

BAT

Solar Butterfly

Andre Gut

Betreuender Dozent: Dejan Romancuk

HSLU

Departement: Maschinentechnik

18.12.6969

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Sämtliche verwendeten Textausschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet.

Luzern 17. Februar 2021

Ort, Datum



Unterschrift

Abstract

Bla Bla

Inhaltsverzeichnis

I	Dokumentation	1
1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Vorgehen und Methodik	2
1.3	Theorie	2
1.4	Der Solar Butterfly	3
2	Anforderungen und Auslegungskriterien	4
2.1	Anforderungen an den Solar Butterfly	4
2.2	Auslegungskriterien	4
2.2.1	Aluminiumstrukturen	5
2.2.2	Sandwichstrukturen	5
2.2.3	Nieten	7
2.2.4	Klebeverbindungen	8
3	Lastenheft	9
3.1	Modus A: Fahren	10
3.2	Modus B: Ausfahren	14
3.3	Modus C: Ausgefahren	16
3.4	Failuremodes	18
4	Analyse der Struktur	23
4.1	Allgemeines	23
4.2	1.1 Vertikale Beschleunigung	23
4.3	1.2 - Longitudinale Beschleunigung negativ	24
4.4	1.4 Laterale Beschleunigung	24
4.5	1.5 Rotatorische Beschleunigung	25
5	FEM	25
6	Auslegung und Design	25
II	Anhang	25
A	Quellenverzeichnis	25
B	Abbildungsverzeichnis	26
C	Tabellenverzeichnis	26
D	Rissfortschritt	26
D.1	Zeichnungen	26
D.1.1	Zeichnung des Probenrohrlings - Erste Serie	26
D.1.2	Zeichnung des Probenrohrlings - Zweite Serie	26

III	Elektronischer Anhang	26
A	Elektronischer Anhang	26
A.1	Zeichnungen	26
A.1.1	Zeichnung des Probenrohrlings - Erste Serie	26
A.1.2	Zeichnung des Probenrohrlings - Zweite Serie	26

Teil I

Dokumentation

1 Einleitung

Der Klimawandel äussert sich in der Schweiz überdurchschnittlich. So ist die mittlere Jahrestemperatur in der Schweiz seit Messbeginn im Jahre 1864 um 2 °C gestiegen, was rund doppelt so stark wie ist das globale Mittel. In der Schweiz wird rund ein Drittel aller Treibhausgasemissionen durch den Verkehr (ohne internationaler Flug- und Schiffsverkehr) verursacht [1]. Um das *Netto-Null-Ziel* der *Langfristigen Klimastrategie der Schweiz* zu erfüllen, müssen daher unter anderem im Verkehrssektor Veränderungen vorgenommen und Entwicklungen getätigt werden. Louis Palmer, ein Schweizer Umweltaktivist und "Macher", umrundete im Jahr 2004 als erster mit dem Solarfahrzeug *Solartaxi* die Erde und gilt somit als ein Pionier im Bereich der Elektromobilität.

Sein neuestes Projekt ist der *Solar Butterfly* - ein autarker Wohnwagen, mit welchem er "eine Reise zu den Klimälösungen dieser Welt [...] im ersten solar betriebenen «Mobile Home» der Welt" antreten will. Die erneute Weltumrundung soll dieses mal mit "etwas mehr Komfort" geschehen. Seine Vision ist es, ein Wohnwagen, mit zwei Ausziehbaren Wohn-Modulen und rund 100 m² integrierte Photovoltaik-Fläche, zu realisieren. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll, in Zusammenarbeit mit drei weiteren Studenten der HSLU, seine Vision in die Realität umgesetzt werden.

Das Projekt wurde neben dieser Arbeit in die weiteren Teilgebiete *Auslegung Klappmechanismen*, *Auslegung Antriebstechnik* und *Auslegung Solar Butterfly (Globales CAD)* eingeteilt.

Das Auslegen der Klappmechanismen beinhaltet das Entwerfen und Dimensionieren aller beweglichen Teilen wie die klappbaren Panels und den Ausfahrmechanismus der Seitenmodulen. Die Arbeit *Auslegen der Antriebstechnik* befasst sich mit der Technik, mit welcher die beweglichen Bauteile in Bewegung gesetzt werden. Im Teilgebiet *Auslegung Solar Butterfly (Globales CAD)* werden die jeweiligen Teilgebiete zusammengeführt. Ebenfalls beinhaltet diese Aufgabenstellung das Erstellen eines globalen CAD-Modells, das Zusammentragen der allgemeinen Anforderungen sowie eine Risikobewertung.

Diese Arbeit, welche zum Teilgebiet *Auslegung Grundstruktur Solar Butterfly* gehört, befasst sich mit der Festlegung der Auslegungskriterien, der Ausarbeitung eines detaillierten Lastenheftes sowie die Betrachtung der Grundstruktur

1.1 Aufgabenstellung

Der Fokus dieses Teils der Arbeit liegt im Ausarbeiten der Auslegungskriterien (Lastenheft) und der Dimensionierung der Grundstruktur inklusive Lastenleitungen. Dabei soll auch ein globales FEM zur Anwendung kommen (z.B. zur Bestimmung von Schnittgrössen für Handrechnungen). Zulässige Festigkeitswerte sollen abhängig von der gewählten Bauweise abgeschätzt werden ("Design-Allowables") und mittels Test bestätigt werden.

- Schnittgrössen für Handrechnungen
- ("Design-Allowables") und mittels Test bestätigt

1.2 Vorgehen und Methodik

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie beim Lösen der Aufgabenstellung vorgegangen wird. Die Struktur des vorliegenden Dokumentes entspricht dabei dem nun vorgestellten Vorgehen

In einem ersten Schritt wird definiert, welchen Anforderungen der Solar Butterfly, von einem Festigkeits-Standpunkt aus betrachtet, gerecht werden muss. Weiter werden die Auslegungskriterien bestimmt. Sie beschreiben im Detail, nach welchen Kriterien die einzelnen Komponenten des Solar Butterflys ausgelegt werden. So wird zum Beispiel beschrieben, welche Kriterien die Sandwichplatten erfüllen müssen, dass diese bei Belastungen auf Druck nicht Knicken.

Anschliessend wurde ein Lastenheft erstellt, welche eine Zusammenstellung von verschiedenen Lastfällen darstellt, welchen der Solar Butterfly ausgesetzt werden könnte. Für diese Lastfälle - und Kombinationen davon - wird der Solar Butterfly ausgelegt.

Als nächster Schritt wird die festigkeitstechnischen Funktionen der einzelnen Komponenten analysiert. Es wird zum Beispiel analysiert welche Funktionen das Dach des Solar Butterfly übernehmen muss und wie dieses Idealisiert betrachtet werden kann. Das Ergebniss dieser Analyse ist das erlangte Verständniss für Belastungsarten und idealisierte Kraftverläufe durch die Komponenten und Struktur des Solar Butterflys für verschiedene Lastfälle. Mit der Hilfe dieser Analyse können die verschiedenen Komponenten grob ausgelegt und Verbindungen zwischen den Komponenten optimal konstruiert werden.

In einem letzten Schritt wird der Solar Butterfly in FEM-Analysen verschiedenen Lastkombinationen ausgesetzt um so Lastpfade und Schnittkräfte zu bestimmen, anhand welche die Komponenten definitiv ausgelegt werden können. Weiter können in den FEM-Analysen für die Funktionstauglichkeit kritische Verformungen festgestellt werden, welche in der Konstruktion berücksichtigt werden müssen.

Iteratives Vorgehen. Vorallem in der Konstruktion. Erkenntnisse der Festigkeit müssen wieder ins Design einfließen usw.

1.3 Theorie

Leichtbau:

Als Einschränkung ist dabei zu berücksichtigen, dass hierdurch weder die Funktion noch die Sicherheit und Langlebigkeit /s. DIN EN 1993/ beeinträchtigt werden dürfen. Maßnahmen, mit denen man dies heute zu erreichen versucht, sind: - Umsetzung des Integrationsprinzips, - Wahl leichter und hochfester Werkstoffe, - neue Herstelltechnologien - analytische Beherrschung der Beanspruchungs- bzw. Instabilitätsfälle durch hochwertige Analysemethoden (FEM, BEM).

Im Zuge der Umsetzung dieser Prinzipien kommen bestimmte Entwurfsstrategien /BLE 74/ zum Tragen, deren Merkmale sich verkürzt klassifizieren lassen in einen Form- oder Funktionsleichtbau, bei dem integrative Konstruktionslösungen, dünnwandige Querschnittsgeometrien und eindeutige Kraftleitungspfade umgesetzt werden; einen Stoffleichtbau, bei dem spezifisch schwere Werkstoffe durch leichtere Werkstoffe mit möglichst hohen Gütekennzahlen substituiert werden; einen Fertigungsleichtbau, in dem alle technologischen Möglichkeiten ausgeschöpft werden, um das Ziel der Funktionsintegration (Einstückigkeit) bei geringstem Materialeinsatz und minimalem Fügeaufwand zu realisieren und einen Sparleichtbau, mit dem Ziel hohe Kosten zu vermeiden durch eine gerade noch ausreichende Werkstoffqualität, minimalem Werkstoffeinsatz und vereinfachte Herstellung. (S16)

Da ein typisches Einsatzgebiet von Leichtbaukonstruktionen die Verkehrstechnik (Automobil-

bau, Schienen- und Luftfahrzeuge) ist, dürfen Leichtbaukonstruktionen nicht „unsicherer“ als vergleichbare Massivkonstruktionen sein. Dies bedingt eine sorgfältige Auslegung auf Steifigkeit (Instabilitäten), Bruchfestigkeit sowie Zuverlässigkeit und Nutzungsdauer. (S20)

Die Philosophie des „safe-life-quality“, die absolute Schadensfreiheit für das ganze Leben verlangt, und die Philosophie des „fail-safe-quality“, die Schadenstoleranz und hinreichende Resttragfähigkeit voraussetzt. Dem Ziel nach sollten alle erforderlichen Leichtbaumaßnahmen begründbar sein. (S21) Auslegungsphilosophie: Safe-Life-Quality: Absolute Schadensfreiheit für die angestrebte Lebensdauer Statistische Ausfallwahrscheinlichkeit Fail-Safe-Quality: Schadenstolerant Hinreichende Resttragfähigkeit

aufeinander aufbauende Arbeitsschritte mit etwa folgenden Inhalten: - Klären der Aufgabenstellung: Informationsbeschaffung über die Anforderungen einer Aufgabe und Erstellung einer Anforderungsliste; Eingrenzung bestehender Bedingungen und ihre Bewertung für die Lösungserfüllung; Festlegung einer Lösungsrichtung; technisch-wirtschaftliche Konsequenzen. - Konzipieren (Findung einer prinzipiellen Lösung): Hinterfragung der Aufgabe und Sichten des Kernproblems; Zerlegung des Kernproblems in untergeordnete Teilprobleme; Suche nach Lösungswegen zur Erfüllung der Teilprobleme; Kombination der Teilproblemlösungen zu Lösungsansätzen für das Kernproblem; Bewertung der Lösungen; Erstellung von Konzeptskizzen. Voraussetzungen einer sinnvollen Konzepterstellung sind Kenntnisse über die Größe und Richtung der wirkenden Kräfte, die Möglichkeiten des gewählten Werkstoffs, die Bauweiseigenschaften und eine angepasste Vordimensionierung. Ein gutes Konzept ist letztlich auch der Garant für eine innovative Problemlösung. Der Konzeptentwicklung sollte daher große Bedeutung beigemessen werden. - Entwerfen (gestalterische Konkretisierung einer Lösung): maßstäbliche Ausarbeitung der Konzeptskizzen zu Bauvarianten; Bewertung, Vereinfachung und Auswahl einer Variante; Überarbeitung zu einem Gesamtentwurf und - Ausarbeiten (fertigungs- und montagegerechte Festlegung einer Lösung): endgültige Bestimmung der Geometrie, Dimensionen, Werkstoffe und Herstellung, um die notwendigen Fertigungsunterlagen erstellen zu können.

Hieran schließen sich eine oder mehrere Schleifen an, die der Optimierung der Lösung dienen. Dem zuzuordnende Phasen sind: - Prototypen-Herstellung (Kontrolle der Funktionen, Montage etc.), - Testprozeduren (Überprüfung der Tragfähigkeit, Zuverlässigkeit, Lebensdauer).

FEM Die FEM ist eine rechnerorientierte Methode, die softwaretechnisch über einen Vorrat an mechanischen Grundelementen (Balken, Scheibe, Platte, Schale, Volumina), einen Zusammenbau und einen Lösungsalgorithmus verfügt.

S206 Abb.

1.4 Der Solar Butterfly

Ziel: Überblick vermitteln. Funktionalität veranschaulichen, Begriffe Definieren.

Chassis, Hauptkörper, Seitenteil, Küche, Bad, Stützen, Panelen Gross, Panelen Klein

2 Anforderungen und Auslegungskriterien

In diesem Kapitel wird beschrieben, welchen Anforderungen der Solar Butterfly und dessen Komponenten gerecht werden müssen. In einem ersten Schritt werden auf die allgemeinen Anforderungen des Solar Butterflys und anschliessen auf die daraus resultierenden Auslegungskriterien der einzelnen Komponenten eingegangen. Es wird beschrieben, was die Anforderungen konkret für die einzelnen Komponenten bedeuten und wie gewährleistet wird, dass diese erfüllt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich auf diejenigen Anforderungen eingegangen, welche für die strukturelle Auslegung und Festigkeitsberechnungen relevant sind. Die komplette Liste der Anforderungen an den Solar Butterfly ist in der Arbeit von [HUBER] zu finden.

2.1 Anforderungen an den Solar Butterfly

- Der Solar Butterfly muss den Angreifenden Kräften und herrschenden Lastfällen standhalten. (Vgl. Lastenheft [KAPITEL]) Konkret bedeutet dies, dass die Struktur sich in den verschiedenen Lastfällen, und Kombinationen davon, nicht plastisch verformen darf und somit eine genügend grosse Sicherheit gegen Fließen und Instabilitäten wie Knickung aufweisen muss.
- Weiter darf der Solar Butterfly sich nicht so stark verformen, dass seine Funktionstauglichkeit eingeschränkt wird. Die konkreten Anforderungen an die Verformbarkeit der einzelnen Komponenten des Solar Butterflys werden bei deren Abhandlung genauer betrachtet und beschrieben.
- Palmer will mit dem Solar Butterfly ein nachhaltiges und langlebiges Produkt entwickeln, was umgesetzt wird in dem eine *Safe-Life-Quality* in der Auslegung angestrebt wird, welche “die absolute Schadensfreiheit für das ganze Leben” verlangt [4]. Diese Anforderung an die Langlebigkeit wird erreicht, indem der Solar Butterfly für die Dauerfestigkeit ausgelegt wird. Für die Grobauslegung bedeutet dies konkret, dass die Ermüdung mit einer entsprechenden Wahl der Design-Allowables pauschal abgedeckt wird und dass Spannungserhöhungen mit gutem Design vermieden werden.

2.2 Auslegungskriterien

Nachdem die allgemeine Anforderung an den Solar Butterfly abgehandelt wurden, wird in diesem Unterkapitel beschrieben, was diese Anforderungen für die einzelnen Komponenten und Strukturelemente bedeutet. Es wird erläutert mit welchen Methoden die Auslegung angegangen wird und welche Vereinfachungen getroffen werden.

Design-Allowables Design-Allowables: Materialkennwerte mit welchen die Auslegung gemacht wird.

In diesem Materialkennwerte sind die Sicherheitsfaktoren drinnen und die Absicherung gegen Ermüdung.

2.2.1 Aluminiumstrukturen

Zu den Auslegungskriterien der Aluminiumstrukturen gehört das Festigkeitsproblem der plastischen Verformung (Fliesen) und das Stabilitätsproblem der Knickung. Die Aluminiumstrukturen werden so ausgelegt, dass diese eine Sicherheit gegen Fliesen von 1.5 und gegen Knicken eine von 2 aufweisen.

Sicherheit gegen Fliesen Um die Sicherheit eines Strukturelementes gegen Fliesen zu gewährleisten, wird überprüft, ob die *Von Mises*-Vergleichsspannung kleiner als die zulässige Spannung ist. Die *Von Mises*-Vergleichsspannung kann gemäss der Formel 1 berechnet werden [2].

$$\sigma_{zul} \geq \sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2} \quad (1)$$

Wobei die Annahmen getroffen werden, dass es sich um einen ebenen Spannungszustand handelt und die angreifenden Lasten dem selben Lastfall angehören.

Knicken Wird durch design verhindert (?)

2.2.2 Sandwichstrukturen

Versagenskriterien der Sandwichstrukturen können in die beiden Kategorien *Festigkeitsprobleme* und *Stabilitätsprobleme* eingeteilt werden [3]. Zu den Festigkeitsproblemen gehören;

- Fliesen der Deckschicht,
- Schubbruch der Kernschicht,
- Delamination und
- Ermüdung.

Zu den Stabilitätsproblemen gehören unter anderem;

- Knickung,
- Schubbeulung der Kernschicht (Shear Crimping) und
- Kurzweiliges Beulen der Deckschicht (Wrinkling).

Die auszulegenden Sandwichstrukturen werden gegenüber diesen Festigkeits und Stabilitätsproblemen abgesichert. Um den Rechenaufwand und die Komplexität zu verringern werden Annahmen und Vereinfachungen getroffen. Für die Auslegung von Sandwichstrukturen können folgende Annahmen getroffen werden [3][4];

- linear elastische und isentrope Materialverhalten,
- Eigenbiegesteifigkeiten der Deckschichten sind vernachlässigbar,
- Dehnsteifigkeit der Kernschicht ist vernachlässigbar und
- die Kernschicht lässt sich nicht zusammendrücken.

Aus den getroffenen Annahmen resultiert ein vereinfachter Spannungszustand welcher besagt, dass die Deckschichten jeweils die Normalkräfte und die Kernschichten die Schubkräfte aufnehmen. (Sandwichmembrantheorie)

Festigkeitsprobleme Aus den getroffenen Annahmen und Vereinfachungen lassen sich die Formeln 2 und 3 herleiten. Mit der Formel 2 lassen sich die Spannungen in den Deckschichten berechnen. Die Dicke der Deckschicht wird so gewählt, dass die zulässige Spannung höher liegt als jene, welche in der Deckschicht herrscht.

$$\sigma_{zul} \geq \sigma_d = \frac{1}{t_d} \cdot \left(\frac{n}{2} \pm \frac{m}{h} \right) \quad (2)$$

Mit der Formel 3 lassen sich die Schubspannungen in der Kernschicht berechnen und somit Aussagen über ihre Resistenz gegenüber dem Schubbruch machen. Die Dicke der Kernschicht wird so ausgelegt, dass die in der Kernschicht herrschenden Spannungen tiefer liegen als die zulässigen.

$$\tau_{k,zul} \geq \tau_k = \frac{q}{t_k} \quad (3)$$

Die Delamination der Deckschichten wird abgesichert, indem die Auswahl des Klebers, oder im Falle einer Laminierung die Wahl des Matrixwerkstoffes, so getroffen wird, dass dieser eine höhere Schubfestigkeit aufweist als das Material der jeweiligen Kernschicht.

Stabilitätsprobleme Die Stabilitätsprobleme der Sandwichstrukturen lassen sich in globale und lokale Instabilitäten einteilen. Zur globalen Instabilität gehört das Knicken, welches sich aus der Euler-Knickung des schubsteifen Balkens und dem Schubknicken zusammensetzt. Die kritische Belastung, bei welcher es zur Euler-Knickung kommt, lässt sich gemäss Klein [4] mit der Formel 4 berechnen.

$$F_{kB} = \frac{\pi^2 \cdot E_d \cdot I_y}{l_k^2} \quad (4)$$

Wobei sich die Biegesteifigkeit I_y vereinfacht gemäss der Formel 5 berechnen lässt. Hier wurde die Annahme getroffen, dass die Eigenbiegesteifigkeiten der Deckschichten vernachlässigbar sind. Diese Annahme kann gemäss Klein [4] ab einem Verhältnis von t_d zu t_k von 0.25, getroffen werden.

$$I_y = 2 \cdot b \cdot t_d \cdot \left(\frac{t_k}{2} + t_d \right)^2 \quad (5)$$

Die kritische Schubknicklast lässt sich gemäss Klein [4] mit der Formel 6 berechnen.

$$F_{kS} = b \cdot t_k \cdot G_k \quad (6)$$

Die totale kritische Knicklast F_k ergibt sich dann aus der Formel 7:

$$F_{k,vorh.} \leq F_k = \frac{1}{\frac{1}{F_{kB}} + \frac{1}{F_{kS}}} \quad (7)$$

Zu den lokalen Instabilitäten zählen das Schubbeulen und das Knittern der Deckschicht. Die kritischen Spannungen, bei welcher Schubbeulung auftritt, lässt sich aus den Formel 8 berechnen. [3]

$$\sigma_k = G_k \cdot \frac{h}{2 \cdot t_d} \quad (8)$$

Tabelle 1: Design-Allowables Sandwichplatten

Bezeichnung		Einheit	Sicherh. Fakt.	Zul. Festigkeit
Deckschicht				
Aluminium	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$	2710	
	E-Modul	MPa	70'000	
	Zugfestigkeit	MPa	150	1.5 $\sigma_{zul} = 100$
	Dauerfestigkeit	MPa	100	1.5 $\sigma_{D,zul} = 75$
GFK	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$	2000	
	E-Modul	MPa	16'000	
	Zugfestigkeit	MPa	250	1.5 $\sigma_{zul} = 66$
	Dauerfestigkeit	MPa	50	1.5 $\sigma_{D,zul} = 33$
Kern				
Airex T92.60	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$	65	
	E-Modul (Druck)	MPa	55	
	Schubmodul	MPa	15	
	Schubfestigkeit	MPa	0.55	1.5 $\tau_{zul} = 0.5$
Airex T92.80	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$	85	
	E-Modul (Druck)	MPa	75	
	Schubmodul	MPa	22	
	Schubfestigkeit	MPa	0.72	1.5 $\tau_{zul} = 0.6$

Die kritischen Spannungen, bei welcher das Knittern der Deckschicht auftritt, lässt sich mit der Formel 9 berechnen. [3]

$$\sigma_k = k_s \sqrt[3]{E_d \cdot E_k \cdot G_k} \quad (9)$$

Wobei für Auslegungen $k_s = 0.5$ gilt.

Design-Allowables und Materialkennwerte

2.2.3 Nieten

Laut Klein [4] gehört zum Tragfähigkeitsnachweis für gewöhnlich ein Abscher- und Lochleibungsnachweis. Insofern sei für Nietverbindungen ein Nachweis auf Scherbruch (Formel 10) und Lochleibung (Formel 11) zu erbringen:

$$F \leq F_{SB} = \frac{d_N^2 \cdot \pi}{4} \cdot \tau_B \quad (10)$$

$$F \leq F_{LF} = d_N \cdot t \cdot \sigma_{FL} \quad (11)$$

Wobei d_N der Nietlochdurchmesser, τ_B die Scherfestigkeit, t die Blechdicke und σ_{FL} die Lochleibungs-Dehngrenze ist. Für dynamische Wechselfestigkeitswerte sei die Scherfestigkeit τ_B noch um den Faktor 2 bis 2.2 zu verringern.

Überlagerte Scher- und Zugbeanspruchung In der Praxis werden Nietverbindungen aus einer Kombination von Scher- und Zugbeanspruchung beansprucht. Der Nachweis der Tragfähigkeit der überlagerten Belastung wird durch die Ausweisung des Reservefaktors R_f bewerkstelligt.

Dazu werden gemäss den Formeln 12 und 13 der Schubreservefaktor R_s und der Zugreservefaktor R_z berechnet

$$F \leq F_{SB} = \frac{d_N^2 \cdot \pi}{4} \cdot \tau_B \quad (12)$$

$$R_z = \frac{F_z}{k \cdot F_{ZB}} \quad (13)$$

2.2.4 Klebeverbindungen

$$\tau_K = \frac{F}{b \cdot l_{ii}} \leq \frac{\tau_{KB}}{S} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{wechselnd} : \tau_{KW} &\approx (0.2 \dots 0.4) \cdot \tau_{KB} \\ \text{schwellend} : \tau_{KSch} &\approx 0.8 \cdot \tau_{KB} \end{aligned} \quad (15)$$

Design-Allowables und Materialkennwerte

Tabelle 2: Design-Allowables Kleber

Bezeichnung		Einheit		Sicherh. Fakt.	Zul. Festigkeit
Delo-Duopox [®] AD840	E-Modul	MPa	1700		
	Zugscherfestigkeit	MPa	5	3	$\sigma_{zul} = 1.6$
	Druckscherfestigkeit	MPa	26	3	$\sigma_{zul} = 8.6$
Sikaflex [®] -552 AT	Zugscherfestigkeit	MPa	2	3	$\sigma_{zul} = 0.6$

3 Lastenheft

In diesem Kapitel wird auf das Lastenheft eingegangen. Es wird beschrieben wie die Lastfälle bestimmt und definiert wurden.

Damit die Erklärung des Lastenheftes und der gesamte folgende Auslegungsprozess an sich verständlicher wird, werden zuerst die verwendeten Begriffe definiert.

Als *Modus* wird ein “Zustand” oder eine “Position” des Solar Butterflys verstanden. Modus *A* beschreibt zum Beispiel den Solar Butterfly im “Fahr-Modus”. In diesem Fall würde dies bedeuten, dass alle Panels, Stützen und Seitenmodule eingefahren sind. Es wird für jeden der vier definierten Modi ein FEM-Modell erstellt.

Als *Lastfall* wird eine Situation (z.B. Fahrt auf einer um 10° geneigten Strasse) oder eine Last (z.B. Personenlast) verstanden, welche in einem spezifischen Modus auftreten kann. Der Lastfall 1.1 im Modus *A* beschreibt zum Beispiel die vertikale Beschleunigung von 1.25 g welche durch das Überfahren einer Breschschwelle auftreten kann. Der Lastfall 1.1 im Modus *C* beschreibt eine Personenlast. Ein Lastfall ist vollständig definiert, wenn klar ist, wie dieser im jeweiligen FEM-Modell des betreffenden Modus, einzugliedern ist.

Der Lastfall 1.1 im Modus *A* ist nicht notwendigerweise der Selbe, wie der Lastfall 1.1 im Modus *B* oder *C*! Die klare Zuweisung der Lastfälle zu einem spezifischen Modus wurde vorgenommen, um die Anzahl der Lastfälle in den verschiedenen Modi gering zu halten und die daraus resultierenden Lastkombinationen pro Modus übersichtlicher zu gestalten. Dies führt mit sich, dass gewisse Lastfälle in mehreren Modi vorkommen und dass dadurch einige Lastfälle doppelt aufgeführt werden. So wird zum Beispiel der Lastfall *Neigung Stehend* im Modus *B* und *C* aufgeführt, da die Situation des geneigten Bodens im parkierten Zustand in beiden Modi auftreten kann. Alle Lastfälle welche in diesen Modi nicht auftreten, können jedoch weggelassen werden, wodurch - wie bereits erwähnt - das Lastenheft übersichtlicher gestaltet werden kann.

Zur Beschreibung eines Lastfalles gehört eine Bewertung des dazugehörenden *Risikos*. Ein *Risiko* setzt sich zusammen aus der Ungenauigkeit der Voraussage der Belastung und einer Abschätzung der “ernsthaftigkeit” der potentiellen Auswirkungen. Eine *Ungenauigkeit* von 0.5 bedeutet, dass von einer potentiellen Abweichung der Belastung von $\pm 50\%$ ausgegangen wird. Für die Werte der *Auswirkungen* wird kein klarer Massstab definiert. Sie nehmen einen Wert zwischen 0 und 100 an und beurteilen die Auswirkungen beim “Eintreten” der Ungenauigkeit. Das Produkt aus der Ungenauigkeit und der Auswirkung ergibt den Wert des Risikos. Ein hoher Risiko-Wert bedeutet nicht, dass die betreffende Last ein grosses Risiko für den Solar Butterfly darstellt, sondern, dass die Abschätzung der Last unsicher ist. Das soeben erläuterte Risiko ist also ein Mass für die Gefahr, sowie auch für das Potential, welches in der Abschätzung der Last steckt. Ein Risiko-Wert von 0 bedeutet ausgeschrieben, dass die Last mit grosser Sicherheit so auftreten wird, wie diese im Lastenheft beschrieben ist. Ein hoher Risiko-Wert bedeutet wiederum, dass man sich nicht sicher ist, ob die Last wie beschrieben auftreten wird. Die Last kann zu tief (daher die Gefahr), oder aber auch zu hoch (daher das Potential) gewählt worden sein. Lasten mit hohen Risiko-Werten sollen bei einer Überarbeitung des Lastenheftes erhöhte Beachtung geschenkt werden.

Als *Lastkombination* wird eine Kombination von verschiedenen Lastfällen verstanden. Eine Lastkombination bezieht sich jeweils auf einen Modus. Die Lastkombination A.3.1.2 setzt sich zusammen aus dem Modus *A* und den Lastfällen 1.3 *Longitudinale Beschleunigung - Negativ*, 2.1 *Wind von links* und 3.2 *Neigung längs negativ* aus dem Modus *A*.

Ein Blick in das Lastenheft im Anhang [ANHANG] wird das soeben beschriebene verständlicher machen.

Missbrauchslastfälle und Dynamik Missbrauchslastfälle: Werden nur für die einzelnen Komponenten berücksichtigt. Weil aufwand sons zu gross?

Die Dynamik der Lastfälle wird in der Grobauslegung nicht ausführlich betrachtet. Der Solar Butterfly wird jeweils für den Maximalwert - die Amplitude - eines Lastfalles statisch ausgelegt. Die Dynmaik der Lastfälle und die daraus resultierende potentielle Ermüdung der Materialien werden mit entsprechend gewählten Design-Allowables abgedeckt.

Folgend werden die drei Modi mit den dazugehörigen Lastfällen vorgestellt. Es wird jeweils beschrieben, wie die Lasten zustande kommen und wie diese in den FEM-Modellen eingegliedert werden.

3.1 Modus A: Fahren

Der Modus A beschreibt den Solar Butterfly im “Fahr-Modus” und ist in der Abbildung 1 dargestellt. Konkret bedeutet dieser Modus, dass alle Panels und Seitenmodule eingefahren und über die Verschlüsse fest mit dem Rest des Aufbaus verbunden sind. Ebenfalls sind die alle Stützen eingefahren. Im Fahr-Modus befinden sich keine Personen im Solar Butterfly und das Mobiliar ist an den dafür vorgesehenen Stellen verstaut. Weiter herrscht in allen Lastkombinationen die Erdbeschleunigung von 1 g. Der Lastfall von 1 g wird nicht spezifisch aufgeführt.

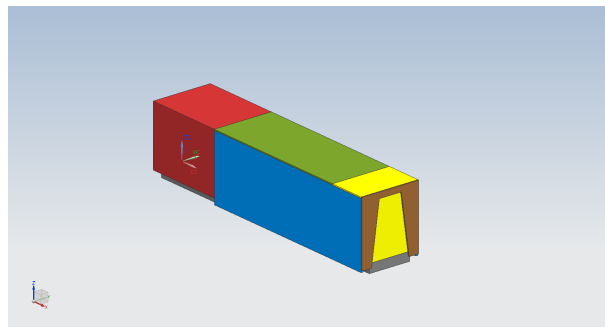


Abbildung 1: Modus A

Beschleunigungen durch Fahren

1.1 Vertikale Beschleunigung

Zusätzlich zur vertikalen Beschleunigung durch die Erdanziehung, entstehen durch das Überfahren von Schlaglöcher und Bremsschwellen vertikale Beschleunigungen.

In einem ersten Ansatz die Beschleunigung beim Überfahren einer Bresmmschwelle zu bestimmen, wurde der Solar Butterfly als ein *Ein-Massen-Schwinger*-System modelliert und die Beschleunigung beim Überfahren einer Sinusförmigen Bremsschwelle numerisch ermittelt.

Die Position des Rades während dem Überfahren der Bremsschwelle ist gegeben durch folgenden Zusammenhang:

$$x_r^n = h \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{n\Delta t \cdot v}{l}\right) \quad (16)$$

l steht dabei für die Länge, und h für die Höhe der Bremsschwelle.

Um die Beschleunigung des Solar Butterflys zu berechnen, wird in einem ersten Schritt dessen Position zum Zeitpunkt n x_{SB}^n aus der vorangehenden Situation berechnet.

$$x_{SB}^n = x_{SB}^{(n-1)} + v^{(n-1)} \cdot \Delta t \quad (17)$$

Als nächstes wird der Federweg s^n , sowie die Änderungsrate des Federwegs v_s^n zum Zeitpunkt n aus den Positionen des Rades r_x^n und des Solar Butterflys x_{SB}^n berechnet.

$$s^n = x_r^n - x_{SB}^n \quad (18)$$

$$v_s^n = \frac{s^n - s^{(n-1)}}{\Delta t} \quad (19)$$

Die Beschleunigung des Solar Butterfly ergibt sich dann zu:

$$a_{SB}^n = \frac{k \cdot s^n + d \cdot v_s^n}{m} \quad (20)$$

Wobei k für die Federkonstante und d für die Dämpfungskonstante stehen. Die aus der Beschleunigung des Solar Butterfly resultierende neue Geschwindigkeit, kann wie folgt berechnet werden.

$$v^n = v^{(n-1)} + a_{SB}^n \cdot \Delta t \quad (21)$$

Das *Ein-Massen-Schwinger*-Modell wurde mit einer Masse von 2200 kg, einer mittleren Federkonstante, gegeben aus den Datenblättern des Herstellers [ANHANG], von 353'000 N/m und einer Dämpfungskonstante von 3500 Ns/m modelliert. Beim Überfahren einer Bremsschwelle von 0.9 m Länge und 0.1 m Höhe mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h resultiert eine maximale Beschleunigung von rund 1.6 g. Die Berechnung ist im elektronischen Anhang [Elektronischen Anhang] einsehbar.

Zu der Berechnung muss gesagt werden, dass davon ausgegangen werden kann, dass die erhaltene Beschleunigung zu hoch liegt. So wurde zum Beispiel die Federung durch die Reifen nicht berücksichtigt. Weiter befindet sich der Massenschwerpunkt nicht in der Federachse, was eine weitere Abminderung der Beschleunigung zur Folge hat.

Um die zu wählende Beschleunigung breiter abstützen zu können, wurden andere Arbeiten zum Thema herbeigezogen. *Janczur* [5] zeigt, dass beim Überfahren einer Bremsschwelle von 0.36 m Länge und einer Höhe von 0.05 m, mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h, in der Fahrzeugmitte eines Personenwagens, Beschleunigungen von 0.71 g herrschen. Direkt über der Fahrzeugachse treten Beschleunigungen von bis zu 1.5 g auf.

García-Pozuelo et al. [6] massen in der Fahrzeugmitte eines Personenwagens Beschleunigungen von 0.73 g beim Überfahren einer Bremsschwelle von 0.9 m Länge und 0.1 m Höhe. Dies bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h.

Haniszewski et al. [7] massen Beschleunigungen, welche eine Person auf der Rückfahrbank eines Personenwagens während dem Überfahren einer Bremsschwelle erfährt. Sie massen Beschleunigungen von bis zu 1 g. Direkt über der Fahrzeugachse wurden Beschleunigungen von 1.3 g gemessen. Dies bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h und einer Bremsschwelle von 0.5 m Länge und 0.05 m Höhe.

Pidl [8] zeigt, dass Transportware in einem Sattelschlepper Beschleunigungen von ± 1 g erfahren. Ob diese maximal gemessene Beschleunigung beim Überfahren einer Bremsschwelle erreicht wurde, ist nicht ersichtlich.

Da der Achsenabstand des Solar Butterflys, im Vergleich zu den Personenwagen aus der Literatur, relativ klein ist, werden die in der Fahrzeugmitte gemessenen Beschleunigungen der Personenwagen nicht als repräsentative Näherungswerte für die Beschleunigung des Solar Butterflys verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass die Beschleunigungen, welche ein Personenwagen direkt über der Achse beim Überfahren einer Bremsschwelle erfährt, vergleichbar mit jenen sind, welche der Solar Butterfly erfahren wird. Diese Annahme wird getroffen, da die Achsen des Solar Butterflys nahe beisammen liegen und eher den letzteren Fall beschreiben.

Aufgrund der getroffenen Annahme wird die Beschleunigung von 1.5 g als erste Abschätzung festgelegt. Hinsichtlich der grossen Unsicherheit der Annahmen wird die *Ungenauigkeit* auf 0.4 geschätzt. Die *Auswirkung* wird dabei mit einem Wert von 50 festgelegt, was einen hohen Risikowert von 20 ergibt.

1.2 Longitudinale Beschleunigung - Positiv (Erhöhen der Geschwindigkeit)

Longitudinale positive Beschleunigungen in Fahrtrichtung entstehen durch eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit durch das Zugfahrzeug. Das *Institut für Unfallanalysen Hamburg* [9] benützt die Beschleunigung von Personenwagen von maximal 0.3 g und von Lastkraftwagen von 0.1 g, als Anhaltswerte.

Für das Lastenheft wird die Beschleunigung von 0.2 g gewählt. Sie wird höher als der Anhaltswert des Institut für Unfallanalysen Hamburg für Lastkraftwagen von 0.1 g gewählt, da das geplante Zugfahrzeug ein elektrisches ist, und dadurch höhere mögliche Beschleunigungen erwartet werden können. Die *Ungenauigkeit* wird mit 0.2 als gering eingestuft. Ebenfalls wird die *Auswirkung* von 20 als niedrig bewertet.

1.3 Longitudinale Beschleunigung - Negativ (Bremsen)

Longitudinale Verzögerungen entstehen durch Abminderung der Fahrgeschwindigkeit. Die extremste graduelle Verzögerung entsteht dabei durch eine Notbremsung.

Kudarauskas [10] zeigt bei seiner Analyse der Notbremsungen von Personenwagen, dass die maximalen Verzögerungen bei rund 0.9 g liegen. Das *Institut für Unfallanalysen Hamburg* [11] zieht bei Gutachten die Vollverzögerung von 0.8 g für Personenwagen und 0.7 g für Lastkraftwagen als Standardwerte herbei.

Für die longitudinale Beschleunigung durch Bremsungen wird sich am Institut für Unfallanalysen Hamburg orientiert und ein Wert von 0.7 g gewählt. Dies, da davon ausgegangen wird, dass die maximalen Verzögerungen von *Kudarauskas* von 0.9 g mit dem Solar Butterfly nicht erreicht werden können. Weiter wird angenommen, dass das Verhalten eines Lastkraftwagens während einer Vollverzögerung die Situation des Solar Butterflys ähnlicher beschreibt als jenes des Personenwagens. Die longitudinale Beschleunigung wird mit einer *Ungenauigkeit* von 0.2 und einer *Auswirkung* von 30 bewertet.

1.4 Laterale Beschleunigung

Laterale Beschleunigungen entstehen vor allem beim Kurvenfahren und sind abhängig von der Geschwindigkeit mit welcher die Kurve durchfahren wird und des Kurvenradius.

Hugemann et al. [12] massen in einem Personenwagen auf einer Landstrasse laterale Beschleunigungen von 0.6 g. *Xu et al.* [13] zeigten, dass die Mehrheit der gemessenen Beschleunigung in einem Personenwagen durch Kurvenfahrten in bergigem Gebiet über 0.5 g und maximale über 0.8 g liegen.

Da davon ausgegangen wird, dass mit dem Solar Butterfly die Kurven vorsichtiger, und somit tendenziell langsamer durchfahren werden als mit einem Personenwagen, wird die

laterale Beschleunigung von 0.8 g als ein passenden Anhaltswert erachtet. Es wird erwartet, dass die nach Xu et al. höher als 0.8 g liegende Beschleunigungen nicht erreicht werden. Die *Ungenauigkeit* wird mit 0.1 als gering bewertet. Die *Auswirkung* wird auf 70 geschätzt.

1.5 Rotatorische Beschleunigung

Rotatorische Beschleunigungen können durch eine in querrichtung unebene Strassen verursacht werden. Beim Überfahren einer solchen Strasse neigt sich der Solar Butterfly abwechselungsweise nach links und rechts, wodurch rotatorische Beschleunigungen auftreten. Um diese Beschleunigungen abschätzen zu können wird die folgende Berechnung durchgeführt:

Die folgende Gleichung beschreibt den Neigungswinkel φ des Solar Butterflies in abhängigkeit der Zeit t :

$$\varphi(t) = \Delta\varphi \cdot \sin(\omega t) \quad (22)$$

wobei $\Delta\varphi$ für die maximale Neigung steht und ω sich wie folgt berechnen lässt:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad (23)$$

Wobei T für die Dauer einer Schwingung (Neigung von rechts nach links und wieder zurück) steht.

Die Winkelbeschleunigung α ergibt sich aus der zweiten Ableitung von $\varphi(t)$ und lässt sich wie folgt berechnen:

$$\alpha(t) = \ddot{\varphi}(t) = -\Delta\varphi \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \quad (24)$$

Eine maximalen Neigung $\Delta\varphi$ von 10° und einer Schwingdauer von einer Sekunde ergibt eine maximale Winkelbeschleunigung von $6.9 \frac{rad}{s^2}$, was auf dem Dach des Solar Butterflies (2.3 m entfernung zur Drehachse) eine Beschleunigung von ca. 1.6 g entspricht.

Da die realen Bedingungen einer solchen Situation nur schwer abgeschätzt werden können wird die *Ungenauigkeit* mit 0.3 hoch angesetzt. Ebenfalls können die Auswirkungen einer solchen Beschleunigung nur schwer beurteilt werden, weshalb die *Auswirkung* auf 60 gesetzt wird.

Windlasten

Sesar et. al [14] zeigen, dass laterale Windgeschwindigkeiten von $108 \frac{km}{h}$ für Fahrzeuge auf trockener Strasse kritische seien.

Die Blog-Seite *rvblogger.com* [15] empfiehlt bei Windgeschwindigkeiten von mehr als $80 \frac{km}{h}$ mit einem Wohnwagen nicht mehr zu Fahren. Windgeschwindigkeiten von $95 \frac{km}{h}$ seien laut *rvblogger.com* genug, um Wohnmobile umzustossen.

Bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 155 km/h können laut *Beasley* [16] Lastwagen mit hohem Profil, Anhänger und Busse umkippen. Die berichteten minimale Überschlagswindgeschwindigkeiten sind $105 \frac{km}{h}$ für ein 9 Meter langen Wohnwagen und $160 \frac{km}{h}$ für ein 5 Meter langes Wohnmobil (Klasse B).

Für eine erste Abschätzung der zugelassenen Windgeschwindigkeit bei der Fahrt des Solar Butterfly wird sich an der Blog-Seite *rvblogger.com* orientiert und die Geschwindigkeit von $80 \frac{km}{h}$ als Limitte festgelegt. Für die Berechnung der durch den Wind entstehenden Belastung, wird der Solar Butterfly vereinfacht als noraml angeströmttes Rechteck betrachtet. Für die Berechnung des Winddruckes wird die erhöhte Geschwindigkeit von $102.2 \frac{km}{h}$ (Beaufort 10) verwendet um Böhen

und eventuelle Ungenauigkeiten in der Messung oder Abschätzung der Windgeschwindigkeiten abzudecken. Der Winddruck wird gemäss Formel 25 berechnet.

$$P_W = c_p \frac{\rho}{2} v^2 \quad (25)$$

Wobei für die Dichte von Luft ρ ein Wert von $1.2 \frac{kg}{m^3}$ und für den Strömungswiderstandskoeffizient eines Rechteckes $c_{p,Rechteck}$ ein Wert von 1.1 gewählt wird. Bei einer Windgeschwindigkeit von $102.2 \frac{km}{h}$ ergibt sich gemäss der Gleichung 25 ein Winddruck von $532 \frac{N}{m^2}$.

Da es sich hierbei um eine grobe Idealisierung handelt und zum Beispiel lokale Geschwindigkeitserhöhungen oder Turbulenzen vernachlässigt werden, wird die *Ungenauigkeit* auf 0.4 gesetzt. Die *Auswirkung* wird jedoch eher tief, mit dem Wert 10 bewertet.

2.1 Wind von links

Der Winddruck von $532 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly.

2.2 Wind von rechts

Der Winddruck von $532 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, rechte Seite des Solar Butterfly.

Neigung

Mittels einer Absprache mit *Palmer* wurde eine zulässige Strassenneigung für den Solar Butterfly von 10° (17.5%) definiert. Die Strasse auf den Furkapass hat zum Vergleich eine maximale Neigung von 6.3° (11%). Die verschiedenen Lastfälle der Neigung treten nicht gleichzeitig ein. Implementiert werden die Fälle im FEM indem die Richtung, in welcher die Erdbeschleunigung wirkt, verändert wird. Die *Ungenauigkeit* und die *Auswirkung* werden tief mit den Werten 0.1 und 10 bewertet.

3.1 Neigung längs positiv $+10^\circ$ Neigung des Untergrundes in Fahrtrichtung.

3.2 Neigung längs negativ -10° Neigung des Untergrundes in Fahrtrichtung.

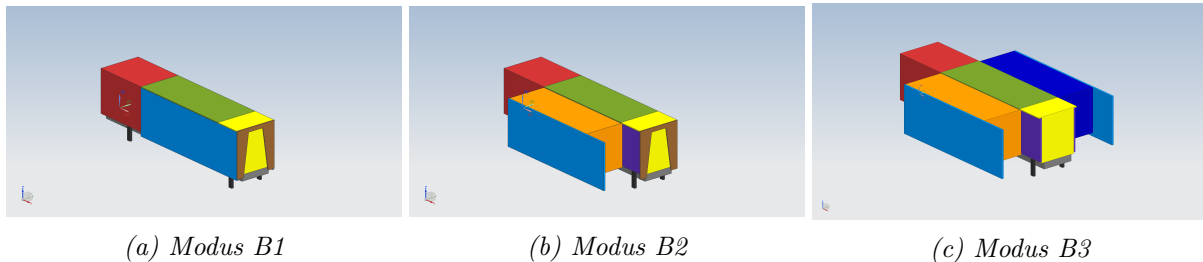
3.3 Neigung quer positiv $+10^\circ$ Neigung des Untergrundes normal zur Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich in Fahrtrichtung rechts.

3.4 Neigung quer negativ -10° Neigung des Untergrundes normal zur Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich in Fahrtrichtung links.

3.2 Modus B: Ausfahren

Die Modi *B1*, *B2* und *B3* beschreiben den Solar Butterfly während dem Ausfahrenvorgang der Seitenmodule. Im Modus *B1* sind die Stützen am Chassis unten, alle Seitenmodule und Paneele sind eingefahren. Dieser Modus stellt den Solar Butterfly im "Parkierten" Zustand dar. Bei extremen Umwelteinflüssen wie Schneefall oder starkem Wind, stellt der Modus *B1* den geschütztesten Zustand dar und muss somit diesen extremen Umwelteinflüssen stand halten können. Im Modus *B2* ist, zusätzlich zu den Stützen am Chassis, das grosse Seitenmodul (In der Abbildung 2b orange dargestellt) ausgefahren. Standardmässig werden beide Seitenmodule zur selben Zeit ausgefahren. Sollte dies aufgrund von technischen Problemen nicht möglich sein und die Seitenmodule müssen "von Hand" einzeln ein- oder ausgefahren werden, wird der Modus *B2* eingenommen. Im Modus *B3* sind beide Seitenmodule ausgefahren. Auch in diesen drei Modi

herrscht die Erdbeschleunigung von 1 g, welche wiederum nicht als Lastfall aufgeführt wird. Während dem Ausfahrtvorgang befinden sich keine Personen im Fahrzeug und das Mobiliar befindet sich an der dafür vorgesehenen stellen, wie dies im Modus A zuvor bereits der fall war.



(a) Modus B1

(b) Modus B2

(c) Modus B3

Abbildung 2: Modi beim Ausfahren

Windlasten

Windlast von Panelen übernommen

1.1 Wind extrem links

1.2 Wind extrem rechts

Winddruck bei 120 km/h (Orkan, Beaufort 12)?

Eher unsicher, kann viel höher liegen. daher nur erste annahme

Ungenauigkeit 0.4, Auswirkungen 40

1.3 Wind von links

Der Winddruck von $486 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly.

1.4 Wind von rechts

Der Winddruck von $486 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, rechte Seite des Solar Butterfly. Winddruck bei 120 km/h (Orkan, Beaufort 10)?

Eher unsicher, kann viel höher liegen. daher nur erste annahme

Ungenauigkeit 0.4, Auswirkungen 20

Neigung

Mit Palmer wurde abgesprochen, dass der Boden, auf welchem der Solar Butterfly parkiert wird, die Neigung von 5° (8.8%) nicht überschreiten darf. Die Implementierung dieser Fälle wird analog zu den Neigungsfällen 3.1 bis 3.4 im Modus A durchgeführt. Das Risiko wird ebenfalls analog zu den Neigungsfällen im Modus A bewertet.

2.1 Neigung längs positiv $+5^\circ$ Neigung des Untergrundes in Fahrtrichtung.

2.2 Neigung längs negativ -5° Neigung des Untergrundes in Fahrtrichtung.

2.3 Neigung quer positiv $+5^\circ$ Neigung des Untergrundes normal zur Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich in Fahrtrichtung rechts.

2.4 Neigung quer negativ -5° Neigung des Untergrundes normal zur Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich in Fahrtrichtung links.

3.3 Modus C: Ausgefahren

Der Modus *C* beschreibt den Solar Butterfly im ausgefahren Zustand. Alle Panels, Stützen und Seitenmodule sind ausgefahren. Personen und das Mobiliar können frei im Solar Butterfly verteilt sein.

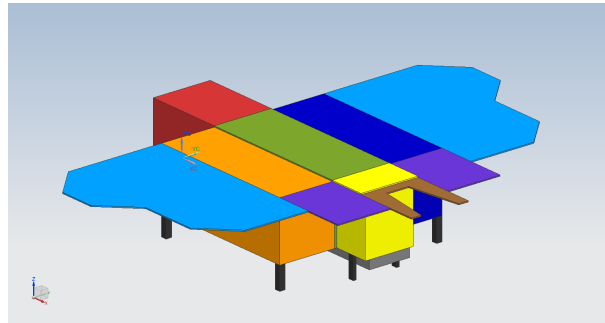


Abbildung 3: Modus C

Personenlast

Als *Personenlast* werden Lasten verstanden, welche durch Personen, welche sich im inneren des Solar Butterfly befinden, verursacht werden. Aus der Anforderungsliste ist zu entnehmen, dass sich bis zu sechs Personen im Solar Butterfly befinden können sollen. Im Kopf, sowie im Heck des Solar Butterfly, hat es jedoch platzbedingt nur Raum für maximal drei Personen. Das durchschnittliche Gewicht einer Person wird auf 80 kg geschätzt. Die Lastfälle 1.1 bis 1.6 werden als Vektorlasten, die Fälle 1.7 und 1.8 als Flächenlasten im FEM-Modell eingeleitet.

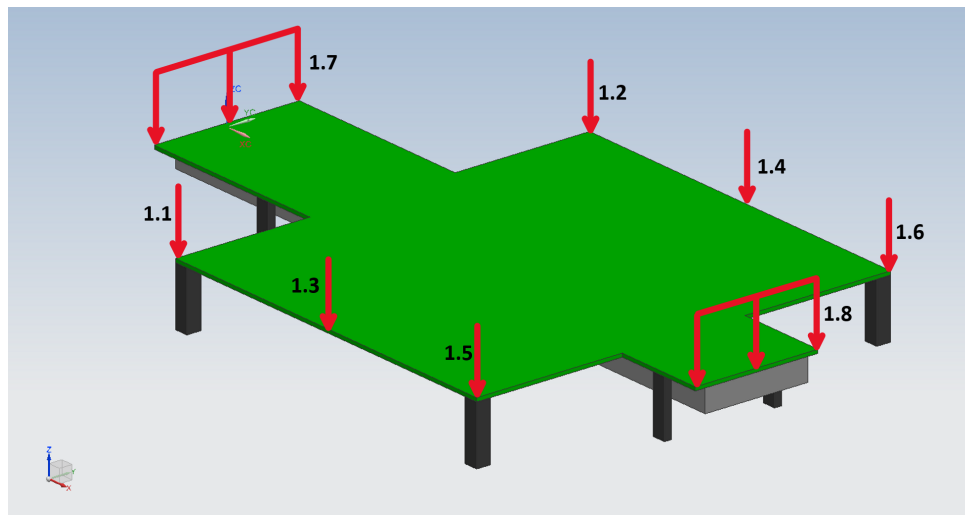


Abbildung 4: Visualisierung der Personenlasten

1.1 Personenlast vorne links

6 Personen à 80 kg befinden sich in der vorderen linken Ecke des linken Seitenteils.

1.2 Personenlast vorne rechts

6 Personen à 80 kg befinden sich in der vorderen rechten Ecke des rechten Seitenteils.

1.3 Personenlast mitte links

6 Personen à 80 kg befinden sich in der Mitte der äusseren Kante des linken Seitenteils.

1.4 Personenlast mitte rechts

6 Personen à 80 kg befinden sich in der Mitte der äusseren Kante des rechten Seitenteils.

1.5 Personenlast hinten links

6 Personen à 80 kg befinden sich in der hinteren linken Ecke des linken Seitenteils.

1.6 Personenlast hinten rechts

6 Personen à 80 kg befinden sich in der hinteren rechten Ecke des rechten Seitenteils.

1.7 Personenlast Kopf

Die aus dem Gewicht von 3 Personen à 80 kg resultierende Kraft wird als Flächenlast auf den Boden im Kopf eingeleitet.

1.8 Personenlast Heck

Die aus dem Gewicht von 3 Personen à 80 kg resultierende Kraft wird als Flächenlast auf den Boden im Heck eingeleitet.

Der Fall, dass Personen in der Mitte eines Seitenteils stehen wird im Lastenheft nicht aufgeführt, da davon ausgegangen wird, dass dieser Fall für die globalen Kraftverläufe kein Extrem darstellt. Dieser Fall wird jedoch spezifisch in der Auslegung der Bodenplatten im Kapitel [KAPITEL] berücksichtigt.

Neigung

Die Lastfälle der Neigung sind analog zum den Lastfällen der Neigung im Modus *B*.

2.1 Neigung längs positiv

+5° Neigung des Untergrundes in Fahrtrichtung.

2.2 Neigung längs negativ

-5° Neigung des Untergrundes in Fahrtrichtung.

2.3 Neigung quer positiv

+5° Neigung des Untergrundes normal zur Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich in Fahrtrichtung rechts.

2.4 Neigung quer negativ

-5° Neigung des Untergrundes normal zur Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich in Fahrtrichtung links.

Mobiliar

Die Belastungen durch das Mobiliar werden jeweils als Flächenlast im FEM-Modell eingeleitet. Die *Ungenauigkeit* sowie die *Auswirkungen* der folgenden Lastfälle wird mit den Werten 0.1 und 10 als gering eingeschätzt.

3.1 Mobiliar Hauptmodul

Die Flächenlast, welche sich aus den 50 kg Mobiliar ergibt, wird im Boden des Hauptmoduls eingeleitet.

3.2 Mobiliar Seitenteil links

Die Flächenlast, welche sich aus den 50 kg Mobiliar ergibt, wird im Boden des linken Seitenmoduls eingeleitet.

3.2 Mobiliar Seitenteil rechts

Die Flächenlast, welche sich aus den 50 kg Mobiliar ergibt, wird im Boden des rechten

Seitenmoduls eingeleitet.

Windlasten

Panelen werden auf Beaufort 8 ausgelegt:

Ungenauigkeit: 0.2, Auswirkungen: 20: Risiko: 20

4.1 Wind von links

Der Winddruck von $282 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly.

4.2 Wind von rechts

Der Winddruck von $282 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, rechte Seite des Solar Butterfly.

Panelen Klein

5.1

5.2

Panelen Gross

6.1

6.2

3.4 Failuremodes

Temperatur

Punktlast auf Boden

Tabelle 3: Lastfälle Modus A

Modus A: Fahren

Nr.	Bezeichnung	Belastung	Einleitung / Richtung	Uns.	Ausw.	Risiko
Beschleunigungen						
1.1	Vertikale Beschleunigung	$\pm 1.5 \text{ g}$	Beschleunigung in vertikaler Richtung	0.4	50	20
1.2	Longitudinale Beschl. - Positiv	0.2 g	Beschleunigung in Fahrtrichtung	0.2	20	4
1.3	Longitudinale Beschl. - Negativ	0.7 g	Verzögerung in Fahrtrichtung	0.2	30	6
1.4	Laterale Beschleunigung	$\pm 0.8 \text{ g}$	Beschleunigung horizontal und normal zur Fahrtrichtung	0.1	70	7
1.5	Rotatorische Beschleunigung	$6.9 \frac{rad}{s^2}$	Rotatorische Beschleunigung um den Vektor der Fahrtrichtung	0.3	60	18
Windlasten						
2.1	Wind von links	$532 \frac{N}{m^2}$	Der Winddruck von $532 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly.	0.4	10	4
2.2	Wind von rechts	$532 \frac{N}{m^2}$	Der Winddruck von $532 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, rechte Seite des Solar Butterfly.	0.4	10	4
Belastung durch geneigte Strassen						
3.1	Neigung längs positiv	$+10^\circ$	10° Neigung des Untergrundes in Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich vor dem Fahrzeug.	0.1	10	1
3.2	Neigung längs negativ	-10°	-10° Neigung des Untergrundes in Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich hinter dem Fahrzeug.	0.1	10	1
3.3	Neigung quer positiv	$+10^\circ$	10° Neigung des Untergrundes normal zur Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich in Fahrtrichtung rechts.	0.1	10	1
3.4	Neigung quer negativ	-10°	-10° Neigung des Untergrundes normal zur Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich in Fahrtrichtung links.	0.1	10	1

Tabelle 4: Lastfälle Modus B

Modus B: Ausfahren

Nr.	Bezeichnung	Belastung	Einleitung / Richtung	Uns.	Ausw.	Risiko
Windlasten						
1.1	Wind extrem links	$898 \frac{N}{m^2}$	Der Winddruck von $898 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly.	0.4	20	8
1.2	Wind extrem rechts	$898 \frac{N}{m^2}$	Der Winddruck von $898 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, rechte Seite des Solar Butterfly.	0.4	20	8
1.3	Wind von links	$532 \frac{N}{m^2}$	Der Winddruck von $532 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly.	0.4	10	4
1.4	Wind von rechts	$532 \frac{N}{m^2}$	Der Winddruck von $532 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, rechte Seite des Solar Butterfly.	0.4	10	4

Belastung durch geneigten Boden

2.1	Neigung längs positiv	+5°	5° Neigung des Untergrundes in Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich vor dem Fahrzeug.	0.1	10	1
2.2	Neigung längs negativ	-5°	-5° Neigung des Untergrundes in Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich hinter dem Fahrzeug.	0.1	10	1
2.3	Neigung quer positiv	+5°	5° Neigung des Untergrundes normal zur Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich in Fahrtrichtung rechts.	0.1	10	1
2.4	Neigung quer negativ	-5°	-5° Neigung des Untergrundes normal zur Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich in Fahrtrichtung links.	0.1	10	1

Tabelle 5: Lastfälle Modus C

Modus C: Stehend

Nr.	Bezeichnung	Belastung	Einleitung / Richtung	Uns.	Ausw.	Risiko
Belastung durch Personen						
1.1	Personenlast vorne Li	6*80 kg	Vordere linke Ecke des linken Seitenteils	0.2	20	4
1.2	Personenlast vorne Re	6*80 kg	Vordere rechte Ecke des rechten Seitenteils	0.2	20	4
1.3	Personenlast mitte Li	6*80 kg	In der Mitte der Äussere Kante des linken Seitenteils	0.2	20	4
1.4	Personenlast mitte Re	6*80 kg	In der Mitte der Äussere Kante des rechten Seitenteils	0.2	20	4
1.5	Personenlast hinten Li	6*80 kg	Hintere linke Ecke des linken Seitenteils	0.2	20	4
1.6	Personenlast hinten Re	6*80 kg	Hintere rechte Ecke des rechten Seitenteils	0.2	20	4
1.7	Personenlast Küche	3*80 kg	Steckenlast auf vorderste Kante	0.1	20	2
1.8	Personenlast Bad	3*80 kg	Streckenlast auf hinterste Kante	0.1	20	2
Belastung durch unebener Boden						
2.1	Neigung längs positiv	+5°	5° Neigung des Untergrundes in Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich vor dem Fahrzeug.	0.1	10	1
2.2	Neigung längs negativ	-5°	-5° Neigung des Untergrundes in Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich hinter dem Fahrzeug.	0.1	10	1
2.3	Neigung quer positiv	+5°	5° Neigung des Untergrundes noraml zur Fahrtrichtung. Ansteig befindet sich in Fahrtrichtung rechts.	0.1	10	1
2.4	Neigung quer negativ	-5°	-5° Neigung des Untergrundes noraml zur Fahrtrichtung. Ansteig befindet sich in Fahrtrichtung links.	0.1	10	1
Belastung durch Mobiliar						
3.1	Mobiliar Hauptmodul	50 kg	Einleitung als Flächenlast im Hauptmodul	0.1	10	1
3.2	Mobiliar Seitenteil links	50 kg	Einleitung als Flächenlast im linken Seitenteil	0.1	10	1
3.3	Mobiliar Seitenteil rechts	50 kg	Einleitung als Flächenlast im rechten Seitenteil	0.1	10	1
Windlasten						
4.1	Wind von links	$532 \frac{N}{m^2}$	Der Winddruck von $532 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly	0.4	10	4
4.2	Wind von rechts	$532 \frac{N}{m^2}$	Der Winddruck von $532 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, rechte Seite des Solar Butterfly	0.4	10	4

Panelen klein

5.1	Panelen Last 1 (Beispiel)	$F_{oben} = 1000\ N$ $F_{unten} = 200\ N$	Externe Kraft
5.2			Externe Kraft
5.3			Externe Kraft

Panelen gross

6.1	Panelen Last 1 (Beispiel)	$F_{oben} = 1000\ N$ $F_{unten} = 200\ N$	Externe Kraft
6.2			Externe Kraft
6.3			Externe Kraft

4 Analyse der Struktur

In diesem Kapitel werden verschiedene dimensionierende Lastfälle vereinfacht berechnet. Annahme bezgl. dimensionierende Lastfälle: Diese wurde dann idealisiert und berechnet um ein Gefühl für die Größenordnung der Belastungen zu bekommen und die Grobauslegung durchführen zu können.

4.1 Allgemeines

Allgemeine Idealisierung SB = Vollidealisiertes Profil -> Rechteck

Chassis wird als zwei Längsträger idealisiert, für das Dach werden Profile angenommen. Masse des Profiles angeben inkl. Querschnittsfläche.

Biegesteifigkeit SB ist ein Biegebalken Widerstandsmoment nicht möglich da unterschiedlicher E-Module -> Biegesteifigkeit EI : Gewichtung der Biegesteifigkeiten mit E-Modul

$$\begin{aligned}\overline{EI}_y &= \sum A_i \cdot y_i^2 \cdot E_i \\ \overline{EI}_z &= \sum A_i \cdot z_i^2 \cdot E_i\end{aligned}\tag{26}$$

Spannungen:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{M_{b,y}}{\overline{EI}_y} \cdot E_i \cdot y_i \\ \sigma &= \frac{M_{b,z}}{\overline{EI}_z} \cdot E_i \cdot z_i\end{aligned}\tag{27}$$

Schubfluss??? Wie verhält der? Idealisierung?

Massenverteilung

Die vermutlich grössten Belastungen, welchen der Solar Butterfly ausgesetzt wird, entstehen aufgrund der Trägheitskräfte welche durch Beschleunigungen entstehen. Aus diesem Grund wird die Massenverteilung des Solar Butterflys genauer betrachtet. Für die Berechnungen wird angenommen, dass die in der Anforderungsliste definierte Maximalmasse von 3000 kg erreicht wird. Die besagte Masse wird auf insgesamt sechs Bereiche aufgeteilt; Deichsel (Bereich 0-1), Küche (1-2), Hauptkörper (2-3), Bad (3-4) und die beiden Träger A (2) und B (3). Die Massenverteilung wurde basierend auf dem GEWICHTSEXCEL aus der Arbeit von HUBER abgeschätzt.

4.2 1.1 Vertikale Beschleunigung

Idealisierung

Um die Spannungen in der Struktur, welche aufgrund der vertikalen Beschleunigung entstehen berechnen zu können, wird der Solar Butterfly als Biegebalken mit dem in der Abbildung REF dargestellten vollidealisiertem Querschnitt idealisiert. A_Dach und $A_Chassis$ stehen dabei für die Querschnittsflächen der Profile. z_Dach und $z_Chassis$ stehen für den Abstand der Profile zum Flächenschwerpunkt.

Die Lagerung des Biegebalkens ist in der Abbildung REF dargestellt.

Querkraft- und Biegemomentenverlauf

Aus der Massenverteilung und der vertikalen Beschleunigung können die Streckenlasten pro Abschnitt, die Gewichtskräfte der Träger A und B sowie die Lagerreaktionen berechnet werden. Aus ihnen kann durch integration wiederum der Querkraft- und Biegemomentenverlauf berechnet werden, welche in der Abbildung REF dargestellt sind.

Spannungen und Kräfte

Steifigkeit mit der Formel 26 Spannungen mit der Formel 27

$M_{b,max}$: Kräfte: 69kN und 420kN

Schubfluss: Falls SB offen: Schubfluss muss an den Wänden der Küche und Bad abgetragen werden.

4.3 1.2 - Longitudinale Beschleunigung negativ

Für die Berechnung der Belastung durch longitudinale Beschleunigungen wird lediglich der Lastfall 1.2 betrachtet, da die longitudinale Beschleunigung im Lastfall 1.3 tiefer liegt als jene im Lastfall 1.2. Die Änderung des Vorzeichens der Beschleunigung im Lastfall 1.3 hat keine Auswirkung auf den Betrag der Belastung, da die Lasteinleitungen die Selbe bleibt.

Idealisierung

Bei einer Verözerung des Solar Butterflys wird angenommen, dass die Trägheitskräfte des Aufbaus über die Seitenwände (Feld A und Feld B vgl. Abbildung [REF]) auf das Chassis abgetragen werden. Der Solar Butterfly wird als "offen" betrachtet, sodass die Seitenwände der ausfahrbaren Modulen keine Schubkräfte aufnehmen. Das Chassis wird über die Deichsel und die Bremskraft der Räder verzögert.

Starres Chassis: Art und weise der Verzögerung ist egal (Deichsel oder Räder). Berechnung: Druckbelastung wenn alles über die Deichsel verzögert wird: 10MPa... Trägheitskräfte des Aufbaus wird über die Wände (Feld A und B) aufs Chassis übertragen. Annahme: Masse ist über die Höhe des SB gleichmässig verteilt. Konservative Annahme das CoG eher tiefer liegt. Gleichmässige Aufteilung der Masse des mittleren Teiles auf die Felder A und B.

Kräfte und Spannungen

Feld A, Feld B

4.4 1.4 Laterale Beschleunigung

Biegebalken wie bei 1.1 und Trägheit des Aufbaus über die Stützen

Biegebalken

Trägheitskräfte greifen im Flächenschwerpunkt an -> keine Torsion. Gute Annahme. Lagerung: Querkraft- und Biegemomentenverlauf: Normalspannungen: Schubfluss???

Träger

1/4 der Masse, Normalverteilt, Querkraft- und Biegemomentenverlauf Spannungen:

4.5 1.5 Rotatorische Beschleunigung

5 FEM

Wie ist das FEM aufgesetzt und welchen Zweck erfüllt es?

6 Auslegung und Design

Hier werden Komponenten und Baugruppen ausgelegt

Teil II

Anhang

A Quellenverzeichnis

- [1] BAFU, “Klima: Das wichtigste in kürze,” 2020.
- [2] R. Bärtsch, *Mechanik & Festigkeit - Festigkeitslehre*. 2 2019.
- [3] B. Harry, “Eth-skript,”
- [4] B. Klein, “Leichtbau-konstruktion dimensionierung, strukturen, werkstoffe und gestaltung,”
- [5] R. Janczur, “Vertical accelerations of the body of a motor vehicle when crossing a speed bump,” *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, vol. 67, no. 1, pp. 47–60, 2015.
- [6] D. García-Pozuelo, A. Gauchia, E. Olmeda, and V. Diaz, “Bump modeling and vehicle vertical dynamics prediction,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 6, pp. 736576–736576, 08 2015.
- [7] T. Haniszewski and A. MICHTA, “Preliminary studies of vertical acceleration of a passenger car passing through the speed bump for various driving speeds,” *Transport Problems*, vol. 14, pp. 23–34, 03 2019.
- [8] R. Pidl, “Analytical approach to determine vertical dynamics of a semi-trailer truck from the point of view of goods protection,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 1922, no. 1, p. 120003, 2018.
- [9] Institut für Unfallanalysen Hamburg, “Beschleunigungstabelle.” publisher: Institut für Unfallanalysen Hamburg.
- [10] N. Kudarauskas, “Analysis of emergency braking of a vehicle,” *Transport*, vol. 22, no. 3, pp. 154–159, 2007.
- [11] Institut für Unfallanalysen Hamburg, “Bremstabelle A.” publisher: Institut für Unfallanalysen Hamburg.
- [12] W. Hugemann and M. Nickel, “Longitudinal and lateral accelerations in normal day driving,” in *6th International Conference of The Institute of Traffic Accident Investigators*, pp. 1–8, 2003.

- [13] J. Xu, K. Yang, Y. Shao, and G. Lu, "An experimental study on lateral acceleration of cars in different environments in sichuan, southwest china," *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2015, p. 494130, Mar 2015.
- [14] P. Sesar and A. Krecak, "Impact of wind bora on croatian highways and bridges," *IABSE Symposium Report*, vol. 90, pp. 23–29, 01 2005.
- [15] M. Scarpignato, "When is it too windy to drive an rv?," Nov 2020.
- [16] K. Beasley, "Can high winds flip over your rv?," Apr 2017.

B Abbildungsverzeichnis

1	Modus A	10
2	Modi beim Ausfahren	15
3	Modus C	16
4	Visualisierung der Personenlasten	16

C Tabellenverzeichnis

1	Design-Allowables Sandwichplatten	7
2	Design-Allowables Kleber	8
3	Lastfälle Modus A	19
4	Lastfälle Modus B	20
5	Lastfälle Modus C	21

D Rissfortschritt

D.1 Zeichnungen

D.1.1 Zeichnung des Probenrohlings - Erste Serie

D.1.2 Zeichnung des Probenrohlings - Zweite Serie

Teil III

Elektronischer Anhang

A Elektronischer Anhang

A.1 Zeichnungen

A.1.1 Zeichnung des Probenrohlings - Erste Serie

A.1.2 Zeichnung des Probenrohlings - Zweite Serie