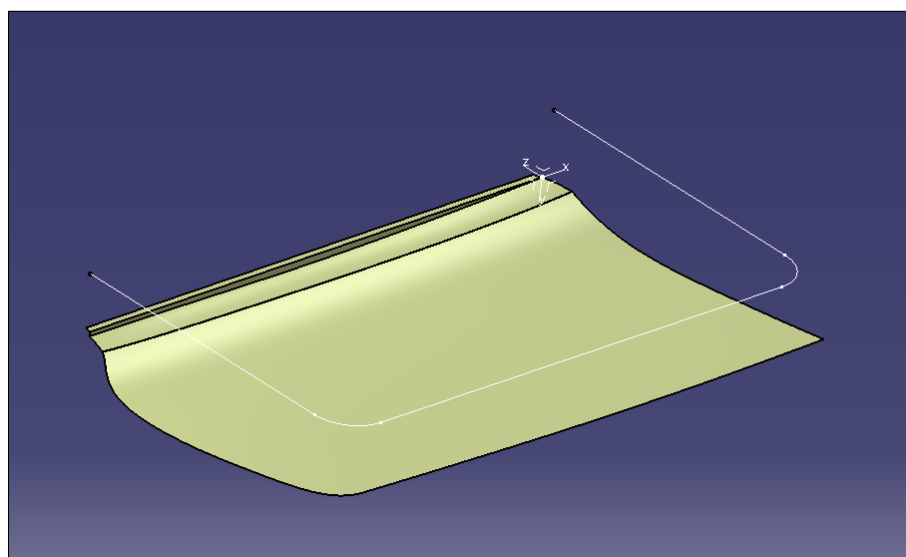


Abbildung 5-19: Konstruktion der Konturlinie der Übergangsfläche

Die Höhe der Übergangsfläche muss nun, ausgehend von den für die Außenkontur festgelegten Handmessungspunkten ermittelt werden. Sie bestimmt gleichzeitig die Kontur der äußeren Basisfläche, jedoch ist dieser Verlauf auf der Schlossseite im Gegensatz zur Scharnierseite der Tür nicht gleichmäßig gekrümmt. Diese Besonderheit im Verlauf der Höhenfläche wird später von der äußeren Basisfläche aus konstruiert. Nach den Erfahrungen, die bei der Erstellung der Türaußenhaut gemacht wurden, ist eine zu hohe

Anzahl von Messpunkten eher hinderlich für die Erstellung einer gleichmäßigen Flächenkontur, da geringe Abweichungen innerhalb der Messungen wellige Kurven ergeben, was eine Nachbearbeitung mit Strak erfordert. Aus diesem Grund wurden die Höhenmaße der Übergangsfläche an ausgewählten Punkten, die gut zu erfassen sind und ausreichend die Kontur beschreiben, an der Außenhaut gemessen. Die dabei gewählten Punkte sind an der Schlossseite die Punkte P9, P12, P14, an der Unterseite der Tür die Punkte P20, P22 und P24 sowie an der Scharnierseite die Punkte P28, P29 und P34. Zusätzlich wurde an der Schlossseite eine Hilfhöhenlinie gegenüberliegend von P34 erstellt, um eine gleichmäßige Fläche zu erzeugen. Anschließend wird die erstellte Fläche durch die Höhenfläche mittels Translationsfläche verbunden und die innere Basisfläche mit der Kontur der Translationsfläche beschnitten.

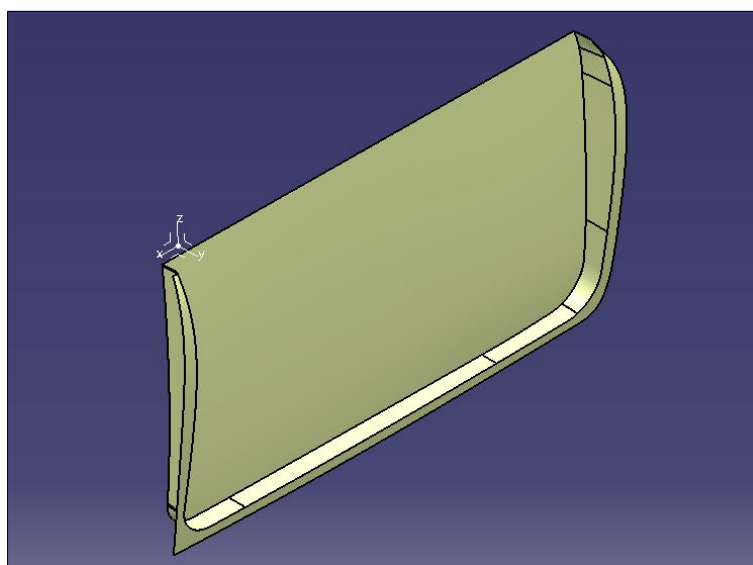


Abbildung 5-20: Grundflächen des Türinnenblechs

Von der äußeren Basisfläche aus umläuft ein erhöhter Teilflächenbereich das Innenblech, er dient als Anschluss und Begrenzung der Türverkleidung. Er wird mittels Offset der äußeren Basisfläche und Beschnitt erzeugt und ebenso mit einer Translationsfläche verbunden. Desweiteren wird die Übergangsfläche an der Schlossseite zwischen innerer und äußerer Basisfläche so beschnitten, das sie dem Verlauf der echten Kontur entspricht. Anhand des bereits konstruierten Außenblechs und des Fensterrahmens wird nun der obere Türbereich, der an die beiden anschließt, konstruiert. Die Konstruktion dieser Flächen erfolgt mittels Teilflächen, die mit der äußeren Basisfläche verbunden werden. Besonders herausfordernd sind dabei die oberen Übergänge an Schloss- und Scharnierseite, da sich dort später die Falze der Außenfläche um 90° drehen und die Flächenübergänge sehr genau konstruiert werden müssen. Im späteren Verlauf der Konstruktion, als die Falzflächen miteinander verbunden wurden, zeigte sich ein sehr guter Falzverlauf an der Schlossseite, die Scharnierseite jedoch war qualitativ weniger gut und musste nachgebessert werden.

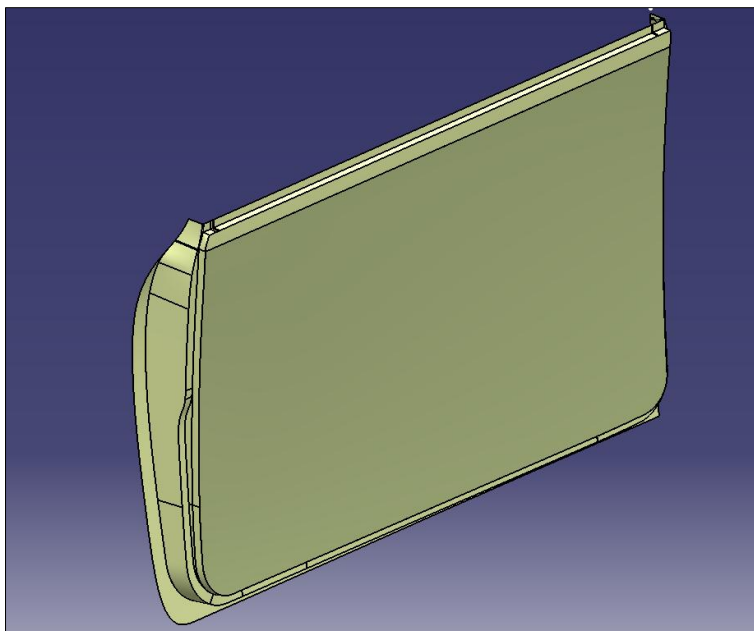


Abbildung 5-21: Türinnenblech vor Erstellung der Aggregataufnahmen

5.6.2. Detaillierung des Innenblechs

Anschließend erfolgt die Detaillierung des Innenblechs. Es wurden nur die wichtigsten Aussparungen, Sicken und Verprägungen konstruiert. Die Aussparungen werden durch Skizzen über der äußeren Basisfläche erstellt, anschließend auf die Fläche projiziert, mit ihr verschnitten und ihre Kanten verrundet. Sicken werden anhand von zwei Skizzen erstellt. Die erste Skizze beschreibt die äußere Kontur der Sicke, sie wird auf das Blech projiziert und mit ihm verschnitten. Die zweite Skizze beschreibt die Innenfläche der Sicke, sie wird mittels Offset in den geforderten Abstand zur Außenkontur der Sicke gebracht. Abschließend wird die umlaufende Verbindungsfläche mittels Translation erzeugt und äußere und innere Kante verrundet (Abbildung 5-22).

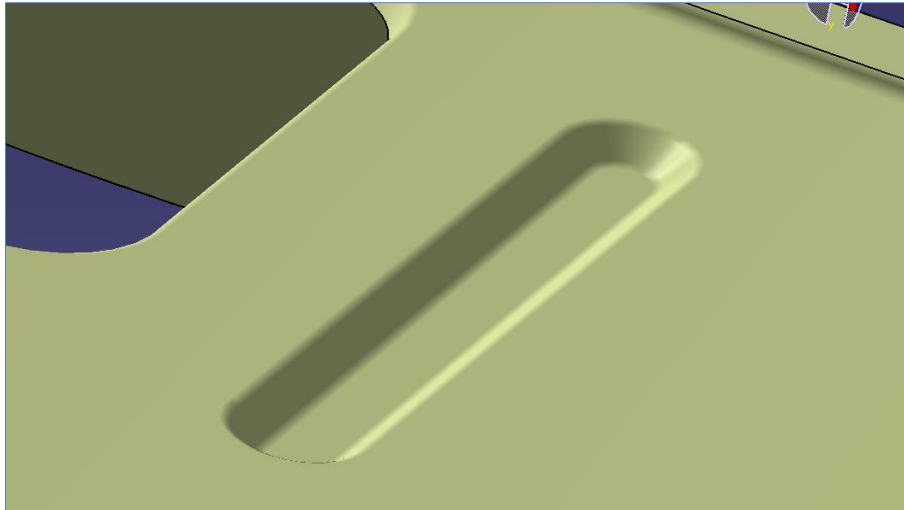


Abbildung 5-22: Sicke im Innenblech

Die Konstruktion der Verprägung für den Fensterheber musste leicht vereinfacht werden. An der Originaltür ist die Verprägung an einigen Stellen unterschiedlich tief, für das CAD-Modell wurde nur ein Tiefenmaß verwendet. Sie wurde ebenfalls mittels 2 Skizzen, jeweils für die Innen- und Außenkontur, über der äußeren Basisfläche erstellt und auf diese projiziert (Abbildung 5-23).

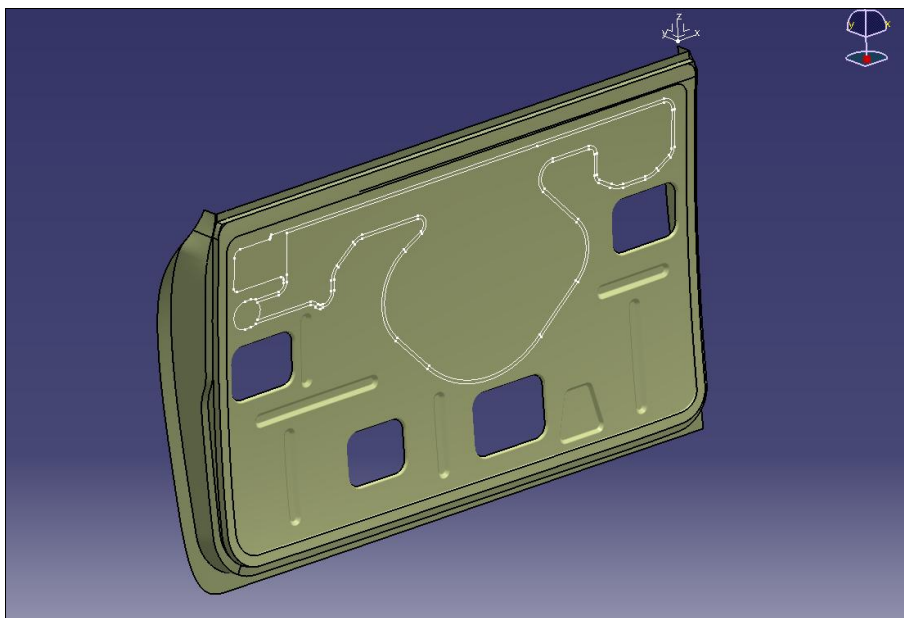


Abbildung 5-23: Skizzen der Verprägung am Innenblech

Die äußere Skizze trennt nun das Innenblech, die innere Skizze wiederum wird als Fläche mittels Offset in den gewünschten Abstand zur äußeren Skizze gebracht. Da die Geometrie der Fläche komplex ist, muss anschließend eine Leitkurve am Boden der Verprägung für die folgende Flächentranslation für die Verbindungsfläche erzeugt werden. Die Translation erfolgt dann mittels zweier Führungskurven, wobei die erstellte Leitkurve sowie die äußere Kante der Basisfläche als Führungskurven dienen. Die Kanten der Verbindungsfläche werden anschließend mit der Boden- und Basisfläche verrundet, die Bodenfläche der Verprägung wird zum Abschluss noch für die Aufnahme des Fensterhebers beschnitten.

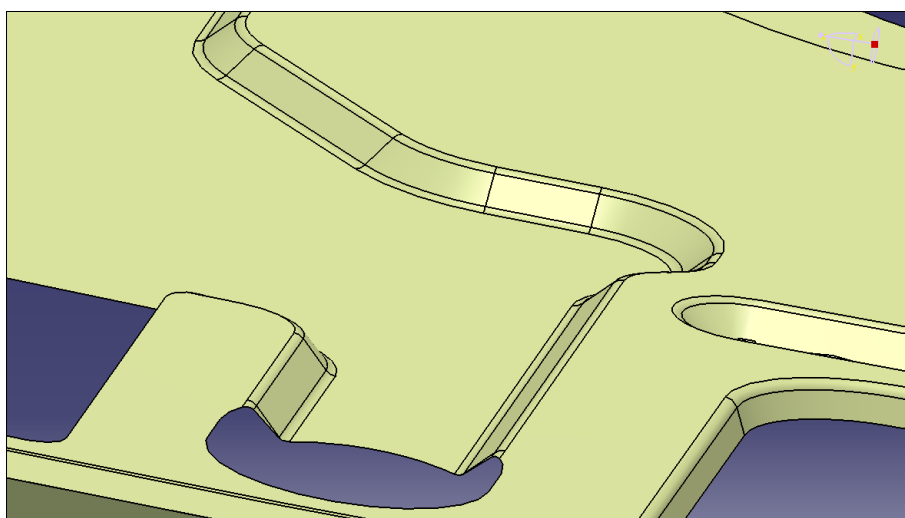


Abbildung 5-24: Verprägung mit Kantenverrundung am Innenblech

Nach Fertigstellung der Aggregataufnahmen am Innenblech mussten die Flächenübergänge auf der Oberseite des Innenblechs teilweise neu gestaltet werden, da erst jetzt die endgültigen Formen der Anschlussflächen festgelegt sind. Anschließend wurden die erstellten Innenblechflächen aufgedickt und noch nicht integrierte Flächenbereiche mittels Boolescher Operatoren zusammengefügt.

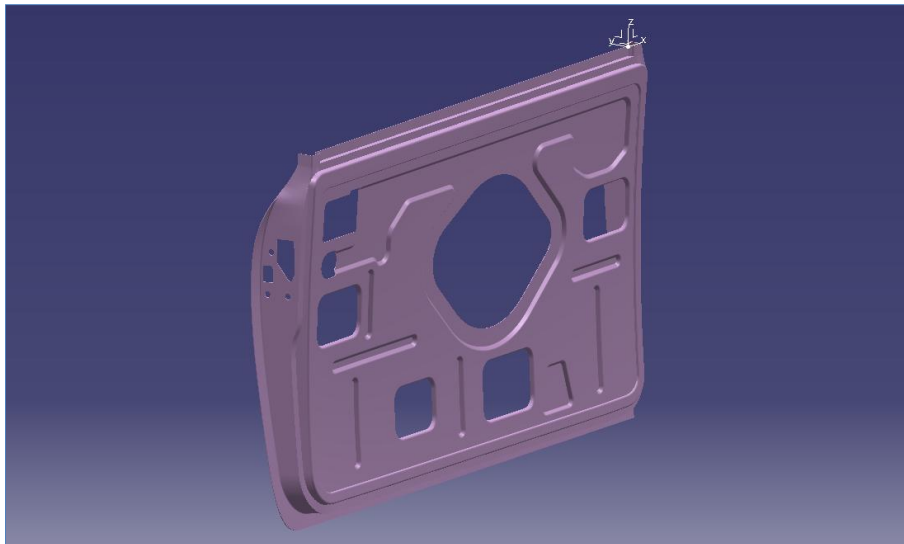


Abbildung 5-25: Innenblech mit Türschlossausparungen

Auf den Seitenflächen des Innenblechs sind Ausparungen sowie Verstärkungen für die Schloss- und Scharnieranbauteile angebracht. Die Ausparungen für das Türschloss wurden mit Hilfe von Skizzen und Extrusionsflächen miteinander verschnitten. An der Innenseite des Blechs ist ein Verstärkungsblech mit einer Stärke von 2 mm angebracht. Es wird mittels Offsetflächen an der Innenseite erstellt, seine Detaillierung und Beschnittkurven wurden im Sketcher erzeugt.

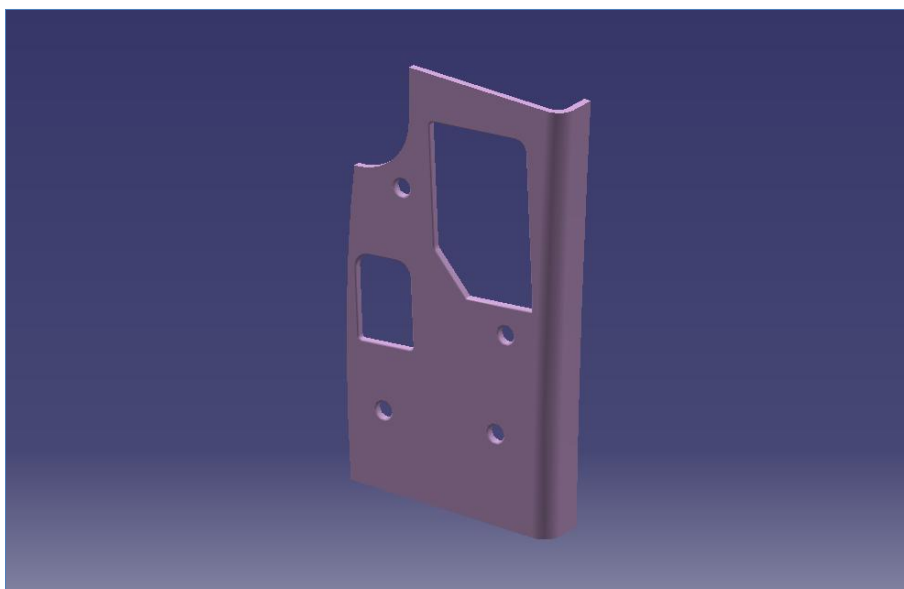


Abbildung 5-26: Verstärkungsblech für Türschlossanbauteile

An der Scharnierseite verläuft ebenfalls ein 2 mm dickes Verstärkungsblech, um die Steifigkeit der Tür auf der Scharnierseite zu erhöhen. Dies ist nötig, um eine feste Scharnieranbindung ohne Beschädigung des Innenblechs zu gewährleisten, die Scharnierschrauben wiederum werden von kleinen Platten mit Gewindelöchern, die auf dem Verstärkungsblech liegen, verbunden. Im Gegensatz zur Schlossseite des Innenblechs wurde nur das Verstärkungsblech sowie die Aussparung für den Türanschlag konstruiert, die Scharniere sowie ihre Schraubenlöcher wurden nicht dargestellt. Die Konstruktion erfolgt analog zur Verstärkung auf der Schlossseite. Da die Verstärkungsbleche durch Schweißpunkte fest mit dem Innenblech verbunden sind, werden sie anschließend mit den Booleschen Operatoren zu einem Bauteil zusammengefügt.

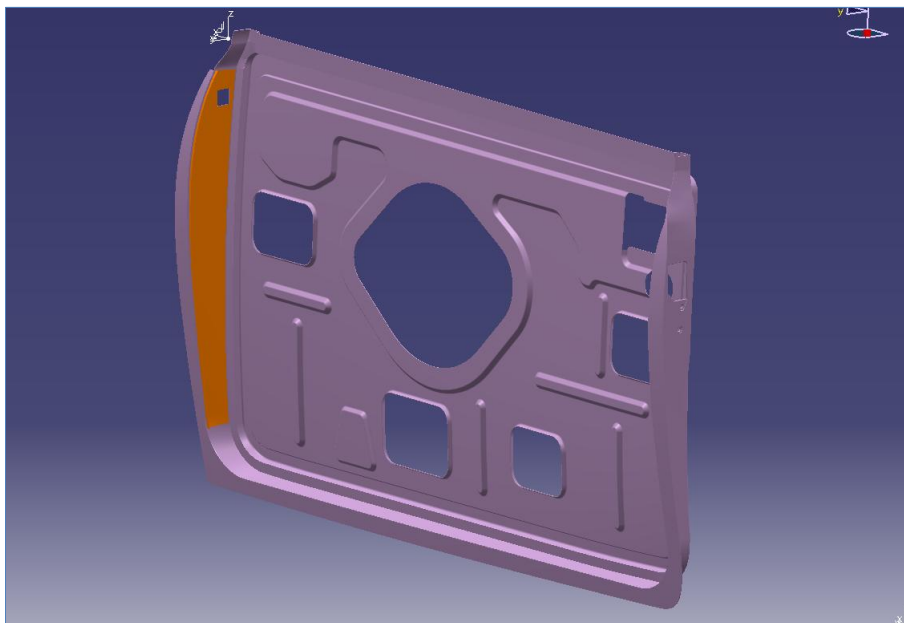


Abbildung 5-27: Verstärkungsblech an der Scharnierseite

5.6.3. Detaillierung der Außenhaut

Nach Fertigstellung des Innenbleches sind nun die Verbindungsflächen für die Falzflächen im oberen Bereich der Tür vorhanden. Diese werden in der Arbeitsumgebung "Assembly Design" anhand der Innenblechflächen erstellt. Die Konstruktion dieser Flächen gestaltete sich teilweise schwierig und wurde über Offsetflächen sowie Translationen erzeugt. Sie sind teilweise etwas vereinfacht, nach Möglichkeit aber tangentialstetig untereinander verbunden. Abbildung 5-28 zeigt den Falzübergang an der Schlossseite.

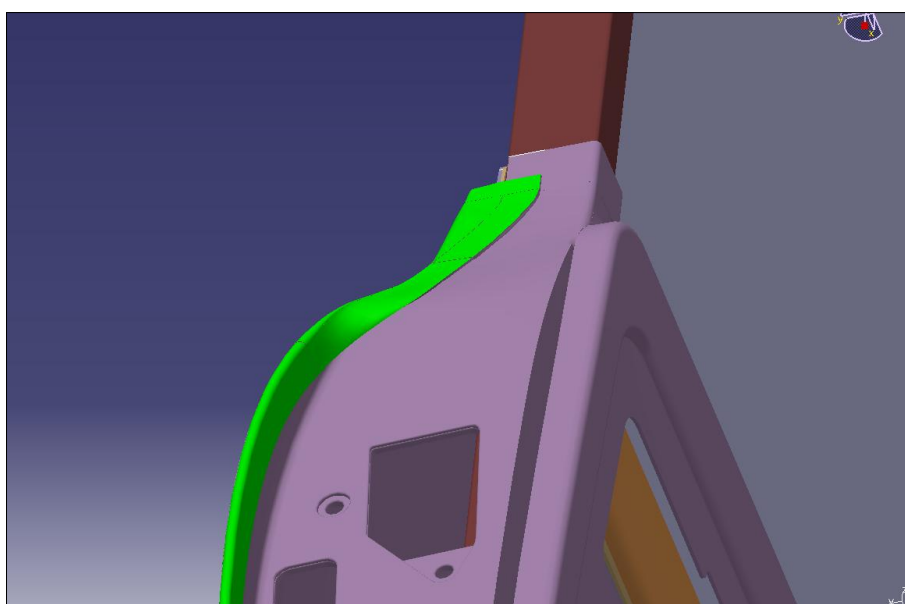


Abbildung 5-28: oberer Falzübergang an der Schlossseite

Desweiteren sind an der Außenhaut eine Vertiefung für die Benutzung des Türgriffs sowie Aussparungen für Befestigung und Mechanik angebracht. Die Aussparungen wurden mittels Skizzierer und Extrusionsflächen in die Außenhaut konstruiert. Die Vertiefung ist ellipsenförmig, an ihre Scheitelpunkte wurden vom Zentrum der Vertiefung ausgehend krümmungsstetige Verbindungskurven erstellt, die die Vertiefung in vier Bereiche unterteilt. Anschließend wurde mittels "Füllen" und den an die Kurven angrenzenden Flächen als Stützelemente die Vertiefungsfläche erstellt (Abbildung 5-29).

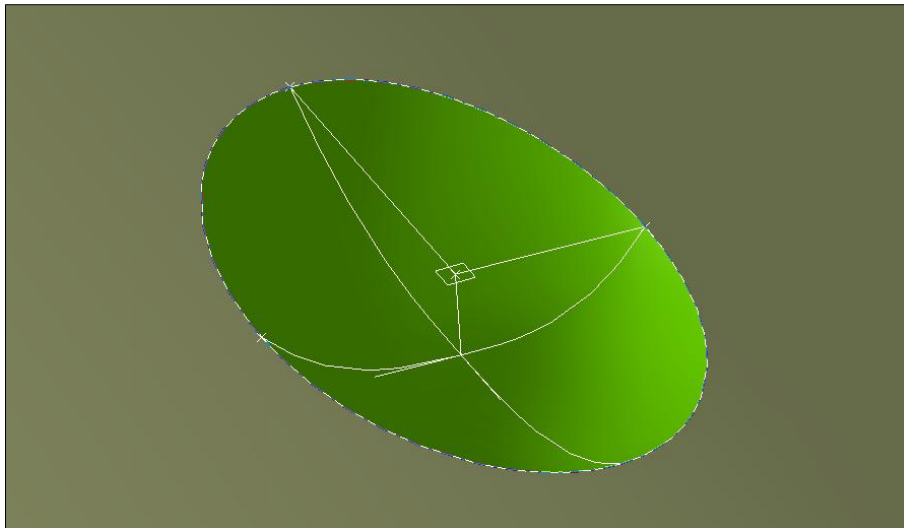


Abbildung 5-29: Konstruktionsgeometrie für die Vertiefung der Außenhaut für den Türgriff

Die Vertiefungsfläche wird anschließend zum Blech aufgedickt und mittels Boolescher Operatoren mit der Außenhaut verbunden. Das Erstellen von Kantenverrundungen schließt die Flächenbearbeitung für die Anschlusselemente des Türgriffs ab.

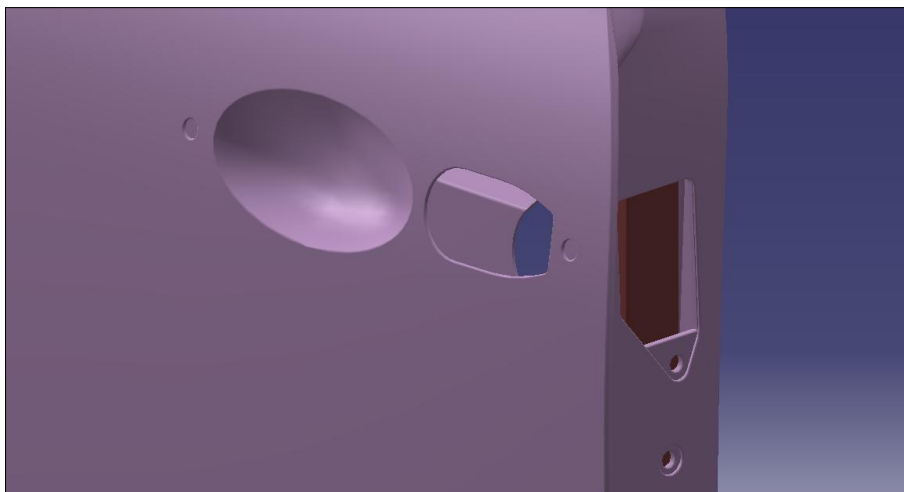


Abbildung 5-30: Detaillierte Außenhaut im Bereich des Türgriffs

Letztes zu modellierendes Detail der Außenhaut sind die Löcher für die Spiegelbefestigung. Hier ist zu beachten, dass die Löcher mit denen im Verstärkungsblech für die Spiegelbefestigung übereinstimmen.

5.7. Im CAD-Modell vereinfachte Bereiche

Einige Bereiche der Tür wurden nicht oder nur teilweise modelliert. So sind zum Beispiel die Türfalze am Außenblech nur im geschlossenen Zustand konstruiert worden, bei der Neuentwicklung von Blechteilen mit Falzverbindung würde zusätzlich noch der offene Zustand dargestellt werden. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit, die genaue Tiefziehrichtung des Original-Innenbleches zu bestimmen, wurde von einer Tiefziehrichtung entlang der Y-Richtung des Ursprungskoordinatensystems ausgegangen. Desweiteren besitzen einige Aussparungen im Innenblech verschiedene Tiefen, vor allem im Bereich des Fensterhebers, diese wurden dahingehend vereinfacht das in an diesen Stellen nur ein Tiefenmaß benutzt wurde. Entlang der Oberkante des Innenblechs, verläuft eine Halterung für die Türverkleidung, diese wurde ebenfalls nicht dargestellt. Desweiteren wurde auf eine Darstellung nachträglich angebrachter Bohrungen für eine bessere Befestigung der Türverkleidung, auf den Fensterheber sowie seiner Befestigungslöcher verzichtet. Von den Türscharnieren sind nur ihre Auflageflächen erzeugt wurden.

5.8. Festlegung der Scheibenpositionen

Für die nachfolgenden Untersuchungen der Scheibenführung muss die Scheibenposition im Fensterrahmen dem Original entsprechend festgelegt werden. Die Lage der Scheibe ist nicht mittig im Fensterrahmenprofil, sondern verläuft nahe an der Außenseite der Tür. Abbildung 5-31 zeigt ihre Lage anhand eines Schnittes bei $X = -600$ mm.

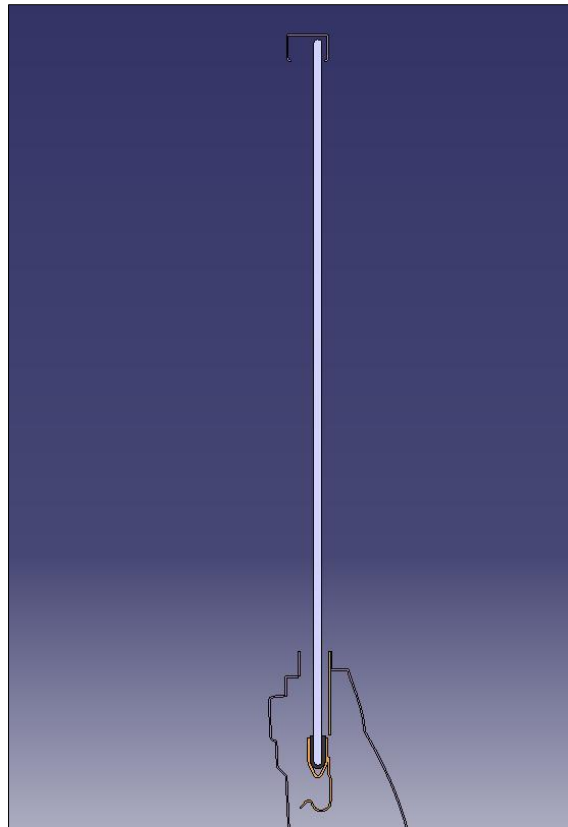


Abbildung 5-31: Lage der Scheibe im Fensterrahmen

Mittels Hilfsgeometrie wird die Scheibe in ihrer Y-Lage festgelegt, anschließend muss ihre z-Position für die Zustände "Scheibe auf" sowie "Scheibe zu" bestimmt werden. Dies wird im CAD-Modell durch eine Gerade, die von der Unterkante des Fensterrahmens und der Unterkante der Scheibe ausgehend in Z-Richtung läuft, bewerkstelligt. Beim Zustand "Scheibe auf" beträgt ihre Länge 1 mm, bei geschlossener Scheibe 364 mm, zusätzlich sind alle weiteren Öffnungszustände dazwischen einstellbar (Abbildung 5-32).

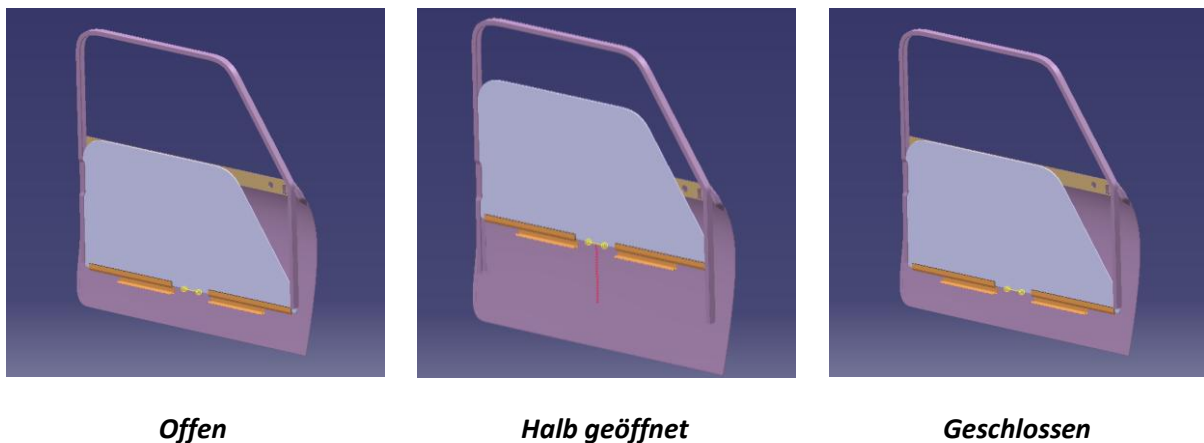


Abbildung 5-32: Scheibenzustände im CAD-Modell

5.9 Fazit

Die Nachkonstruktion der Austin Mini Tür in CATIA V5 war teilweise schwierig, da die Punktwolken aus der Oberflächenerfassung durch David-Laserscanner nur bedingt genutzt werden konnten. Mithilfe der von Hand gemessenen Konturpunkte sowie eines Straks der Außenhaut konnte die Tür jedoch gut nachkonstruiert werden, wobei das Innenblech eine besondere Herausforderung aufgrund seines komplexen Aufbaus war. Hier mussten mehrere Herangehensweisen an die Konstruktion ausprobiert werden. Da der Zeitrahmen zum Erstellen des CAD-Modells der Tür nur begrenzt war, konnte sie nicht in allen Details dargestellt werden, die vereinfachten Bereiche haben jedoch nur einen sehr kleinen Einfluss auf das Strukturverhalten der Tür. Da keinerlei CAD-Daten des Austin Mini existieren ist dieser Datensatz eine gute Ausgangsbasis für spätere Projekte und Untersuchungen im Bereich der Seitentüren. Leider hat CATIA in der Version R16 willkürlich auftretende Darstellungsfehler nach Verwendung der Booleschen Operatoren, in späteren CATIA V5 Versionen treten diese Fehler nicht mehr auf. Diese Fehler können kurzzeitig mittels kleiner Veränderung der Werte für die 3D-Genauigkeit unter *Tools -> Optionen -> Allgemein -> Anzeige* behoben werden.

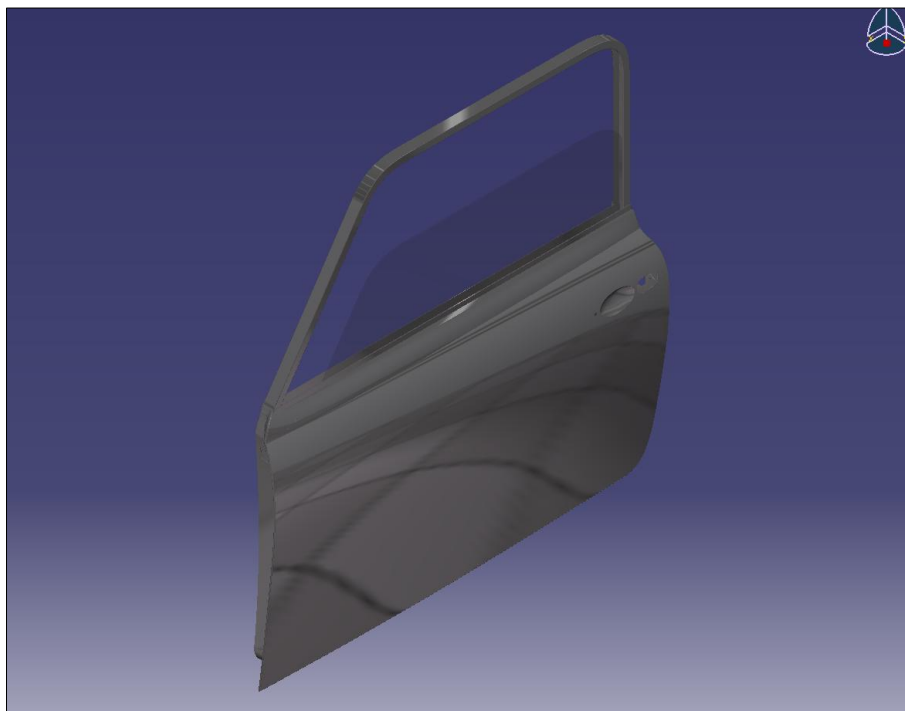


Abbildung 5-33: CAD-Modell der Austin Mini Seitentür

6. Konstruktive Veränderung zur rahmenlosen Tür

6.1. Allgemeine Anforderungen an rahmenlose Türen

Unter rahmenlosen Türen versteht man Fahrzeugtüren, die keinen oder nur noch einen Teil des Fensterrahmens besitzen. Dies ist teilweise notwendig zur Umsetzung der Designvorgaben für Fahrzeugklassen wie Cabriolets, Roadster, Speedster oder Coupés. Da die meisten dieser Fahrzeugklassen von Großserienfahrzeugen abgeleitet werden, wird versucht, so viele Bereiche wie möglich von den Rahmentüren der Basisfahrzeuge zu übernehmen. Dabei werden die Fensterrahmen abgetrennt und der Türrohbau mit Verstärkungsblechen versehen. Fensterheber, Fensterführungen und Dichtungsumfang müssen jedoch in den meisten Fällen neu entwickelt werden. Es jedoch nicht immer möglich die Basistüren zu verwenden, da zum Beispiel Coupés in der Regel größere Türlängen als Limousinen besitzen oder keine Basistüren verfügbar sind aufgrund einer Sonderanfertigung oder Kleinserie des Ausgangsmodells.

Folgende Kriterien müssen bei der Konstruktion einer rahmenlosen Tür für Cabriolets beachtet werden:

- ***höhere Belastungen im Crash durch größere Türlängen und fehlende Dachstruktur und B-Säule***

Mithilfe von FEM-Berechnungen wird das Verhalten der rahmenlosen Tür für Seiten- sowie Frontcrash und Missbrauchsfälle durch den Anwender untersucht. Für den Fall des Seitencrash müssen Seitenaufprallträger, Verstärkungen im Türschacht wie auch für den Türboden entwickelt werden. Beim Frontcrash müssen die wirkenden Kräfte auf die A-Säule durch die Tür gleichmäßig in die Seitenwände weitergeleitet werden. Zusätzlich müssen die Missbrauchsfälle "Türüberdrückung", bei dem die Tür bis zum Anschlag geöffnet und dann mit Kraft weitergedrückt wird, sowie "Türabsenkung", bei welcher ein Mensch sich bei geöffneter Tür mit seinem ganzen Gewicht auf den Türschacht lehnt, simuliert werden.

- ***größere Toleranzen durch Karosserieaufbau und bewegliches Verdeck***

Durch den Wegfall des Daches verliert ein Fahrzeug bis zu 85 % seiner Torsionssteifigkeit, was über Schweller- und Längsträgerversteifungen sowie geänderten Säulenverbindungen ausgeglichen werden muss. Desweiteren muss die Fensterscheibe durch die freistehende A-Säule und dem beweglichen Verdeck größere Toleranzen ausgleichen, damit eine Wasser- und Geräuschdichtigkeit auch bei höheren Geschwindigkeiten gegeben ist.

- ***freistehende, rahmenlose Scheiben führen zu speziellen Fensterhebern und Fensterführungen***

Die Seitenscheibe muss die auf sie wirkenden Kräfte, bedingt durch den Wegfall des Fensterrahmens, an den Fensterheber und von dort weiter in die Tür übertragen. Das erfordert eine besondere Auslegung des Fensterhebers, der zusätzlich noch im Gegensatz zur Rahmentür oftmals eine größere und dickere Scheibe aufnehmen muss. Da die Scheibe mit einer höheren Vorspannung als üblich eingebaut wird sind zusätzlich höhere Reibungskräfte zu erwarten, auch treten häufigere Lastwechselzahlen am Fensterheber auf durch das nötige Öffnen der Scheibe vor der Verdeckbetätigung sowie eine mögliche Kurzhubabsenkung.

- **besonderer Dichtungsaufbau**

Die Scheibe umgebende Dichtungen müssen für rahmenlose Türen aufgrund der auftretenden Toleranzen neu entwickelt werden. Durch die Vorspannung der Scheibe werden die Dichtungen besonders stark belastet. Diese Vorspannung ist nötig, damit die Scheibe trotz der auftretenden Sogkräfte des Fahrtwindes, welche die Scheibe nach außen drücken, weiter innerhalb der Dachrahmendichtung bleibt. Ebenso müssen die Verdeckdichtungen, die A-Säulendichtung, Schachtleisten und Übergangsstücke überarbeitet werden. (vgl. Jäger, 1999)

6.2. Übertragene Anforderungen an die Austin Mini Tür

Im Zuge der Veränderung zur rahmenlosen Tür des Austin Mini müssen verschiedene Aspekte betrachtet werden, die durch das Abtrennen des Fensterrahmens auftreten und im zeitlichen Rahmen dieser Diplomarbeit betrachtet werden können. So ist das Unfallverhalten der Tür im Rahmen eines Seitlichen- oder Frontal-Offsetcrashes aufgrund der fehlenden CAD-Daten des Austin Mini nur sehr schwer abzuschätzen. Reproduzierbare Verbesserungen in diesem Bereich können nur anhand eines vollständigen Datensatzes der Karosserie zur Untersuchung in LS-DYNA oder ähnlichen Crash-Simulationsprogrammen erfolgen. Diese Maßnahmen wären jedoch nur im Falle einer Neuauflage der Serienproduktion des Mini nötig, da diese aufgrund des Alters der Fahrzeuge nicht unter die derzeitigen strengen gesetzlichen Auflagen im Bereich der passiven Sicherheit in den USA und der EU fallen. Zum Dichtungsverhalten der Tür lassen sich ebenso nur ungenaue Aussagen treffen aufgrund der hohen Anzahl von Verdeckherstellern weltweit, die Modelle für den Austin Mini produzieren. Auch stellt sich hier die Frage nach der Verhältnismäßigkeit des Aufwandes für ein ideales Abdichtverhalten, da davon auszugehen ist, dass der Besitzer eines umgebauten Austin Mini sein Fahrzeug nicht in der Waschanlage wäscht oder es dauerhaft bei schlechtem Wetter fährt. Bekannte Probleme, wie die Rissneigung des Bleches am vorderen Fensterrahmen oder eine ungenügende Scheibenführung nach Abtrennen des Fensterrahmens, sollten von daher mit größerer Priorität angegangen werden.

6.3. Veränderung zur rahmenlosen Tür

6.3.1. Beschnitt des Fensterrahmens

Vor der Veränderung zur rahmenlosen Tür sollte ein neues CATIA Produkt erstellt werden, in dem alle konstruktiven Veränderungen gespeichert werden. Am einfachsten geschieht dies mit der Sicherungsverwaltung und einem neuem Speicherordner. Es ist ebenso sinnvoll die einzelnen Parts in der Benennung mit einer Erweiterung zu versehen, um eine ungewollte Überspeicherung der Ausgangsdaten seitens CATIA zu vermeiden. Anschließend wird der vordere Fensterrahmen-Abschnitt bei $X = -290$ mm mittels einer Extrusionsfläche abgeschnitten. Der Schnittpunkt ist so gewählt, dass ein guter optischer Verlauf mit der Dachrahmenkante im Bezug zum Frontfensters erzeugt wird. Da die Tür-Spaltmaße und damit die Position der Tür bei allen Austin Mini an den einzelnen Seiten teilweise extrem schwanken, sollte dieser Beschnitt jedoch bei jedem Fahrzeug individuell angepasst werden. Der hintere Fensterrahmen wird so abgetrennt, das seine Kante mit den obersten Kanten des Außen- und Innenblechs abschließt.

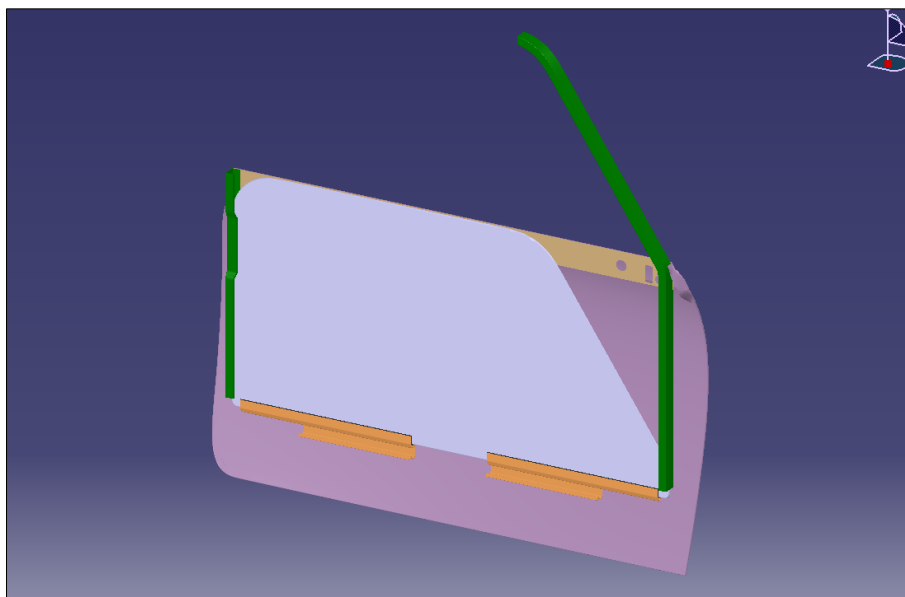


Abbildung 6-1: Fensterrahmen rahmenlose Tür

6.3.2. Untersuchung im CATIA FEM-Modul

Durch das Zertrennen des Fensterrahmens ändert sich nun das strukturelle Verhalten des Rahmens grundlegend. Während das hintere Teilstück weiterhin fest im Inneren der Tür verankert ist und keine äußeren Kräfte direkt darauf wirken können, ist das vordere, aus der Fahrzeugtür herauslaufende Teilstück diesen nun besonders ausgesetzt. Interessant ist der Steifigkeitsverlust des beschnittenen Rahmens im Vergleich zum Originalrahmen, weshalb beide einer FEM-Untersuchung unterzogen werden.

Dazu bietet CATIA die Workbench "Generative Structural Analysis" (GSA), welche mit dem "ELFINI Solver" arbeitet. Dieser legt der Berechnung ein linear-elastisches Werkstoffverhalten zugrunde, welches den Nachteil hat, "dass auch nach Überschreiten der Streckgrenze der Solver weiterhin nach der Steigung des Elastizitätsmoduls rechnet, ohne den in der Realität auftretenden Fließbereich zu berücksichtigen. Er folgt damit nicht dem Spannungs-Dehnungs-Verhalten der technischen Werkstoffe, was dazu führt das Spannungen ausgewiesen werden können, die in der Realität längst zum Bruch des Werkstoffes geführt hätten. Deshalb ist es nötig, die erhaltenen Spannungen während der Analyse mit der Streckgrenze R_e des verwendeten Werkstoffes zu vergleichen." (vgl. Koehldorfer, 2010, S. 37)

Zusätzlich beinhaltet CATIA V5 noch die Workbench "Advanced Meshing Tools", welche eine sehr individuelle manuelle Vernetzung des Bauteils gestattet und besonders für Anwendungsfälle bei parametrisch-assoziativen Bauteilen gedacht ist.

Um den Steifigkeitsverlust zu ermitteln, werden der Ausgangsfensterrahmen sowie der beschnittene Fensterrahmen mit einer Flächenlast in negativer Z-Richtung belastet. Da die Kräfte nicht bekannt sind, die im Fahrbetrieb auf den Fensterrahmen einwirken, wird ein Missbrauchsfall getestet, in dem ein Mensch sich mit vollem Gewicht mittels der Hand auf dem Fensterrahmen stützt. Als Gewicht wird ein verhältnismäßig schwerer Mensch mit einem Gewicht von 100 kg angenommen, als durchschnittliche Handbreite wird von 80 mm ausgegangen. Die Belastungsflächen müssen für die FEM-Rechnung erzeugt werden und auf beiden Rahmen identisch sein um vergleichbare Werte zu erzielen, dabei gilt als Auflagefläche die äußere Rahmenfläche. Die Flächenlast selbst errechnet sich aus der Kraft pro Fläche:

$$F_{\text{Flächenlast}} = \frac{m * g}{a * b} = \frac{100 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2}{23 \text{ mm} * 80 \text{ mm}} = 0,53 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Um den Rechenaufwand zu verringern ist es ausreichend den Fensterrahmen ohne Außen- und Innenblech zu untersuchen. Desweiteren muss die Berechnung mit Hilfe von

dünnwandigen Schalenelementen erfolgen, "da eine Berechnung mittels Tetraederelementen aufgrund mathematischer Grenzen zu sehr ungenauen Ergebnissen führt. Es kommt aufgrund der Dünnwandigkeit und der Tatsache, dass nach Möglichkeit mit gleichseitigen Elementen gerechnet werden soll, zu einer starken Verzerrung der Tetraederelemente. Dies führt wiederum zu einer unzulässigen Versteifung der Geometrie, da sich die Volumenelemente nicht entsprechend an die Bauteiloberfläche anpassen können. Daher empfiehlt sich eine zweidimensionale Vernetzung mit dreieckigen oder rechteckigen Schalenelementen." (Koehldorfer, 2011, S. 171)

Da die Berechnung über Schalenelemente mittels Flächen erfolgt, müssen diese Flächen wieder aus den mit Aufmaß versehenen Fensterrahmen abgeleitet werden. Bei der Flächenableitung ist zu beachten, dass die Dicken der Flächen im FEM-Modul von der Mittenebene des Bauteils aus festgelegt werden. Zusätzlich müssen alle Flächen als eine Fläche zusammengefügt werden, um eine spätere Vernetzung zu ermöglichen. Bei der hier vorliegenden Untersuchung der beiden Fensterrahmen reicht eine Flächenableitung bis zu den Verbindungsflächen zum Außen- und Innenblech aus, da die Rahmen an diesen Stellen fest eingespannt werden. Nachdem der Werkstoff "Stahl" dem geometrischen Set zugeordnet ist, wird die Workbench "Generative Structural Analysis" gestartet. Die erscheinende Fehlermeldung, dass der Hauptkörper leer ist kann ignoriert werden, da die Volumenkörper in geometrischen Sets erstellt wurden. Desweiteren erfolgt die Berechnung aus oben genannten Gründen nicht über Volumenkörper.

Als erster Schritt erfolgt die Vernetzung des Flächenmodells mittels "OCTREE-Dreiecksvernetzung" und der Auswahl "Parabolische Elemente". Hier wird für ersten Proberechnungen eine relativ große Elementgröße gewählt um die Richtigkeit der vorgegebenen Randbedingungen abzuschätzen, für die Hauptrechnung wird in der Regel eine Elementgröße gewählt, die dem der anderthalbfachen Elementdicke des Bauteils entspricht. Anschließend erfolgt die Zuordnung der 2D-Eigenschaft für das erzeugte FEM-Netz, hier wird eine Bauteildicke von 1 mm festgelegt. Anschließend müssen die Randbedingungen festgelegt werden. Der geschlossene Fensterrahmen ist an zwei Stellen eingespannt, die jeweiligen zugehörigen Flächen müssen mit dem Befehl "*Einspannung*" zugeordnet werden. Die Auswirkung der Erdanziehungskraft muss ebenso im globalen Koordinatensystem berücksichtigt werden, sie wird mittels "*Beschleunigung*" mit $-9,81 \text{ m/s}^2$ in Z-Richtung angegeben.

Um eine Aussage über die Qualität der Berechnung zu erhalten, sollte desweiteren ein globaler Sensor mit der Anzeige des globalen Fehlergrades eingefügt werden. Dabei ist ein globaler Fehlergrad von 10 % ausreichend für abschätzende Berechnungen, ein Wert kleiner 5 % ergibt der Realität sehr nahe kommende Ergebnisse.

Nachdem die Proberechnungen erfolgreich waren wurden mit einer Elementgröße von 1,5 mm die Rahmen berechnet, was folgende Ergebnisse ergab:

Ausgangsrahmen

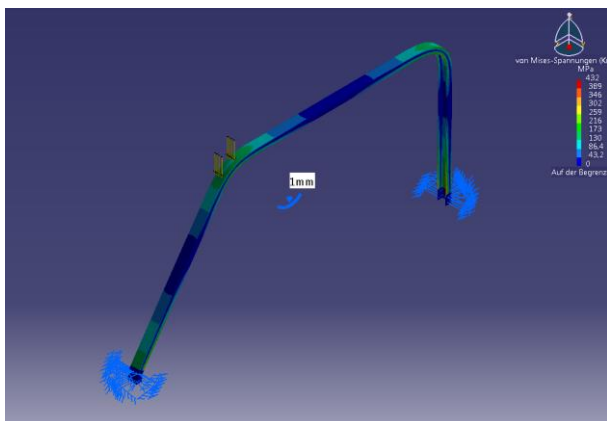


Abbildung 6-2: Spannungen am Ausgangsfensterrahmen

- *Globaler Fehlerwert: 2,88 %*
- *Maximale von Mises-Spannung an der Krafteinleitungsfläche: 302 MPa*
- *Maximale von Mises-Spannung an den Einspannungen: 432 MPa*

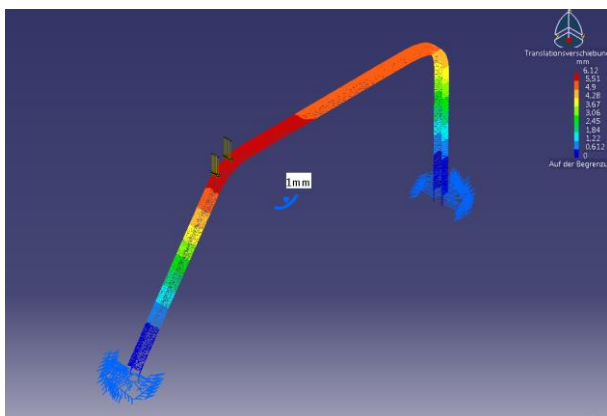


Abbildung 6-3: Verschiebungen am Ausgangsfensterrahmen

- *maximale Verschiebung: 6,12 mm*

Beim Ausgangsrahmen ist die von Mises-Spannung besonders an den Einspannungen kritisch. Das Maximum liegt an der hinteren Einspannung mit 432 MPa im Bereich der Profilendkanten, die Flächen des Fensterrahmens selbst sind im Schnitt mit 173 MPa belastet. Die verwendete Stahlsorte des Fensterrahmens ist nicht bekannt, da das Fahrzeug jedoch älterer Bauart ist kann man Festigkeitswerte im Bereich zwischen 200 - 300 MPa annehmen. Anhand dieser Annahme ist von einem Einreißen des Fensterrahmens an den Profilenden auszugehen, am Ort der Flächenkrafteinleitung sind die von Mises-Spannungen noch im vertretbaren Rahmen. Die maximale Verschiebung von 6,12 mm an der Krafteinleitungsfläche wurde so erwartet und ein realistischer Wert.

Am beschnittenem Fensterrahmen wird nur das vordere Teilstück untersucht, da es nun allein die einwirkenden Kräfte aufnehmen muss.

Beschnittener Rahmen

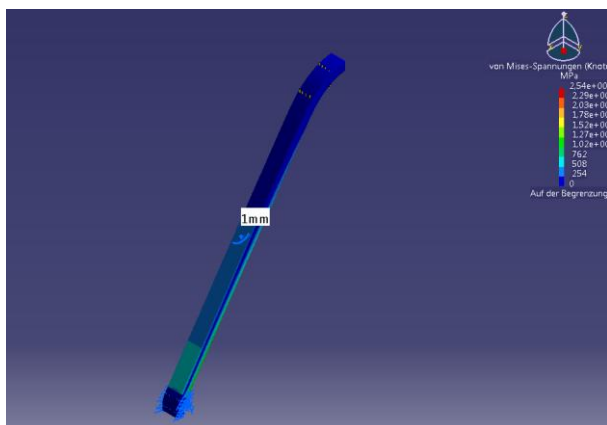


Abbildung 6-4: Spannungen am beschnittenen Rahmen

- *Globaler Fehlerwert: 2,87 %*
- *Maximale von Mises-Spannung an der Krafteinleitungsfläche: 100 - 150 MPa*
- *Maximale von Mises-Spannung an den Einspannungen: 2539 MPa*

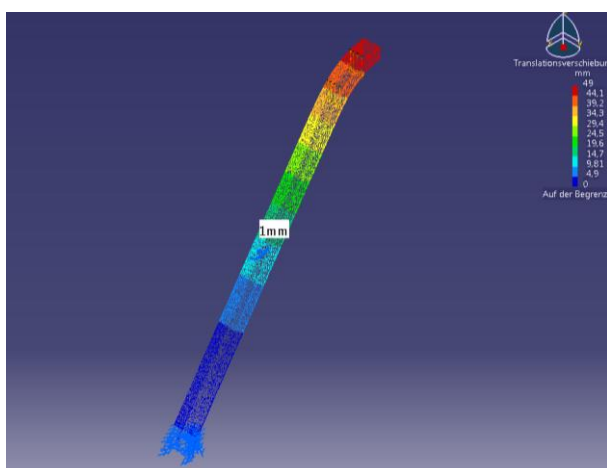


Abbildung 6-5: Verschiebungen am beschnittenen Rahmen

- *maximale Verschiebung: 49 mm*

Die Maximalen von Mises-Spannungen des beschnittenen Rahmens sind erwartungsgemäß um ein vielfaches höher als bei dem Ausgangsfensterrahmen. Sind die Spannungen an der Krafteinleitungsfläche noch im vertretbaren Bereich zwischen 100 bis 150 MPa, so steigen sie im Bereich der Einspannung sprunghaft an. Auch hier sind wieder die Enden des Profils besonders belastet mit etwa 700 - 1300 MPa, im Bereich der Kantenverrundung kommt es durch die Stauchung des Materials zu Werten von bis zu 2539 MPa. Die maximalen Verschiebungen liegen an der Krafteinleitungsfläche bei 49 mm. Von einem Versagen des Rahmens ist hierbei auszugehen, was aufgrund des fehlenden hinteren Fensterrahmenstücks sowie dessen Einspannung auch realistisch ist. In der Realität ist bei dieser Krafteinwirkung durch das Überschreiten der Streckgrenze von einer dauerhaften Verformung im oberen Rahmenabschnitt bis hin zum Bruch an der Einspannstelle auszugehen.

6.4. Maßnahmen zur Fensterrahmenstabilisierung

6.4.1. Auswahl

Nach dem Beschnitt des Fensterrahmens ist es sinnvoll, ein Dreiecksblech zur Stabilisierung des vorderen Fensterrahmenstückes einzubauen. Aufgrund der Sogwirkung des Fahrtwindes sowie dem nun möglichen freiem Schwingen durch Fahrbahnunebenheiten reißt sehr häufig der Fensterrahmen an den oberen Kanten des Innen- und Außenblechs ein. Die Schwierigkeiten bei der Dimensionierung des Dreiecksbleches ergeben sich aus den unbekanntem Kräften, die auf dem beschnittenen Fensterrahmen wirken. Diese müssten anhand von Strömungsuntersuchungen im Windkanal mit einem Gesamtfahrzeug für die auftretenden aerodynamischen Kräfte an der Fahrzeugoberfläche, bei der Verwendung der Tür im Falle eines Cabriolets somit mit offenem sowie geschlossenem Verdeck ermittelt werden. Ebenso auf Prüfständen, um das Schwingverhalten der Bauteile und ihre Dauerfestigkeit zu erfassen. Da die Kosten für diese Untersuchungen leicht den Wert eines Austin Mini übersteigen und in keinem Verhältnis zu den Kosten eines neuen Fensterrahmens stehen, wird das Dreiecksblech anhand von Erfahrungswerten dimensioniert. Weitere Möglichkeiten um die Stabilität zu verbessern wären eine Neukonstruktion des Vorderen Fensterrahmenstückes mit einem geänderten, verbesserten Profil oder eine partielle Verstärkung des derzeitigen Fensterrahmens. Von diesen beiden Möglichkeiten wird vorerst abgesehen, da das Einfügen eines Dreiecksblechs ausreichend sein sollte.

6.4.2. Konstruktion der Dreiecksbleche

Zur Auswahl des verwendeten Dreiecksbleches werden zwei mögliche Varianten konstruiert. Dabei soll das Blech an der Außen- sowie Innenkante befestigt werden, um den Rahmen auf beiden Seiten zu stabilisieren, womit zwei Dreiecksbleche benötigt werden. Durch die unterschiedlichen Kantenverläufe am Außen- und Innenblech sind desweiteren zwei unterschiedliche Ausführungen nötig. Zusätzlich ergeben sich später mit beiden Dreiecksblechen weitere Möglichkeiten, um die Scheibenführung zu verbessern.

Für die Konstruktion wurden die angrenzenden Flächen des Außen- und Innenblechs abgeleitet, die verschiedenen Varianten wurden in der Workbench "Generative Shape Design" in einem CATIA-Part konstruiert.

In der ersten Variante besteht das Dreiecksblech an der Außenseite der Fahrzeugtür aus einem einfachen, 1 mm starkem Dreiecksblech, das durch Biegeumformen mit den Radien $R = 2 \text{ mm}$ entlang des Fensterrahmenprofils entlangläuft. Da es an der Außenseite des

Fensterrahmens befestigt werden muss um nicht die Fensterführung zu beeinflussen, wird ein Abstand zur vorderen Kante des Fensterrahmens gewahrt, um falls gewünscht eine Verblendung der Außenkanten zur optischen Verschönerung zu ermöglichen. Damit das äußere Erscheinungsbild der Tür weitgehend erhalten bleibt, muss das Dreiecksblech an den Innenflächen der Außenseite angebracht werden. Da sich dort das Verstärkungsblech für die Spiegelbefestigung befindet, kann dieses als Verbindungsfläche gewählt werden. Als Befestigungsart des Dreiecksbleches bietet sich Kleben oder Schweißen an.

Das Dreiecksblech an der Innenseite ist aufgrund der anderen Kontur etwas anders geformt, die Biegeradien sind jedoch identisch. Auch hier wird das Blech an der Fensterrahmenaußenfläche sowie an der Innenseite des Innenblechs befestigt.

Eine Zeichnungsableitung beider Bleche befindet sich im Anhang 8.4.

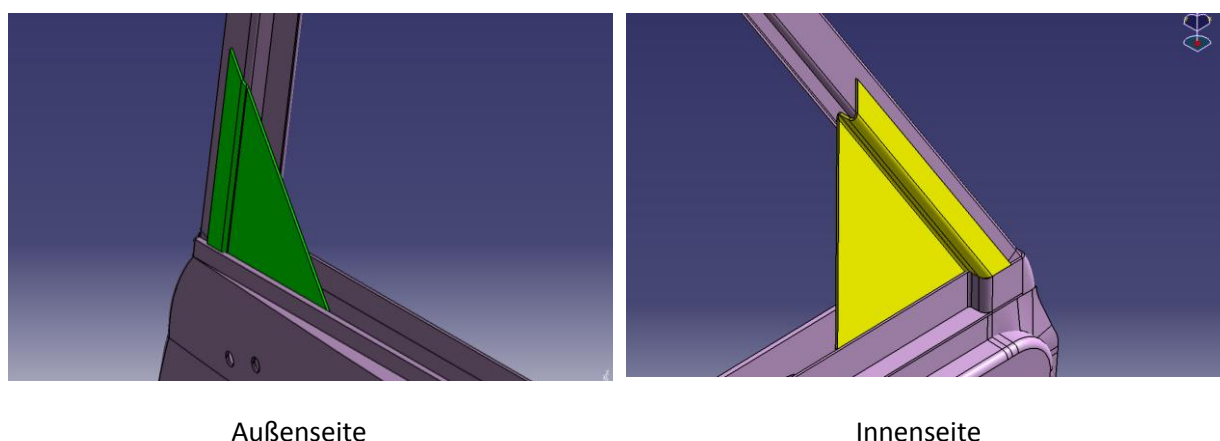


Abbildung 6-6: erste Variante der Dreiecksbleche für den Fensterrahmen

Nach Konstruktion der beiden Dreiecksfenster werden sie zusammen mit dem Fensterrahmen wieder dem Belastungstest unterzogen. Um die Dreiecksfläche und den Fensterrahmen gemeinsam ohne größeren Bedingungs Aufwand zu untersuchen, bietet es sich an die Flächen der Dreiecksbleche als Kopien in das geometrische Set des Fensterrahmens zu kopieren. Dort werden anschließend die Verbindungsflächen noch einmal einzeln konstruiert, um mit ihnen die Randbedingungen im FEM-Modul festzulegen. Hier erfolgen Vernetzung und Randbedingungen wie bei den vorigen FEM-Untersuchungen, jedoch müssen mittels "*Analyse allgemeiner Verbindung*" sowie anschließender "*fixierter Verbindung*" die Verbindungsflächen des Fensterrahmens mit den Dreiecksblechen verbunden werden. Zusätzlich gelten die Verbindungsflächen zum Innen- und Außenblech als weitere Einspannpunkte. Hier wird von einer ausreichend dimensionierten Verbindung der Schweiß- oder Klebeflächen ohne Versagen ausgegangen. Die Berechnung mit 1,5 mm starken Schalenelementen ergab folgende Ergebnisse:

Beschnittener Rahmen mit Dreiecksblechen
ohne Formoptimierung

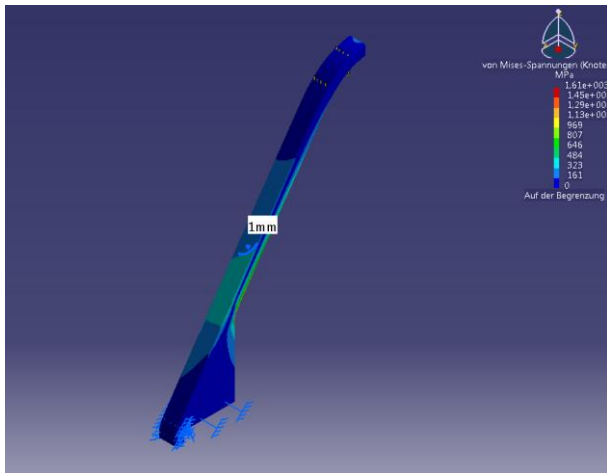


Abbildung 6-7: Spannungen am Rahmen mit Dreiecksblechen

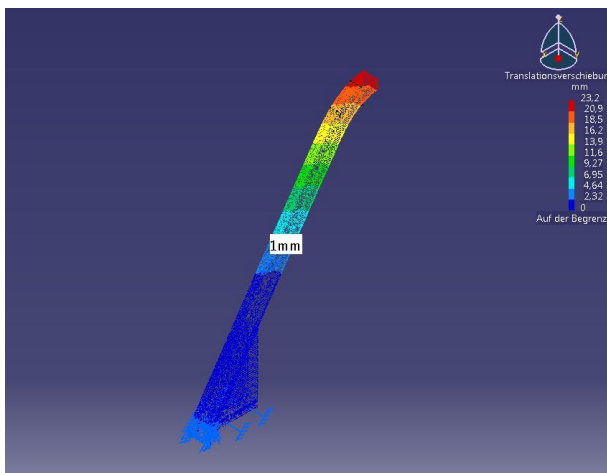


Abbildung 6-8: Verschiebungen am Rahmen mit Dreiecksblechen

- *Globaler Fehlerwert: 4,82%*
- *Maximale von Mises-Spannung an der Krafteinleitungsfläche: 100 - 150 MPa*
- *Maximale von Mises-Spannung im Bereich der Einspannungen: 0 - 250 MPa*
- *Maximale von Mises-Spannung im Bereich der Dreiecksbleche: 1614 MPa*
- *maximale Verschiebung: 23,18 mm*

Der Globale Fehlerwert hat sich im Gegensatz zu den Berechnungen des einzelnen Fensterrahmens um 2 % auf 4,82 % erhöht, liegt aber damit noch im vertretbaren Bereich von unter 5 %. Die maximale von Mises-Spannung ist an der Krafteinleitungsfläche so hoch wie in der Version ohne Dreiecksblech, die Werte an der Einspannstelle sind jedoch bedeutend niedriger bei maximal 250 MPa. Die kritischen Stellen der Struktur befinden sich nun an den Übergängen zwischen Fensterrahmen und Dreiecksblech, hier wird eine Spannungsspitze von 1614 MPa erreicht. Dies ist damit zu erklären, dass aufgrund der geänderten Gesamtgeometrie sich auch der Kraftfluss durch das Bauteil ändert. Die maximale Verschiebung des Rahmens in Z-Richtung hat sich fast halbiert auf einen Wert von 23,18 mm.

In der zweiten Variante werden die Dreiecksbleche in ihrer Form optimiert um das Material besser auszunutzen, ihre Zeichnungsableitungen sind in Anhang 8.5 zu finden. In Abbildung 6-9 erkennt man, das die Spannungsspitzen wieder im Bereich der Enden des offenen Fensterrahmenprofils liegen. Um ein Versagen bei diesem Belastungsfall auszuschließen, wäre eine Neukonstruktion des Fensterrahmens oder das anbringen lokaler Verstärkungen nötig.

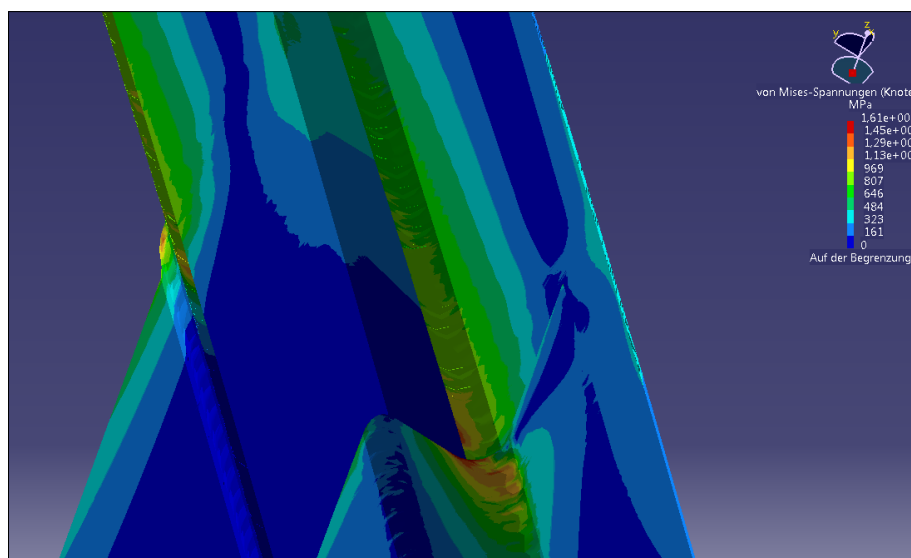
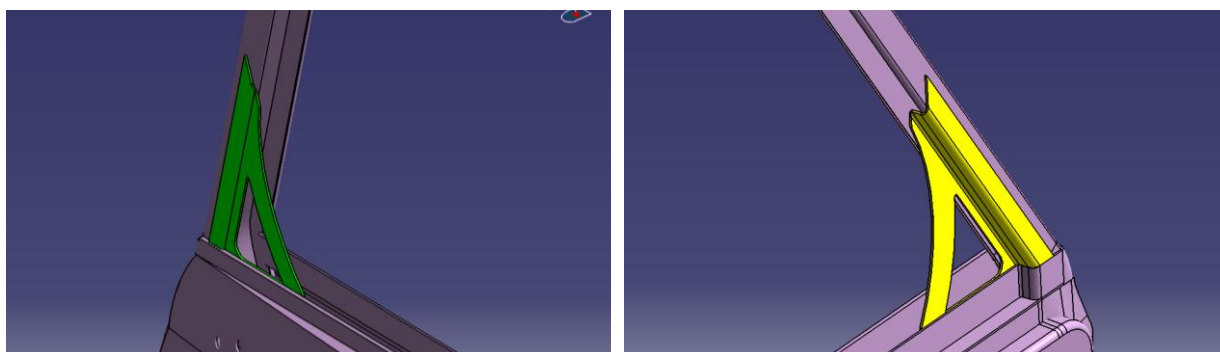


Abbildung 6-9: Spannungen an den Übergängen zwischen Fensterrahmen und den Dreiecksblechen

Bei der Formoptimierung werden die Bereiche, in denen geringe Spannungen auftreten, entfernt, womit sich die Kraftübertragung auf zwei Lastpfade verteilt. Die Anschlussflächen an die jeweilige Umgebung bleiben erhalten, desweiteren bleibt die Materialstärke gleich. Das Ziel der Formoptimierung ist dabei, weniger Material und damit Gewicht einzusetzen bei gleichem oder besserem Bauteilverhalten unter Krafteinwirkung.



Außenseite

Innenseite

Abbildung 6-10: Formoptimierte Dreiecksbleche

Bei der anschließenden FEM-Untersuchung musste aufgrund von Netzfehlern im Bereich der Aussparungen bei beiden Dreiecksblechen die Elementgröße auf 2 mm erhöht werden. Die Untersuchung brachte folgende Ergebnisse:

Beschnittener Rahmen mit formoptimierten Dreiecksblechen

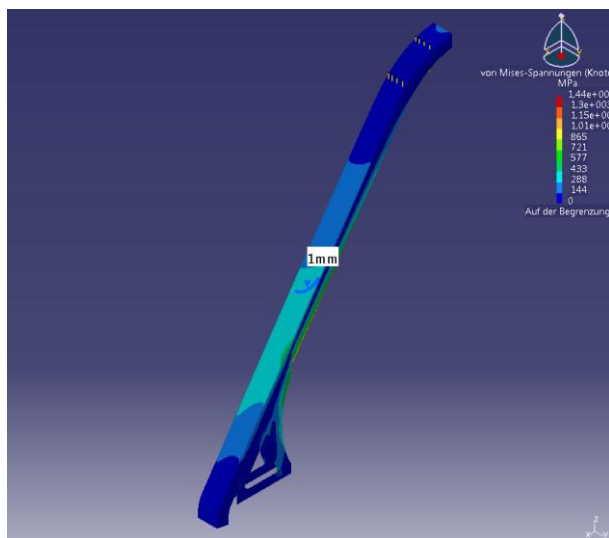


Abbildung 6-11: Spannungen am Rahmen mit formoptimierten Dreiecksblechen

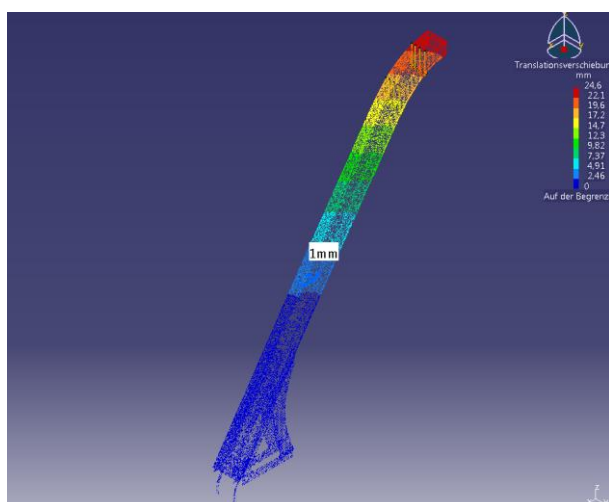


Abbildung 6-12: Verschiebungen am Rahmen mit formoptimierten Dreiecksblechen

- *Globaler Fehlerwert: 4,93 %*
- *Maximale von Mises-Spannung an der Krafteinleitungsfläche: 100 - 150 MPa*
- *Maximale von Mises-Spannung im Bereich der Einspannungen: 0 - 250 MPa*
- *Maximale von Mises-Spannung im Bereich der Dreiecksbleche: 1442 MPa*
- *maximale Verschiebung: 24,56 mm*

Während sich die Verschiebungen durch die nun etwas weichere Struktur leicht erhöht haben, sind die maximalen Spannungsspitzen kleiner geworden. Da an der Anbindung der Bleche am Fensterrahmen nichts geändert wurde, sind auch hier weiterhin die kritischen Maximalspannungen vorhanden. Die Kraftwirkung verläuft nun wie in Abbildung 6-13 zu sehen, an der äußeren Dreiecksfläche entlang in das Außen- und Innenblech.

Die Spannungen befinden sich hier bei maximal 577 MPa, was bei Verwendung eines üblichen Stahlbleches weiterhin mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer dauerhaften Verformung führen würde.

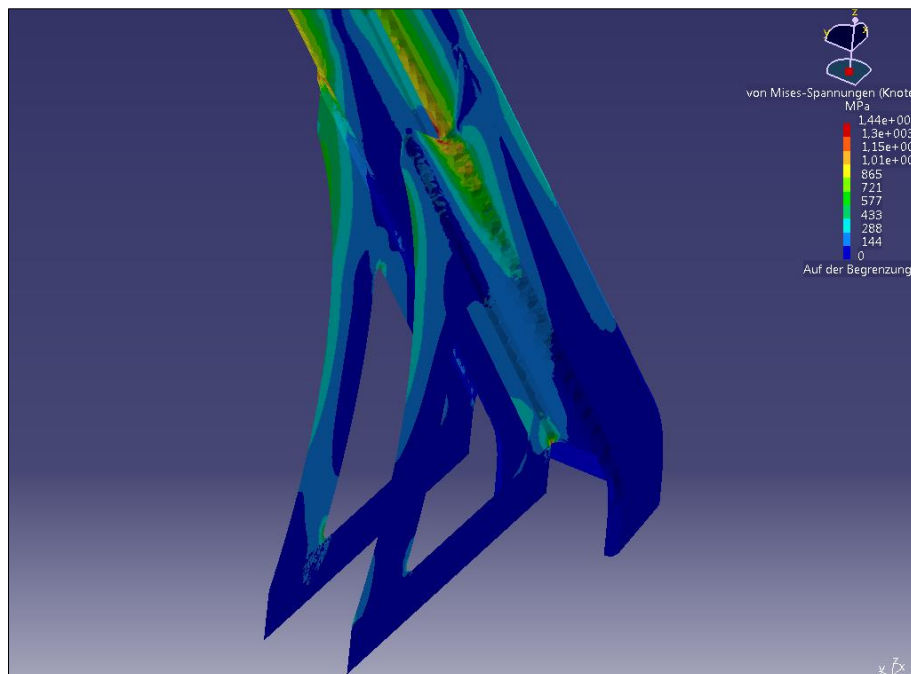


Abbildung 6-13: Spannungsverlauf an den formoptimierten Dreiecksblechen

Die äußere Kraftwirkung auf den Fensterrahmen wurde mit Absicht hoch gewählt, deshalb ist anschließend noch eine Berechnung mit halbiertem Kräfteinwirkung durchgeführt worden. Dabei lagen die Spannungen im Dreiecksblech an den Außenkanten bei maximal 368 MPa, wodurch die Verwendung eines Stahlbleches mit einer Streckgrenze in diesem Bereich ausreichend wäre. Die übertragenen Kräfte auf den beschnittenen Rahmen sollten im Fahrbetrieb jedoch weitaus geringer ausfallen, ein Einreißen des Fensterrahmens im Bereich der Verbindung zum Außen- und Innenblech kann nun mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Variante	Maximale Spannungen [MPa]	Veränderung der Spannung zur vorherigen Variante [%]	Maximale Verschiebungen [mm]	Veränderung der Verschiebung zur vorherigen Variante [%]
Beschnittener Rahmen	2539	-	49	-
Beschnittener Rahmen mit Dreiecksblech	1614	- 36,4	23,2	- 52,7
Beschnittener Rahmen mit formoptimierten Dreiecksblech	1442	- 10,7	24,6	+ 6

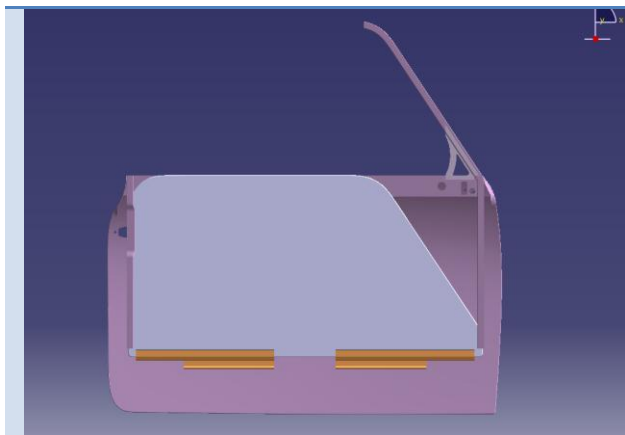
Tabelle 3: Vergleich von Spannungen und Verschiebungen des Fensterrahmens mit den Dreiecksblechvarianten

6.5. Untersuchung der Scheibenführung

Da durch den beschnittenen Fensterrahmen die Führung der Seitenscheibe in geschlossener Position stark verringert ist, müssen Möglichkeiten untersucht werden, die Führung der Scheibe zu verbessern. Um die derzeitige Scheibenführung zu ermitteln, werden die Längen der Kontaktflächen zwischen Fensterrahmen und Seitenscheibe für die Zustände "vollständig geschlossene Scheibe", "halb geöffnete Scheibe" sowie "vollständig geöffnete Scheibe" ermittelt. Dazu werden mittels eines Schnittes entlang der Mittellinie der Scheibe sowie des Fensterrahmens die geführten Teilbereiche aufsummiert.

Scheibenposition:

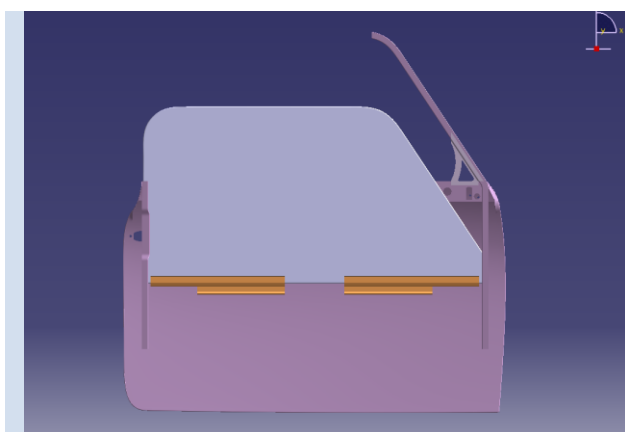
Länge der Führung am Fensterrahmen:



vollständig geöffnete Scheibe

vorderer Rahmenabschnitt: 40 mm
hinterer Rahmenabschnitt: 320 mm

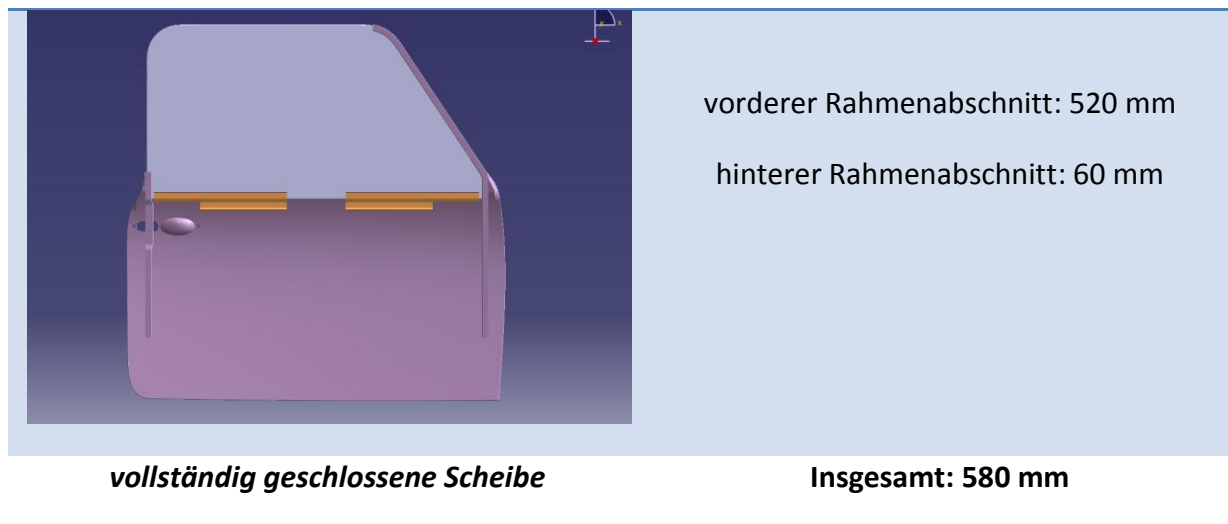
Insgesamt: 360 mm



halb geöffnete Scheibe

vorderer Rahmenabschnitt: 40 mm
hinterer Rahmenabschnitt: 250 mm

Insgesamt: 290 mm



Vergleicht man die Werte, stellt man fest, dass die geringste Führung beim hochbeziehungsweise herunterfahren der Scheibe auftritt. Desweiteren wird die Scheibe während dieses Zustandes hauptsächlich durch den hinteren Rahmenabschnitt geführt. Am vorderem Rahmenabschnitt beträgt die Scheibenführung durchgehend circa 40 mm, in der Endposition bei geschlossener Scheibe umfasst das nach dem Beschnitt übriggebliebene Rahmenstück den vorderen Bereich der Scheibe jedoch vollständig. Die Scheibenführung bei geöffneter Scheibe entspricht dem Originalzustand, jedoch sind bis zu 350 mm Scheibenführung in Z-Richtung beim Schließen der Scheibe weggefallen. Die sich daraus ergebenden Folgen resultieren in einer zu erwartenden Instabilität der Scheibe im geschlossenem Zustand aufgrund des nicht mehr vollständig unterdrückten Freiheitsgrades in Y-Richtung. Ein Klappern sowie schlechtes Dichtverhalten zum Innenraum beim Fahren durch wirkende Sogkräfte an der Scheibe wären zu erwarten. Um dieses Problem zu beseitigen bietet es sich an, die vorhandene Scheibenführung zwischen Scheibe und Fensterrahmen durch je ein zusätzliches Führungselement an den betreffenden Scheibenseiten zu erweitern. Da das Anbringen dieser zusätzlichen Führungselemente nur an der Unterkante der Scheibe erfolgen kann, muss gleichzeitig der Fensterrahmen nach unten verlängert werden.

6.5.1. Verlängerung des Fensterrahmens

Um eine mögliche Verlängerung des Fensterrahmens in die Tür hinein abzuschätzen werden zwei Schnitte am CAD-Modell bei $X = -3,4$ mm sowie $X = -853,1$ mm durchgeführt (Abbildung 6-14).

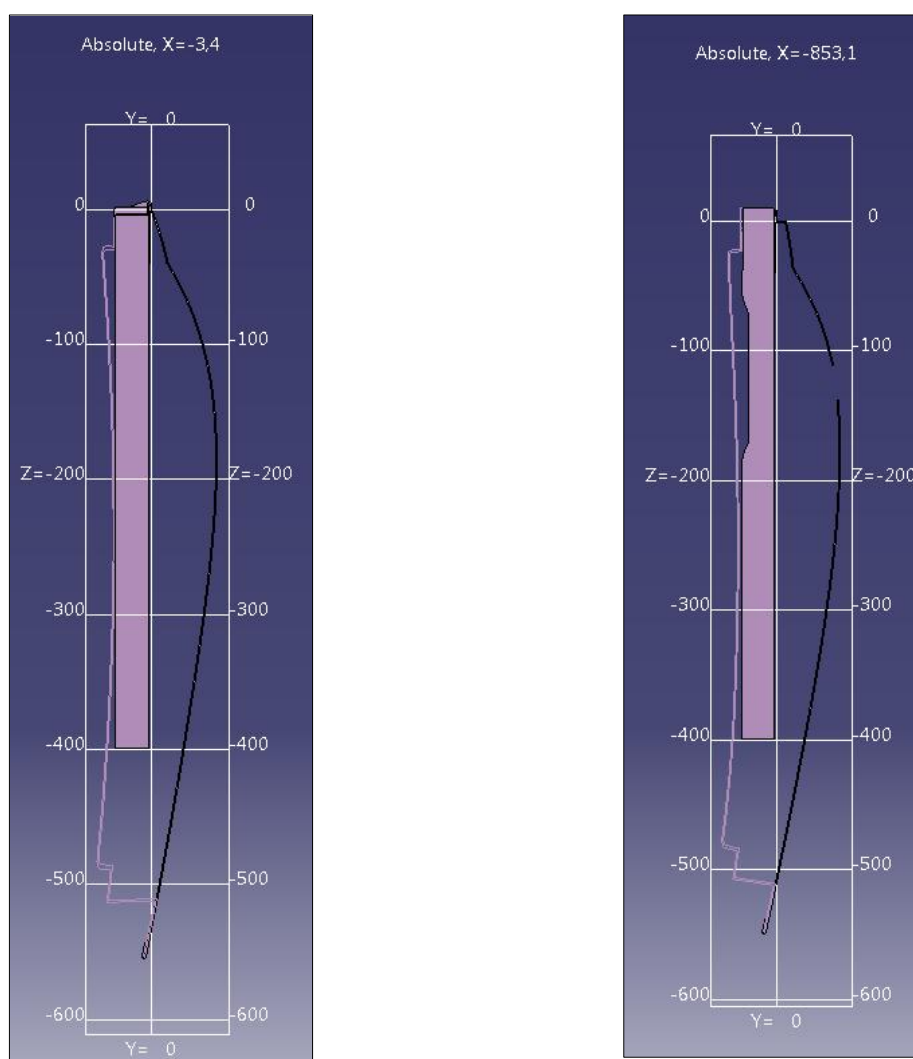


Abbildung 6-14: X-Schnitte zur Ermittlung der Fensterrahmenverlängerung

Anhand der Schnitte ist zu erkennen, dass eine Verlängerung des Fensterrahmens um circa 100 mm in negativer Z-Richtung auf beiden Seiten erfolgen kann. Idealerweise kann man für die Verlängerung die abgetrennten geraden Bereiche des gekürzten Fensterrahmens nutzen. Die Anbindung der Stücke kann entweder mittels Stumpfstoß geschweißt oder dauerhaft geklebt werden, dies setzt aber im Falle des Schweißens eine saubere Naht, die nicht den inneren Führungsbereich des Fensterrahmens beschädigt, voraus. Ebenso ist eine Schweiß- oder Klebverbindung durch Verbindungsbleche zueinander an den Außenseiten des

Rahmens möglich. Diese Verbindung wäre widerstandsfähiger, jedoch sind keine hohen Kräfte an den Verbindungsstellen zu erwarten. Die Verlängerung der Rahmenstücke in CATIA erfolgt mittels Extrusionsflächen, Abbildung 6-15 zeigt die angebrachten 100 mm langen Verlängerungsstücke (Farbe Grün), ihre Zeichnungsableitung ist im Anhang 8.6 zu finden.

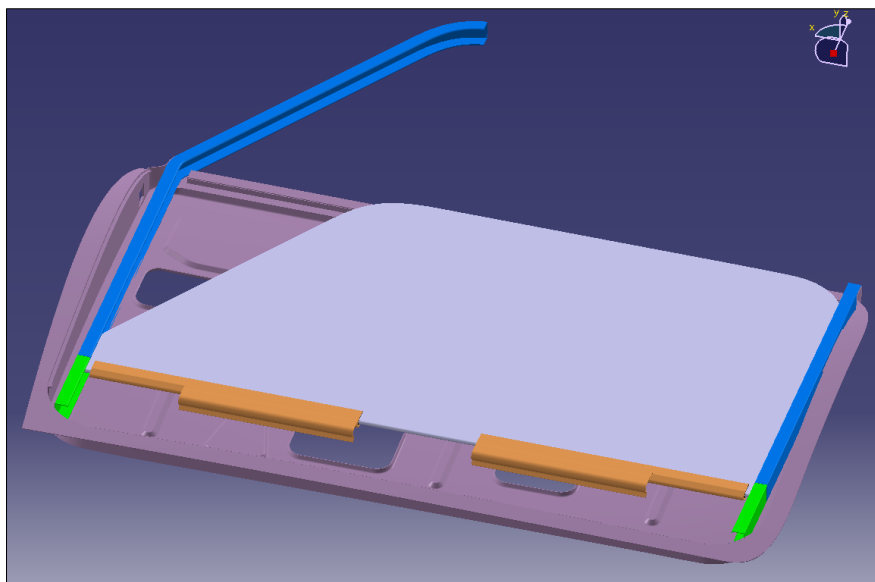


Abbildung 6-15: Verlängerung des Fensterrahmens um 100 mm

6.5.2. Verbesserung der Scheibeführung mittels zusätzlicher Führungselemente

Um die Verlängerung nutzen zu können werden zwei zusätzliche Führungselemente für jede Seite von der Scheibe zum Fensterrahmen konstruiert. Diese müssen an den Befestigungsschienen des Seitenfensters angebracht werden, da deren Position aufgrund der Fensterheber-Kinematik nicht sehr weit verändert werden darf. Die Teilbereiche der Verbindungsstücke zum Unterstützen der Führung sollten desweiteren mindestens die Stärke der verwendeten Seitenscheibe besitzen um diese ausreichend zu unterstützen. Die Verwendung eines stärkeren Durchmessers des Verbindungsstücks innerhalb der Führungsschiene könnte die Scheibe noch mehr stabilisieren, allerdings würden auch die Reibkräfte an den Verbindungsflächen steigen, was wiederum einen höheren Kraftaufwand beim Öffnen und Schließen der Scheibe bedeutet. Aus diesem Grund wird mit der Stärke der Fensterscheibe an den Stellen der Führung gearbeitet. Ein weiterer Punkt der beachtet werden muss, ist der weiterhin problemlose Aus- und Einbau des Fensters. Auch sollten die zusätzlichen Führungselemente bereits bei einem Ausbau der Seitenverkleidung montierbar sein. Dies lässt sich am besten mit einem geteilten Aufbau sicherstellen.

Er besteht aus den Verbindungselementen zur Seitenscheibe sowie dem Führungselement, welches im Fensterrahmen die Scheibe zusätzlich stabilisiert. Der Aufbau der Verbindungselemente ist in Abbildung 6-16 zu sehen.

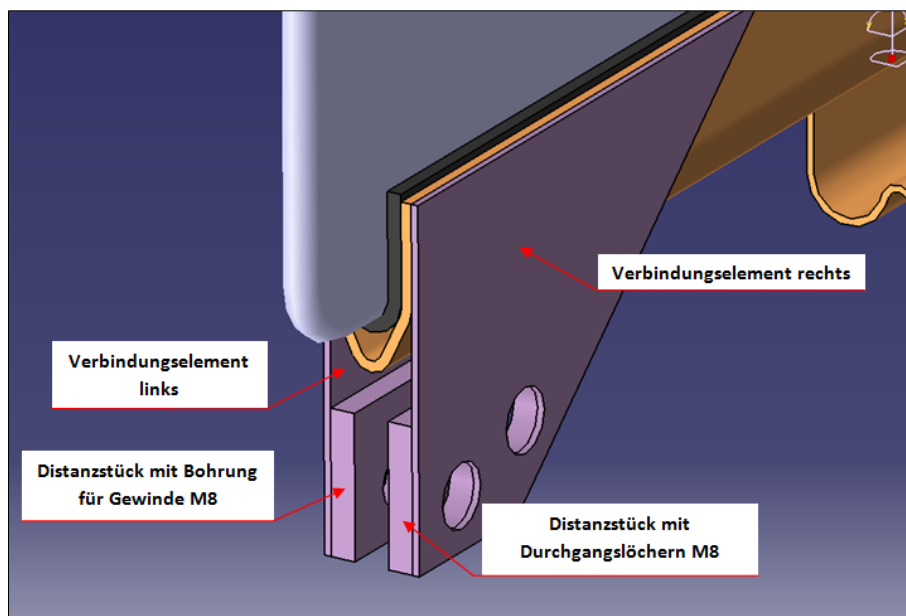


Abbildung 6-16: Verbindungselemente zwischen Fensterscheibe und zusätzlicher Scheibenführung

Die Verbindungselemente rechts und links sind identisch und haben eine Stärke von einem Millimeter. An ihren Innenseiten ist jeweils ein Distanzstück, beide dienen zur Arretierung des Führungselementes. Die Distanzelemente haben eine Stärke von 3,5 mm und werden vor dem Einbau der Verbindungselemente mit diesen fest verbunden. Die Verbindungsart ist abhängig von der Art der Herstellung der Verbindungselemente beziehungsweise der Distanzstücke. Die einfachste und kostengünstigste Methode sind jeweils einzelne Stücke, die miteinander fest verbunden werden. Dazu ist ein stabiles Stahlblech, welches zurechtgeschnitten wird, für die Verbindungselemente nötig sowie zwei 3,5 mm starke Metallstücke für die Distanzelemente. In beide Verbindungselemente werden für die spätere Befestigung des Führungselementes jeweils zwei versetzte Durchgangslöcher für M8 Schrauben mit einem Durchmesser von 9 mm gebohrt. Bei den Distanzelementen werden diese Bohrungen ebenfalls auf der rechten Seite angebracht, im linken Distanzelement sind die Bohrungen mit einem Durchmesser von 6,8 mm durchzuführen, um ein Gewinde der Größe M8 hineinschneiden zu können. Die Verbindung von Distanzstück und Verbindungselement kann mittels Schweißen oder Kleben erfolgen, beim Schweißen ist jedoch auf einen möglichen Verzug des Bleches im Bereich der Bohrlöcher zu achten. Eine Befestigung mittels 2 - 4 kleiner Schrauben entlang der Ränder wäre ebenso möglich. Teurer, jedoch sinnvoller wäre es, Distanzstück und Verbindungselement aus einem Stück zu fertigen, zum Beispiel durch Gießen. Die Verbindungselemente werden im ausgebautem

Zustand der Seitenscheibe an den Klemmschienen mittels Punktschweißverbindungen befestigt, anschließend wird die Seitenscheibe in die Tür eingebaut und mit dem Fensterheber verbunden.

Die Montage der Führungselemente erfolgt anschließend durch die Öffnungen im Innenblech bei halb geöffneter Scheibe. Dazu werden sie in die Lücke zwischen den Distanzstücken geschoben und durch die Öffnungen im Innenblech mit jeweils zwei M8 Schrauben ausreichend fest verschraubt (Abbildung 6-17).

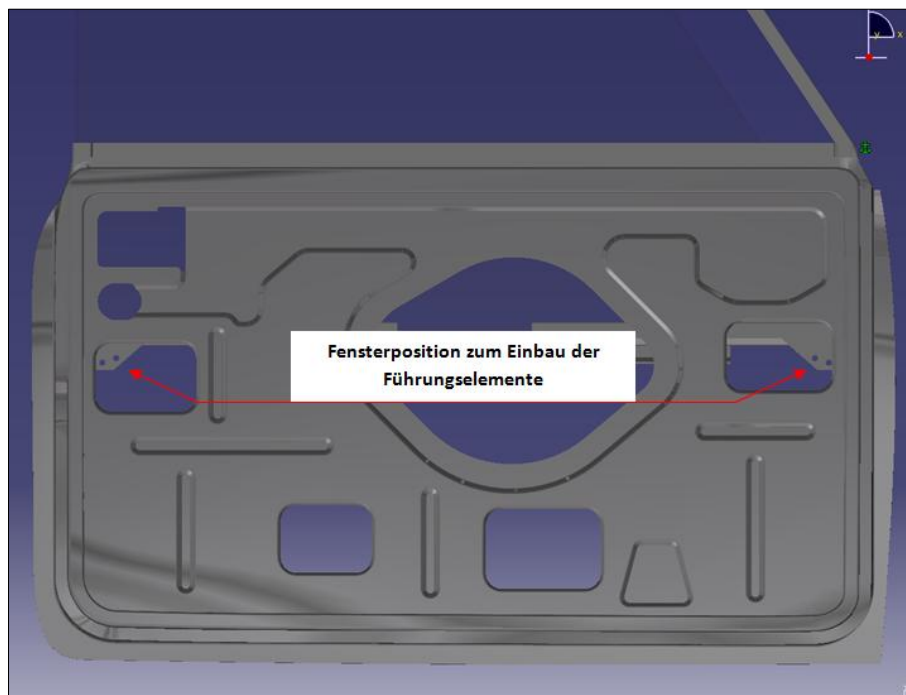


Abbildung 6-17: Montage der Führungselemente

Die Führungselemente selbst werden aus Metall oder Kunststoff gegossen, besitzen ebenso die Bohrungen zum Durchstecken der Verbindungsschrauben und eine Materialstärke von 5 mm bei einer Führungslänge von 75 mm (Abbildung 6-18).

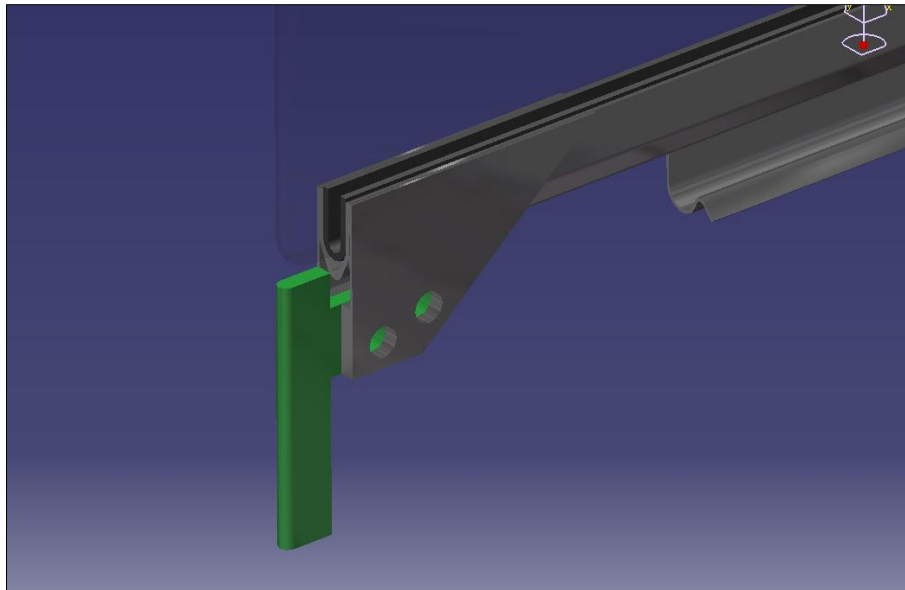
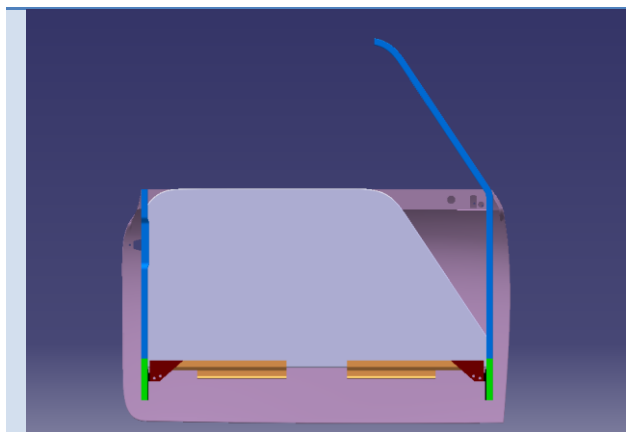


Abbildung 6-18: hinteres zusätzliches Scheibenführungselement

Die Stabilität der Seitenscheibe sollte nun stark verbessert sein durch die zusätzlichen Führungselemente. Um dies zu überprüfen wird wieder die Länge der Scheibenführung für die entsprechenden Scheibenpositionen im CAD-Modell untersucht.

Scheibenposition:

Länge der Führung am Fensterrahmen:



vollständig geöffnete Scheibe

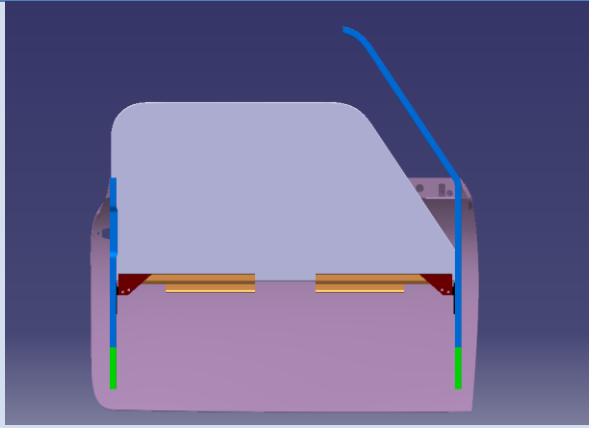
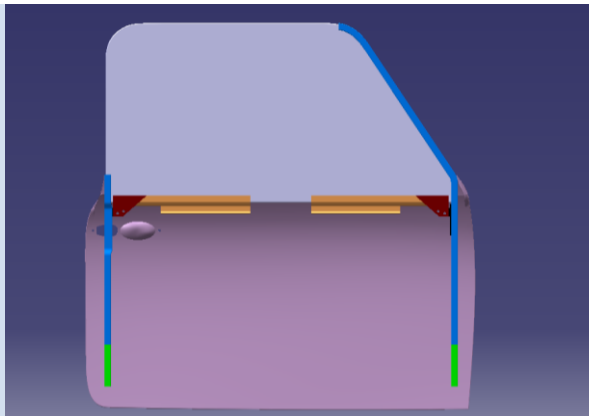
Ohne Verbesserung:

vorderer Rahmenabschnitt: 40 mm
hinterer Rahmenabschnitt: 320 mm

Mit Verbesserung:

vorderer Rahmenabschnitt: 115 mm
hinterer Rahmenabschnitt: 395 mm

Insgesamt: 510 mm (+ 41,7%)

	<p>Ohne Verbesserung:</p> <p>vorderer Rahmenabschnitt: 40 mm hinterer Rahmenabschnitt: 250 mm</p> <p>Mit Verbesserung:</p> <p>vorderer Rahmenabschnitt: 115 mm hinterer Rahmenabschnitt: 325 mm</p>
<p>halb geöffnete Scheibe</p>	<p>Insgesamt: 440 mm (+51,7 %)</p>
	<p>Ohne Verbesserung:</p> <p>vorderer Rahmenabschnitt: 520 mm hinterer Rahmenabschnitt: 60 mm</p> <p>Mit Verbesserung:</p> <p>vorderer Rahmenabschnitt: 595 mm hinterer Rahmenabschnitt: 135 mm</p>
<p>vollständig geschlossene Scheibe</p>	<p>Insgesamt: 730 mm (+ 25,9 %)</p>

Durch das Anbringen der zusätzlichen Führungselemente mit jeweils 75 mm mehr Führungslänge pro Seite hat sich die Scheibenführung vor allem im kritischen Bereich zwischen Öffnen und Schließen sehr verbessert, desweiteren wird hier die Scheibe nicht mehr nur hauptsächlich durch den hinteren Fensterrahmen geführt sondern nun auch stärker im vorderen Rahmenbereich. Betrug das alte Scheibenführungsverhältnis zwischen dem hinterem und vorderem Fensterrahmenabschnitt noch 6 : 1, ist es aufgrund der Verbesserung auf 1 : 3 gesunken. Die Führung im geschlossenem Zustand wieder auf das alte Maß zu bringen, erweist sich durch den weitgehend weggefallenen hinteren Rahmen als unmöglich, jedoch ist auch hier der hintere Scheibenbereich durch Verdopplung der hinteren Fensterrahmenführung nun besser abgestützt. Im vollständig geöffnetem Zustand der Scheibe ist die Fensterführung nun besser als im Originalzustand.

Die Zeichnungsableitungen der Verbindungsstücke sowie der Führungselemente befinden sich im Anhang 8.7.

6.5.3. Möglichkeiten zur Verbesserung des Anpressdrucks der Seitenscheibe

Um den Anpressdruck der Scheibe im geschlossenem Zustand zu verbessern bietet es sich an, die für die Stabilisierung des vorderen Fensterrahmens erstellten Dreiecksbleche sowie die Wetterleisten zu nutzen. Da durch die Sogwirkung des Fahrtwindes die Seitenscheibe nach außen gedrückt wird, sollte eine leichte Vorspannung der Seitenscheibe in Richtung Fahrzeuginnenraum dieses ausgleichen. Die wirkenden Sogkräfte auf die Seitenscheibe sind jedoch unbekannt, womit ein genaues Einstellen der Vorspannung nur am Fahrzeug erfolgen kann. Die hier ermittelten Maßnahmen müssen somit in einem späterem praktischen Versuch überprüft werden.

Abbildung 6-19 zeigt anhand eines Schnittes bei $X = -78,5$ mm die Lage der Scheibe im Bereich der vorderen Dreiecksbleche sowie die Richtung der Vorspannung.

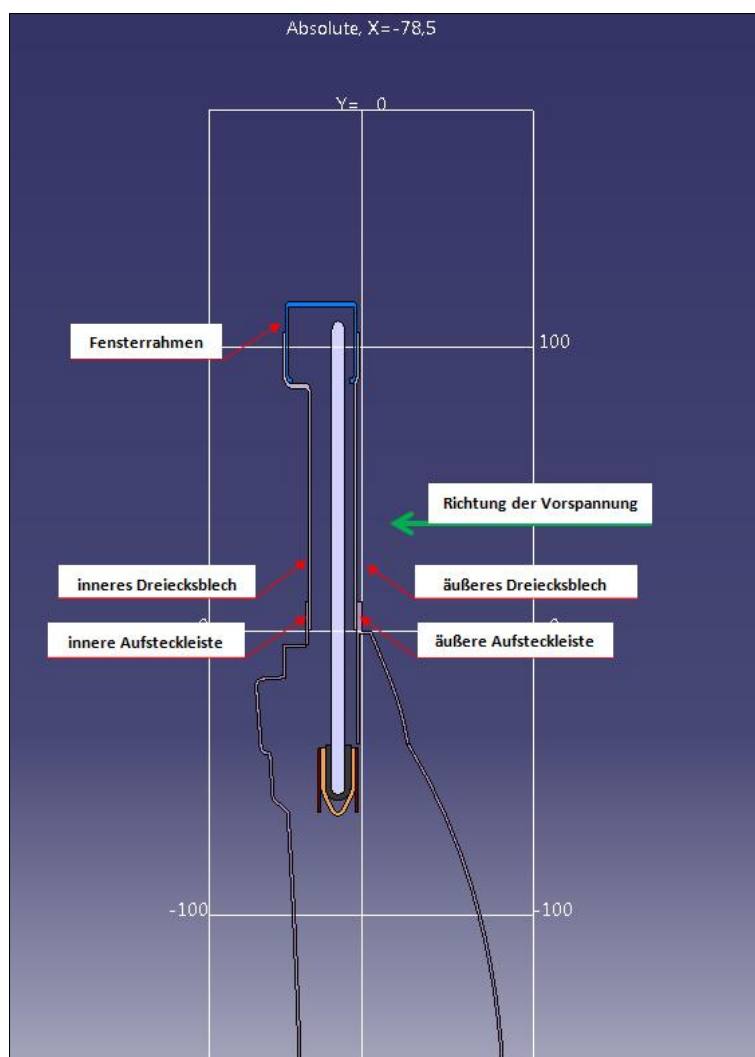


Abbildung 6-19: Schnittdarstellung im Bereich der Dreiecksbleche bei $x = -78,5$ mm

Da die Dichtungen aufgrund des Einbaus der Dreiecksbleche an der Aufsteckleiste entweder gekürzt oder neuentwickelt werden müssen, kann die Vorspannung mithilfe der Form der Dichtung erzeugt werden. Verwendet man für die äußere Aufsteckleiste eine Dichtung mit modifizierter Metallseele, könnten die für die Vorspannung nötigen Kräfte mit dieser erzeugt werden. Abbildung 5-20 zeigt in einer Skizze eine mögliche Variante dieser Metallseele auf der Aufsteckleiste, der sie ummantelnde Gummi wird hier nicht dargestellt.

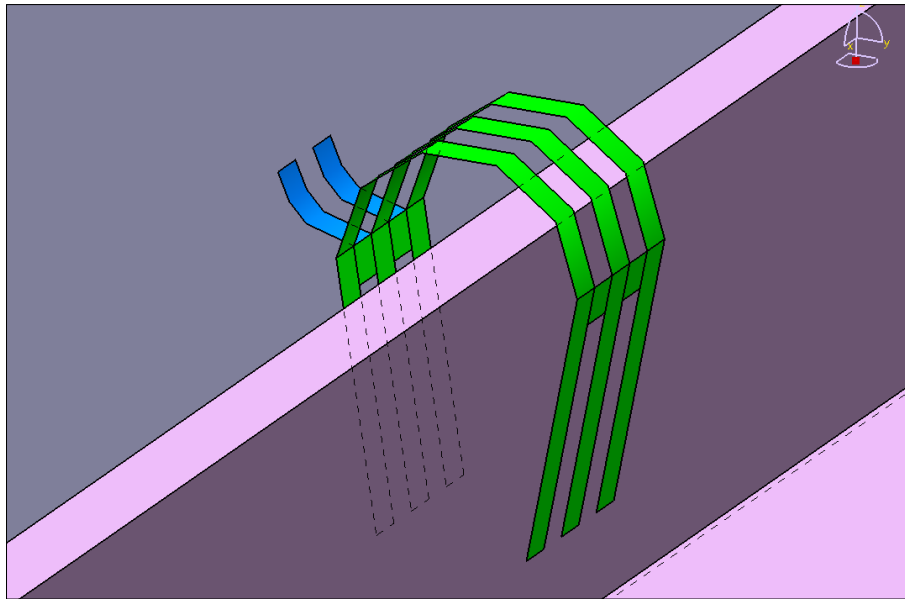


Abbildung 6-20: Erzeugung einer Vorspannung der Scheibe durch Metallseele innerhalb der Dichtung

Die grünen Bereiche der Metallseele sorgen für einen erhöhten Anpressdruck des Leistengummis auf der Aufsteckfläche, um ein Verrutschen seinerseits beim Öffnen der Scheibe zu verhindern. Die Blau dargestellten Teile wirken federnd auf die Scheibe und drücken sie in Richtung des Fahrzeuginnenraums. Der hier nicht dargestellte Leistengummi verhindert dabei eine Beschädigung der Seitenscheibe und sollte, um die Federwirkung zu verstärken, auf der Fensterseite nach oben hin ähnlich den Enden eines Pfeils breiter werden. Mithilfe einer solchen modifizierten Dichtung über die gesamte Fläche der Aufsteckleiste sollte eine ausreichend hohe Vorspannung erreichbar sein. Eine Unbekannte hierbei sind jedoch die Herstellkosten einer solchen Dichtung, insbesondere, da die benötigte Vorspannung noch nicht ermittelt ist und nur über praktische Versuche ausreichend genau bestimmt werden kann.

Auf die Innenflächen der Dreiecksbleche ist ein Aufkleben von Filzelementen möglich, um die Spannung der Scheibe zu beeinflussen. Nachteilig wäre dabei jedoch, dass aufgrund der Lage der Dreiecksbleche diese nur im vorderen Türbereich auf die Scheibe wirken und damit ein mögliches Schiefstehen der Scheibe begünstigen. Um dies zu vermeiden wären dann ausgleichende Maßnahmen im hinterem Türbereich erforderlich.

Weitere Varianten können eine Profilveränderung der Fensterrahmendichtung sein, bei der diese die Scheibe kurz vor Erreichen der geschlossenen Endposition in Richtung Innenraum drückt oder ein geringfügig zur Innenseite geneigtes vorderes Rahmenstück, durch welches die Scheibe beim Hochfahren automatisch eine Vorspannung erhält.

6.6. Fazit

Die Veränderung zur rahmenlosen Tür in CATIA V5 verlief problemlos, aus den sich daraus ergebenden strukturellen Veränderung der Tür konnten jedoch nur einige Aspekte betrachtet werden. So können aufgrund mangelnder CAD- und Fahrversuchsdaten über das Verhalten der Tür im Kontext des Gesamtfahrzeuges nur unzureichende Aussagen getroffen werden. Ein Einbinden von Dreiecksblechen zur Stabilisierung des vorderen Rahmenabschnitts ist nötig, um einen Bruch des Rahmens durch auftretende Belastungen während der Fahrt zu verhindern. Die Scheibenführung der Seitenscheibe hat sich vor allem durch das Abtrennen des hinteren Fensterrahmenbereiches verschlechtert. Dies kann jedoch über eine Verlängerung des Fensterrahmens in den Türinnenraum und zusätzlichen Führungselementen soweit ausgeglichen werden, das während des Öffnen und Schließens der Scheibe eine ausreichende Scheibenführung gewährleistet ist. Im geschlossenen Zustand findet jedoch hauptsächlich nur eine Führung durch den vorderen Fensterrahmenabschnitt statt, hier müssen praktische Test zeigen ob die gewählten Maßnahmen ausreichend sind. Möglichkeiten zur Erhöhung des Anpressdrucks der Seitenscheibe an die Dichtungsgummis sind vorhanden, können jedoch erst nach einer Auswahl des verwendeten Verdeck näher untersucht werden.

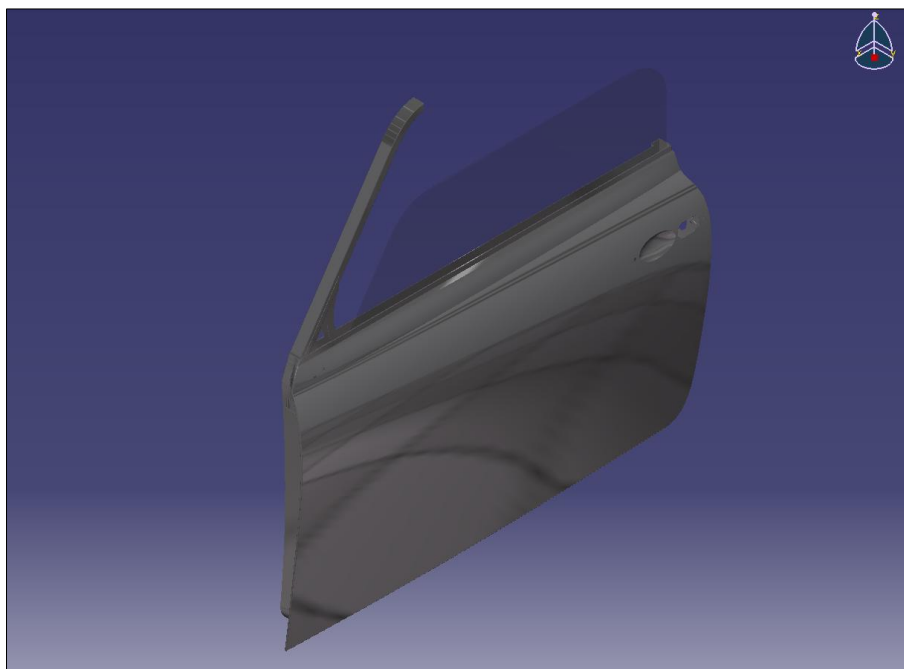


Abbildung 6-21: CAD-Modell der rahmenlosen Austin Mini Seitentür

7. Schlussbetrachtung und Ausblick

Die Konstruktion einer Seitentür ohne vorhandene CAD-Daten oder technischen Zeichnungen ist komplex, weshalb sich die Methode des Reverse Engineering sehr gut für eine Flächenrückführung eignet. Leider erbrachte das Scannen mittels David-Laserscanner nicht die gewünschte Genauigkeit und Dichte der Punktwolken. Die Ursachen hierfür liegen im Digitalisier-Verfahren von David-Laserscanner sowie in Größe und Oberflächenform der Tür. Damit ist diese Scansoftware wenig für das Reverse Engineering im Maschinenbau geeignet, allerdings ist sie für das Erfassen von Freiformflächen in der Designphase eines Bauteils durchaus nutzbar. Ihre Vorteile liegen in einem einfach zu erlernenden und schnell durchführbaren Scanvorgang, schnellen Datenexport zu CAD-Systemen sowie einem sehr günstigen Preis.

Der Zeitverlust durch die Ungenauigkeit der Punktwolken und den daraus folgenden nötigen Handvermessen der Austin Mini Tür war hoch, andererseits der Lerneffekt durch die manuelle Entwicklung der Türflächen sowie den sich daraus ergebenden Problemen immens.

Anhand des fertig erstellten CAD-Modells der Austin Mini Tür waren die Umwandlung zur rahmenlosen Tür sowie alle nachfolgenden Untersuchungen gut durchzuführen. Da die verwendete Tür Teil eines privaten Mini-Cabriolet-Projektes ist, sollten die hier gesuchten Lösungen nach Möglichkeit mit einfachen Mitteln durchführbar sein. Dabei sind die Konzepte zur Rahmenstabilisierung sowie der Fensterscheibenführung gut umsetzbar und werden im Anschluss an die Diplomarbeit verwirklicht. Die gewonnen Erkenntnisse zur Verbesserung des Scheiben-Anpressdruckes müssen vorerst als theoretische Ausgangsbasis verwendet werden und können erst nach dem vollständigen Umbau des Austin Mini zum Cabriolet auf ihre praktische Tauglichkeit hin untersucht werden.

8. Anhang

8.1. Literaturverzeichnis

- Braess / Seiffert, 2007** Hans-Hermann Braess / Ulrich Seiffert (Hrsg.); "Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik", Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 5. Auflage 2007
- Brill, 2009** Michael Brill "Parametrische Konstruktion mit CATIA V5 - Methoden und Strategien für den Fahrzeugbau", Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 2009
- David-Shop, 2011** David-Online Shop, erreichbar unter https://ssl.david-vision-systems.de/shop/product_info.php/info/p84_DAVID-Starter-Kit.html, letzter Zugriff am 15.08.2011 um 20:00 Uhr
- David-Wiki, 2011** David-Online Wikipedia, -Erste Schritte, online verfügbar unter "http://www.david-laserscanner.com/wiki/benutzeranleitung/erste_schritte", letzter Zugriff am 15.08.2011 um 20:45 Uhr
- Gühring, 2002** Jens Gühring; "3D-Erfassung mittels Streifenprojektion", online verfügbar unter "http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2006/2715/pdf/Guehring_diss.pdf", letzter Zugriff am 15.08.2011 um 19:15 Uhr
- Hassler, 2004** Thomas Hassler, Beitrag "Flächenrückführung mit optischer und taktiler Sensorik" in "Quality Engineering", Ausgabe 12/2004, Konradin Verlag R. Kohlhammer GmbH, Leinfelden-Echterdingen
- Jäger, 1999** Wolfgang Jäger, Beitrag zur Tagung "Fahrzeugsürsysteme", Haus der Technik, Essen, 1999
- Koehldorfer, 2010** Werner Koehldorfer "Finite-Elemente-Methoden mit CATIA V5 / SIMULIA - Berechnung von Bauteilen und Baugruppen in der Konstruktion", Carl Hanser Verlag München, 3. Auflage 2010
- Schneefuss / Lender, 2008** C. Schneefuss, K. Lender; Skriptum der HAW Hamburg "Straken mit CAD an der HAW Hamburg", 2008
- TU Braunschweig Homepage, 2011** Homepage der Technischen Universität Braunschweig, Fachbereich Robotik und Prozessinformation, online verfügbar unter "<http://www.rob.cs.tu-bs.de/news/david/>", letzter

Zugriff am 05.06.2011 um 18:50 Uhr

**Zumbrunn / Cumberford,
2008**

Michael Zumbrunn, Robert Cumberford; "Auto-Legenden -
Klassiker in Stil und Design", Bassermann Verlag, München,
2008

8.2. Ermittelte Koordinaten der Karosseriepunkte durch Handmessung

Punkt	ZS1	ZS2	h	a	b	x	z
1	62,5	61	39	48,839	46,904	90,5	573,5
2	66,5	62	45	48,962	42,650	88,5	568
3	69,5	62	47	51,198	40,435	87,5	564,5
4	76,5	60,5	49,5	58,327	34,785	85,5	552,5
5	60,5	69,5	52	30,923	46,111	77,5	537
6	69	65,5	59,5	34,939	27,386	69,5	519
7	89,5	100	69	57,002	72,381	57,5	494,5
8	90,5	93	74	52,098	56,329	48	479,5
9	97	88,5	78	57,663	41,812	41,5	458
10	96	94	81,5	50,732	46,837	41,5	422
11	92,5	101,5	82	42,805	59,818	40,5	393
12	104,5	90	79,5	67,823	42,187	43	347,5
13	88,5	86	71	52,832	48,528	44	270,5
14	73,5	84	58,5	44,497	60,281	44	191
15	69	69	47	50,517	50,517	44	125
16	62,5	71,5	40	48,023	59,264	47,5	87
17	71	73,5	34	62,330	65,163	62,5	53
18	61,5	42	30	53,687	29,394	94	29
19	39	51,5	29,5	25,510	42,214	113	22
20	53,5	42	34	41,307	24,658	286,5	20,5
21	42	64	36	21,633	52,915	402	22
22	62,5	44	38	49,621	22,181	545,5	21
23	54	47	38	38,367	27,659	683	21,5
24	46,5	51	36	29,432	36,125	819,5	20,5
25	48,5	46	34	34,587	30,984	927	21,5
26	52,5	54	34	40,003	41,952	967	24
27	71,5	50	40	59,264	30,000	969	51
28	76	56	49	58,095	27,111	971,5	101

8.3. Ermittelte Koordinaten der Fensterscheibe durch Handmessung

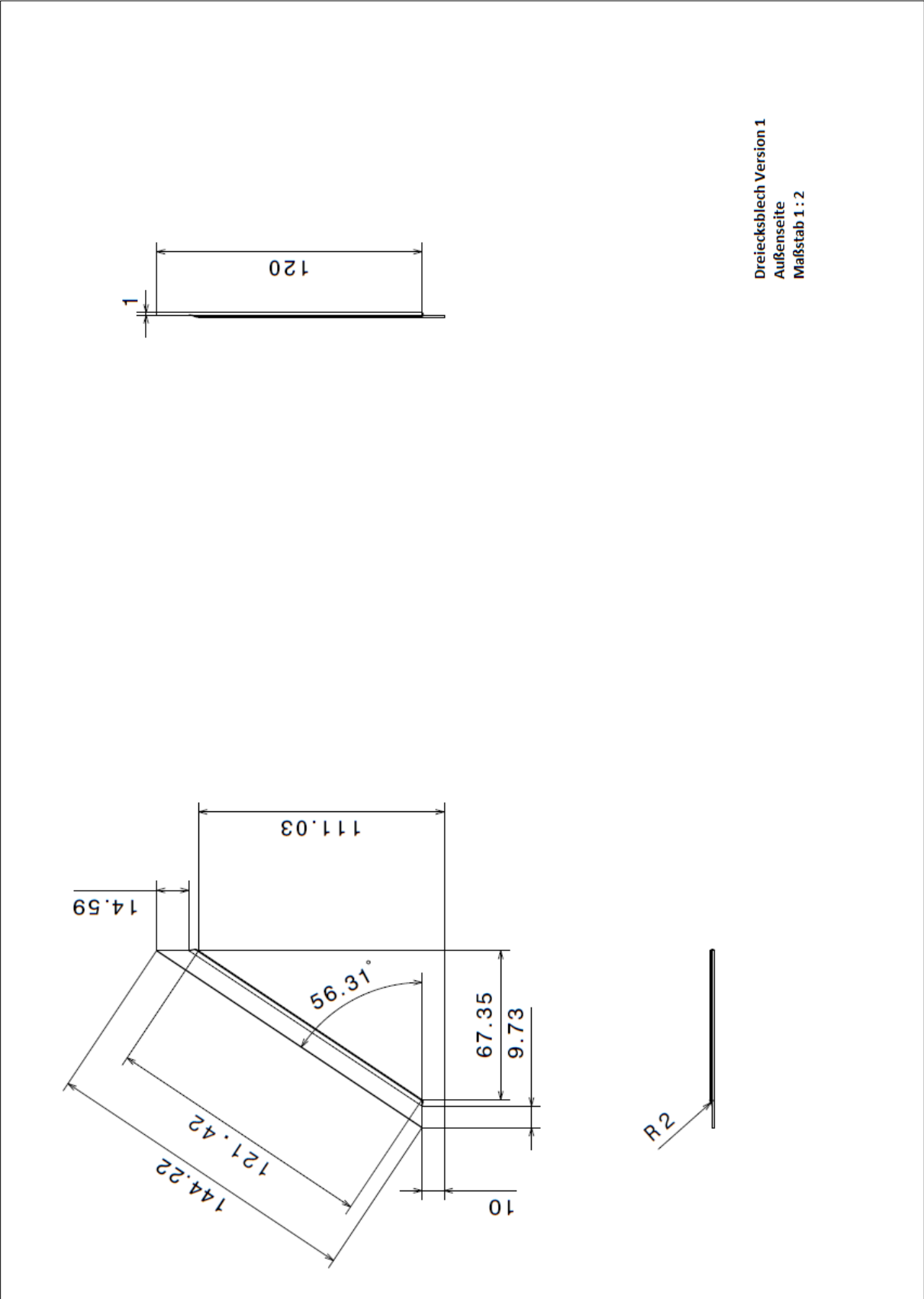
29	98	104,5	67	71,519	80,195	977,5	210
30	108	105	77	75,730	71,386	978,5	279
31	109	108,5	82	71,812	71,051	981,5	324,5
32	113	110	85	74,458	69,821	982	382,5
33	109	110	77	77,149	78,556	975	474
34	107	99,5	49	95,121	86,598	963	539,5
35	112	101	46	102,118	89,917	959,5	548
36	107	111,5	44	97,535	102,451	953	565,5
37	117	115	41	109,581	107,443	944	579
38	126,5	120	39,5	120,175	113,313	937	592,5
39	73,5	61	37	63,508	48,497	901,5	640,5
40	74,5	81,5	34	66,289	74,069	786	815,5
41	100,5	84	33	94,928	77,246	725	907,5
42	78	75,5	40	66,963	64,033	771	588,5
43	78	77,5	40	66,963	66,380	572,5	586,5
44	79,5	79,5	40	68,704	68,704	374	584
45	81	82	38,5	71,265	72,400	177	582
46	59,5	62	35	48,117	51,176	94	673
47	56,5	59	32	46,564	49,568	91,5	772,5
48	57	59	29	49,071	51,381	91	873,5
49	66,5	59,5	37	55,256	46,597	94,5	584

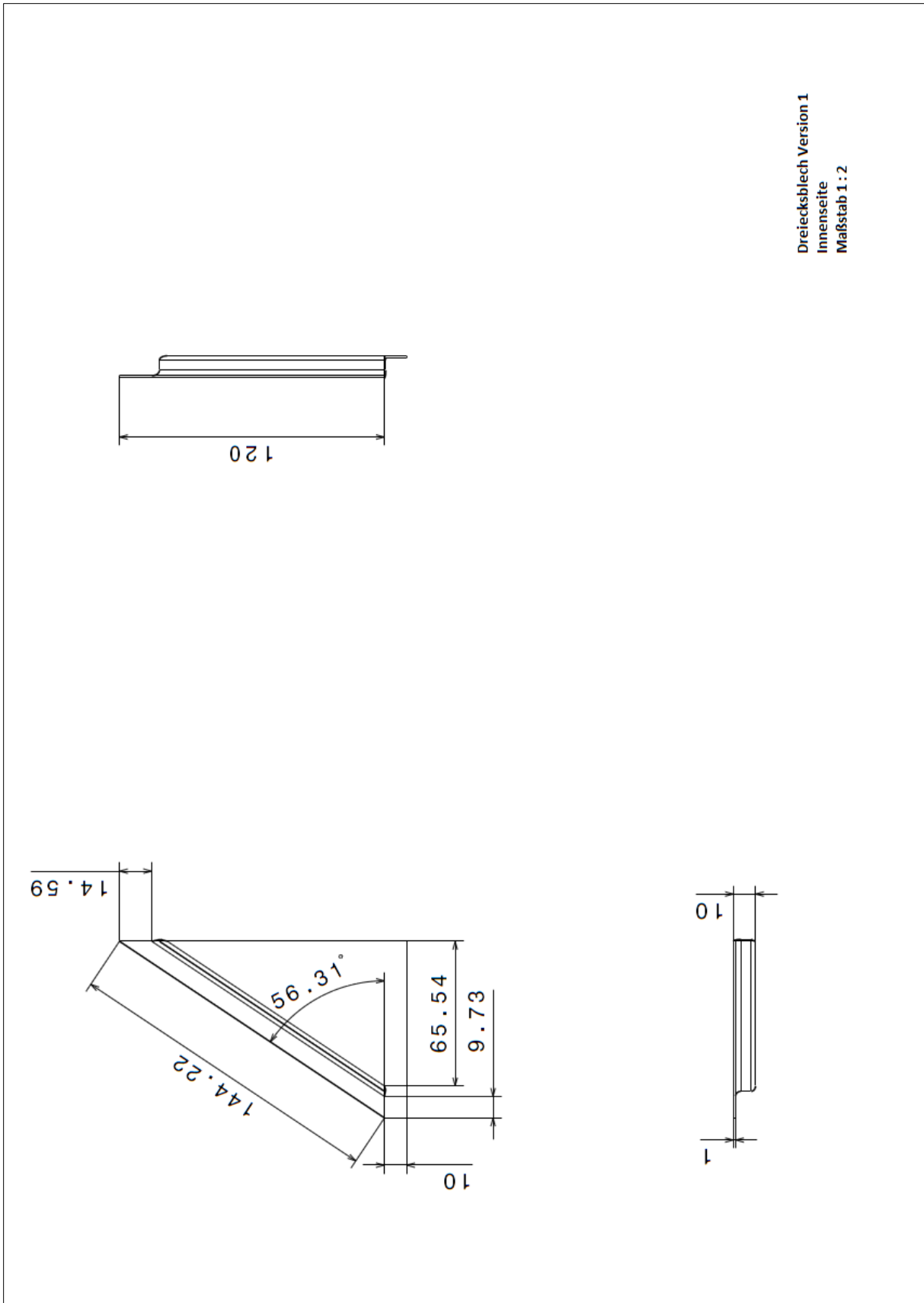
8.3. Ermittelte Koordinaten der Fensterscheibe durch Handmessung

Punkt	X	y	z
1	4,5	0	0
2	4,5	0	20
3	5	0	32
4	6,5	0	38
5	8,5	0	43,5
6	12,5	0	50
7	46	0	100
8	80	0	150
9	112,5	0	200
10	146,5	0	250
11	180	0	300
12	212,5	0	350
13	240	0	384,5
14	250	0	392
15	262	0	400

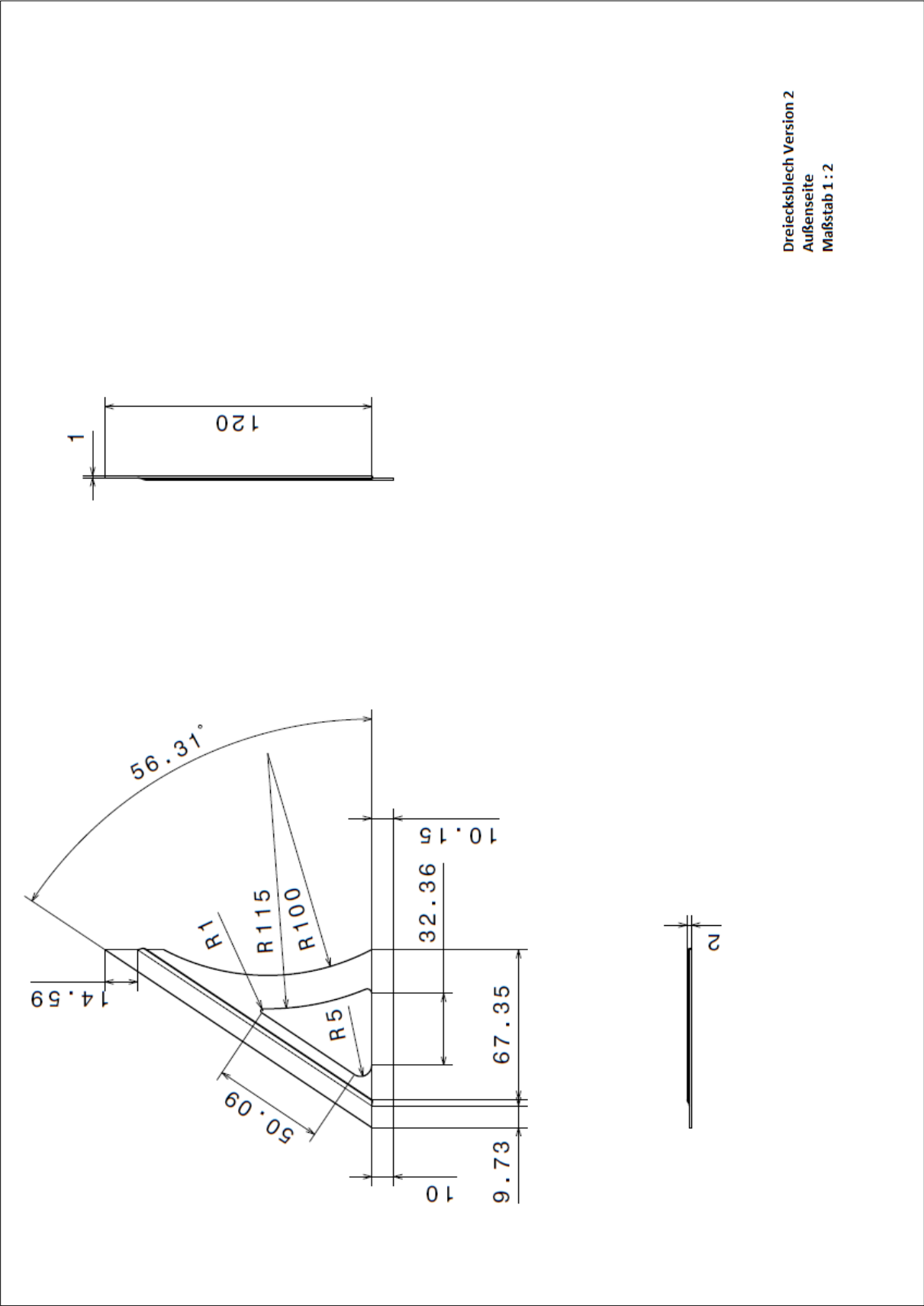
16	274	0	405
17	287,5	0	408
18	300	0	410,5
19	323	0	412
20	350	0	412
21	400	0	412
22	450	0	412
23	500	0	412
24	550	0	412
25	600	0	412
26	650	0	412
27	700	0	412
28	750	0	411,5
29	776	0	409,5
30	798	0	405
31	808,5	0	400
32	823	0	389,5
33	836,5	0	373,5
34	846,5	0	350
35	850	0	327,5
36	849	0	300
37	849	0	250
38	849	0	200
39	849	0	150
40	849	0	100
41	849	0	50
42	849	0	0
43	849	0	-20
44	4,5	0	-20

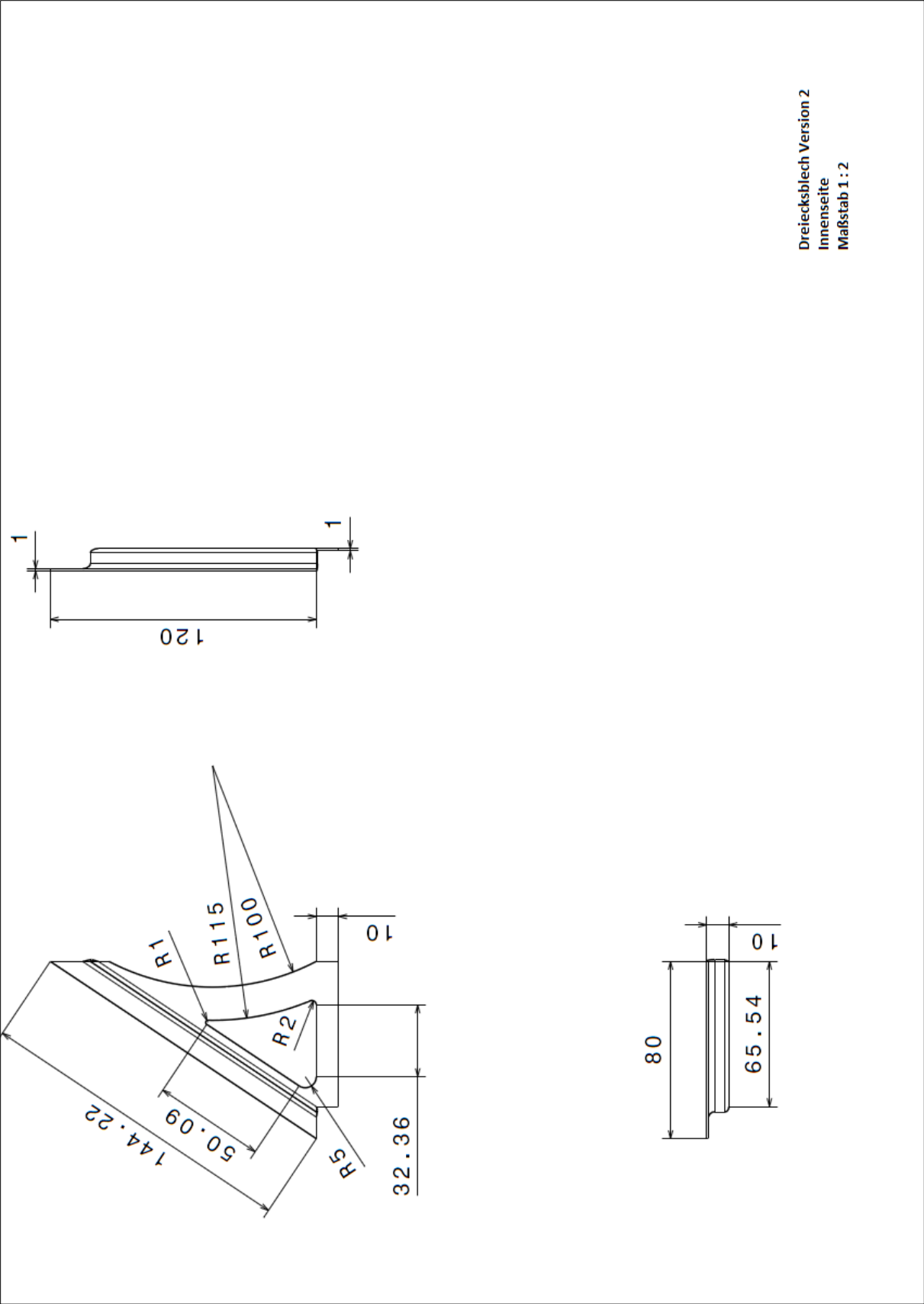
8.4. Zeichnungsableitung Dreiecksbleche Version 1



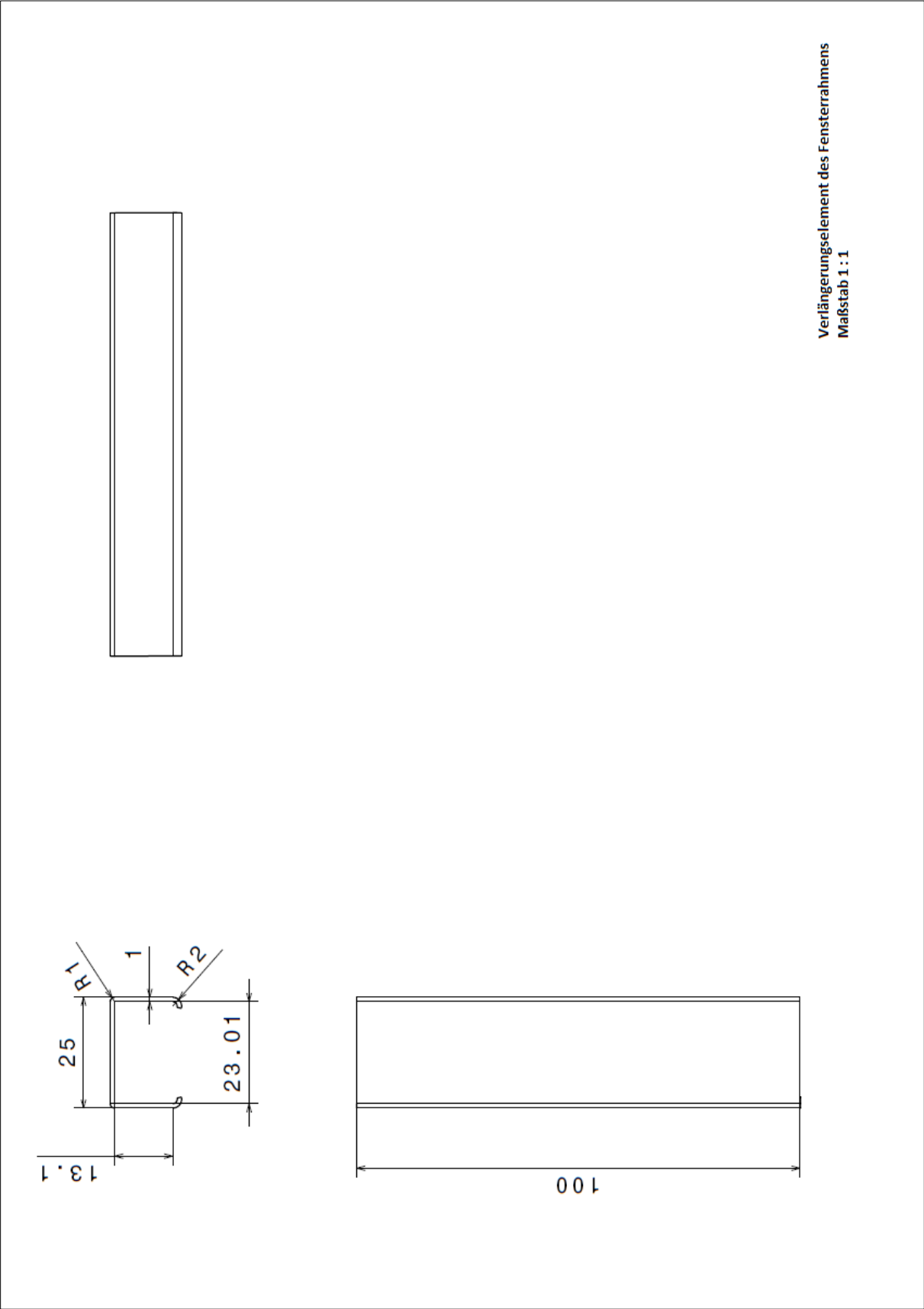


8.5. Zeichnungsableitung Dreiecksbleche Version 2



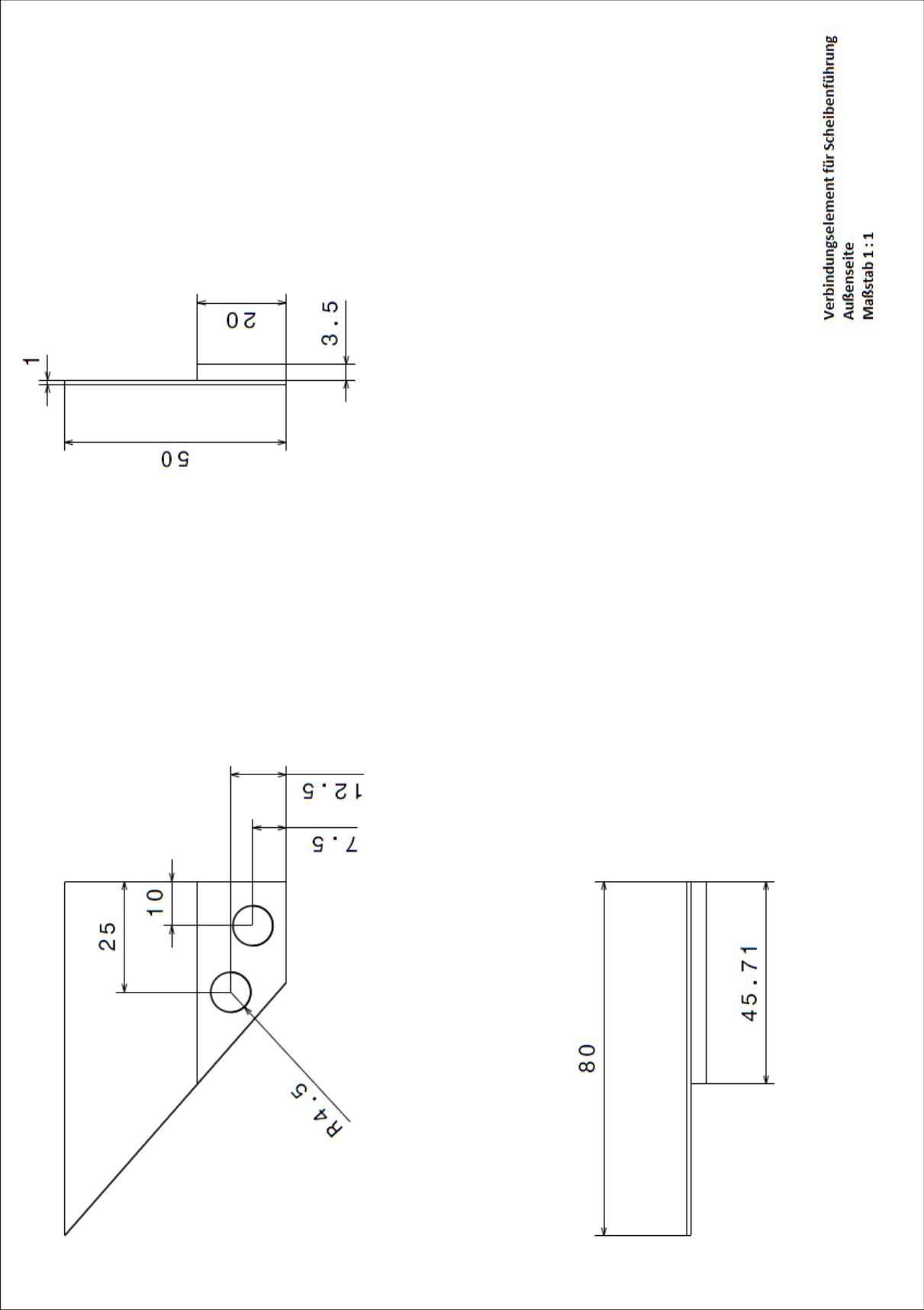


8.6. Zeichnungsableitung Verlängerungsstück Fensterrahmen

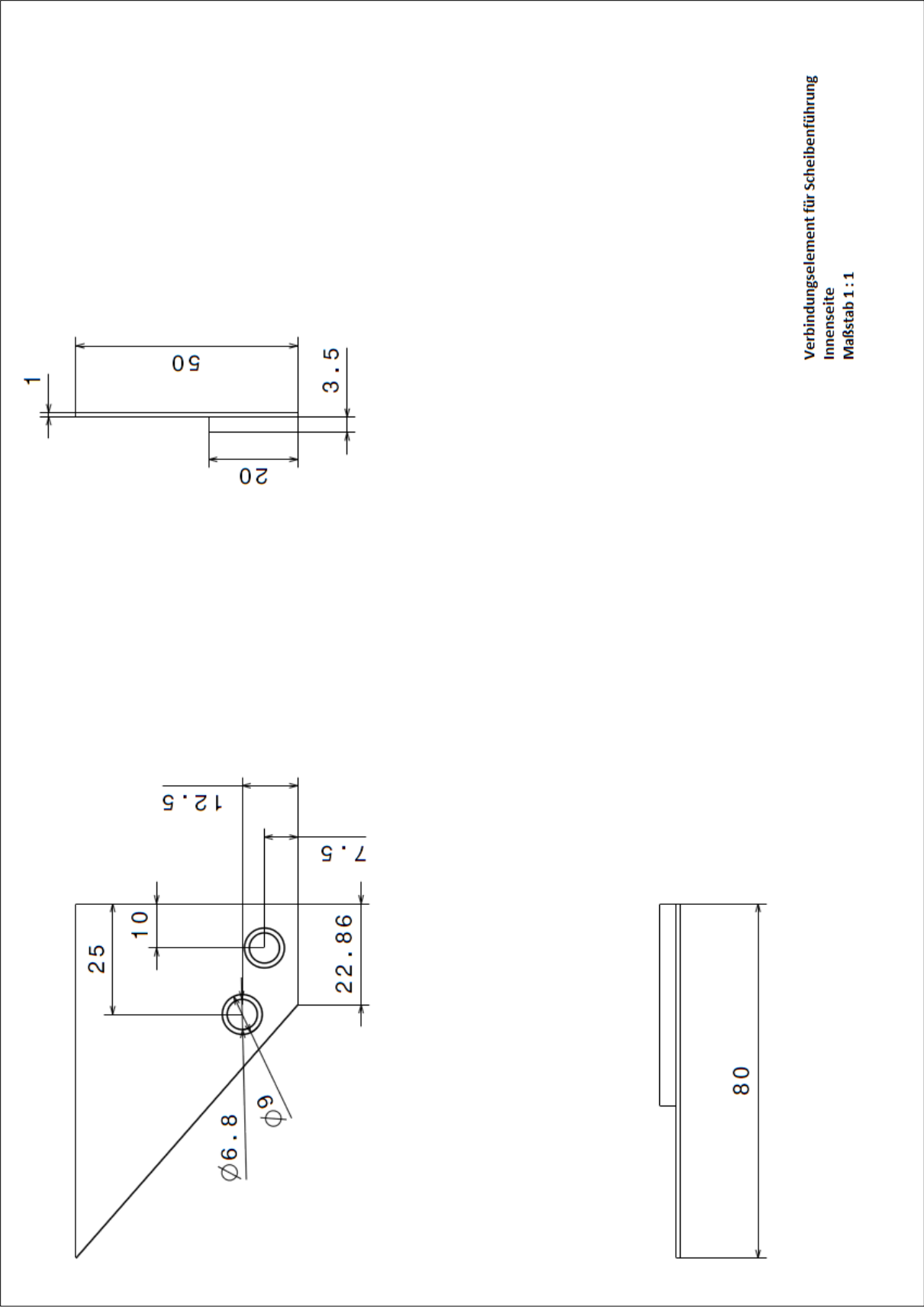


Verlängerungselement des Fensterrahmens
Maßstab 1 : 1

8.7. Zeichnungsableitung der Scheibenführungselemente



Verbindungselement für Scheibenführung
Außenseite
Maßstab 1 : 1



Verbindungselement für Scheibenführung
Innenseite
Maßstab 1 : 1

