

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	2
1.3	Theorie	2
1.4	Der Solar Butterfly	3
2	Anforderungen und Methodik	4
2.1	Anforderungen an den Solar Butterfly	4
2.2	Auslegungskriterien	4
2.2.1	Aluminiumstrukturen	4
2.2.2	Sandwichstrukturen	5
2.2.3	Nieten	7
2.2.4	Klebeverbindungen	7
2.2.5	Schrauben	7
2.2.6	Spannpratzen	7
2.3	Verformung	7
3	Lastenheft	8
3.1	Modus A: Fahren	8
3.2	Modus B1 und B2: Ausfahren	12
3.3	Modus C: Ausgefahren	12
3.4	Failuremode	14
4	FEM	15
5	Auslegung und Design	15
II	Anhang	15
A	Quellenverzeichnis	15
B	Abbildungsverzeichnis	16
C	Tabellenverzeichnis	16
D	Rissfortschritt	16
D.1	Zeichnungen	16
D.1.1	Zeichnung des Probenrohlings - Erste Serie	16
D.1.2	Zeichnung des Probenrohlings - Zweite Serie	16
III	Elektronischer Anhang	16
A	Elektronischer Anhang	16
A.1	Zeichnungen	16

A.1.1	Zeichnung des Probenrohrlings - Erste Serie	16
A.1.2	Zeichnung des Probenrohrlings - Zweite Serie	16

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 ist somit ein

Sein neues Projekt ist der *Solar Butterfly* - ein autarker Wohnwagen, mit welchem er die Welt erneut umrunden will. Dieses mal jedoch mit "etwas mehr Komfort". 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, zusammen 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 Teile wie die klappbaren Panels und den Ausfahrmechanismus der Seitenmodulen. Das 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 Teilgebiet das Erstellen eines globalen CAD-Modells, zusammentragen der Anforderungen sowie die Risikobewertung.

Diese Arbeit, welche zum Teilgebiet *Auslegung Grundstruktur Solar Butterfly* gehört, befasst sich mit der Ausarbeitung eines detaillierten Lastenheftes, dem Design und den Festigkeitsberechnungen. -> Komponenten und Strukturen.

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

Anforderungen: (Welcher Kriterien gilt es zu erfüllen? Was ist die definition von "nicht aushalten"?) Festigkeit

Sicherheit gegen Fliessen

Steifigkeit

Sicherheit

Dauerfestigkeit 200'000km Fahren

Muss den Lasten im Lastenheft standhalten können.

Anforderungen/Auslegungskriterien an Materialien und Komponenten: (Was dürfen spezifische Komponenten aushalten? Wie werden diese überprüft? Designallowables) - Aluminiumstrukturen:

- Platten:

- Verbindungen:

- Dauerfestigkeit:

Gloabales FEM-Modell für die Ermittlung der Lastpfade

Überprüfung einzelner ausschnitte des Butterflys gemäss Kriterien.

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 (Automobilbau, 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

Zustände: Fahrzustand: Alles eingefahren, Panelen Fixiert usw.

Steh-Zustand: Alles Ausgefahren, Stützen unten.

Weitere Zustände beim Übergang vom einen zum anderen Zustand. (Einseitig ausgefahren stützen unten oder eben nicht unten.)

Koordinaten System Definieren

2 Anforderungen und Methodik

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 folgenden 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 bei den verschiedenen Lastfällen, und Kombinationen davon, nicht plastisch vervormen dürfen und somit eine genügend grosse Sicherheit gegen Fließen aufweisen muss.
- Weiter darf der Solar Butterfly sich nicht so stark verformen, dass seine Funktionstauglichkeit eingeschränkt wird. Die exakten Anforderungen an die Steifigkeit werden bei der Abhandlung der einzelnen Komponenten genauer beschrieben.
- Die Struktur des Solar Butterflys soll so ausgelegt werden, dass dieser ca. 180'000 km Fahrt auf zum teil recht holperiger Strasse auf sich nehmen kann. Dies beinhaltet die Auslegung der Komponenten auf Dauerfestigkeit.

2.2 Auslegungskriterien

Nachdem die allgemeinen Kriterien für den Solar Butterfly abgehandelt wurden, wird in diesem Unterkapitel behandelt, was die Anforderungen konkret für die einzelnen Komponenten und Strukturelementen bedeutet. Es wird beschrieben mit welchen Methoden die Auslegung angegangen wird und welche Vereinfachungen getroffen werden.

Verwendete Komponenten erwähnen? Sandwich, Profile usw...?

Grund Struktur erläutern... Boden, Chassis, Wände, Panelen usw.

Dauerfestigkeit Die Dauerfestigkeit des Solar Butterflys wird erreicht, indem durch entsprechendes Design, Spannungskonzentrationen vermieden werden. Weiter wird der Solar Butterfly so ausgelegt, dass dieser bei 50% der Lasten aus dem Lastenheft, mit einem R von 0, dauerhaft ist. Bei den Sandwichstrukturen wird dabei lediglich die Deckschicht auf die Dauerfestigkeit ausgelegt.

Sicherheitsfaktor $SF = 1.5$

2.2.1 Aluminiumstrukturen

Die Aluminiumstrukturen werden so ausgelegt, dass diese genügend Sicherheiten gegen Fließen und Knickung aufweisen.

Sicherheit gegen Fließen Um die Sicherheit eines Strukturelementes gegen Fließen zu gewährleisten, wird überprüft, ob die *Von Mises*-Vergleichsspannung kleiner als die zulässige Span-

nung ist, wobei sich die zulässige Spannung aus der Dehngrenze des gewählten Materials und einem Sicherheitsfaktor zusammensetzt. 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 gemäss [3] in die beiden Kategorien *Festigkeitsprobleme* und *Stabilitätsprobleme* eingeteilt werden. 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.

Annahmen und Vereinfachungen Für die Auslegung von Sandwichstrukturen können gemäss [3] und Klein [4] folgende Annahmen getroffen werden;

- 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 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 gemäss [3] aus den Formel 8 berechnen.

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

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

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

Wobei für Auslegungen $k_s = 0.5$ gilt.

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

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

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

2.2.5 Schrauben

2.2.6 Spannpratzen

2.3 Verformung

3 Lastenheft

In diesem Kapitel wird das Lastenheft erläutert. Es wird erläutert, wie die Lasten bestimmt wurden

Damit die Erklärung des Lastenheftes und der gesamte 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 Bresmmschwelle 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, da gewisse Lastfälle in mehreren Modi vorkommen, dass 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.

Als *Lastkombination* wird eine Kombination von verschiedenen Lastfällen verstanden. Eine Lastkombination bezieht sich jeweils auf einen Modus. Die Lastkombination A.3.1.2.1 setzt sich zusammen aus dem Modus *A* und den Lastfällen 1.3, 2.1 3.2 und 4.1 aus dem Modus *A*.

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

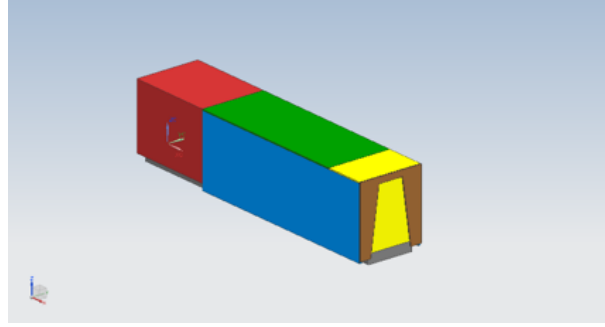


Abbildung 1: Modus A

Beschleunigungen durch Fahren

1.1 Vertikale Beschleunigung

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

In einem ersten Ansatz 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 Butterflies 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 x_r^n und des Solar Butterflies 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] zu finden.

Zu der Berechnung muss gesagt werden, dass es sich um ein eher konservatives Modell handelt und 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 herbeigeführt. *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.

Es wird davon ausgegangen, dass Ähnliche Beschleunigungen wie PKW jedoch tiefere Geschwindigkeiten da zu erst Zugfahrzeug über die Schwelle fährt. daher wieder tiefer

Schluss: 1.25g vertikale Beschleunigung

1.2 Longitudinale Beschleunigung

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 0.3g und von Lastkraftwagen von 0.1 g, als Anhaltswerte.

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 maximale Verzögerung bei rund 0.9 g liegt. Das *Institut für Unfallanalysen Hamburg* [11] zieht bei Gutachten die Vollverzögerung von 0.8 g für Personenwagen und 0.7 g für Lastkraftwagen als standard Werte herbei.

Longitudinale Beschleunigungen durch Unfälle werden gekonnt verdrängt.

Schluss: +0.2 -0.8g

1.3 Laterale Beschleunigung

Laterale Beschleunigungen entstehen hauptsächlich 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.

Schluss: ± 0.8 g

Belastung durch Wind [14] Laterale Windgeschwindigkeiten von 108 km/h seien kritisch für Fahrzeuge auf trockener Strasse.

[15] Bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 80 km/h wird empfohlen nicht mehr zu Fahren. Windgeschwindigkeiten von 95 km/h sei genug um Wohnmobile umzustossen

[16] Bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 155 km/h können "high profile Trucks, Trailers and Busse" überkippen. Minimale OVERTURNING WIND SPEEDS von 108 km/h für 9 m langes Motor home und 160 km/h für ein 5m langes Wohnmobil.

2.1 Wind

Schluss: bei 80km/h soll nicht mehr gefahren werden: Winddruck bei 100km/h

Definitive Windgeschw. zum kippen kann schlussendlich mit dem FEM ermittelt werden. Dies soll nur eine erste Annahme sein.

$$W_D = c_p \frac{\rho}{2} v^2 \quad (22)$$

$$\rho = 1.2 \frac{kg}{m^3}$$

$$c_{p, Rechteck} = 1.05$$

$$W_D @ 100km/h = 486 [MPa]$$

Neigung Durch ein 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 Fälle der Neigung treten nicht gleichzeitig ein. Implementiert werden die Fälle im FEM indem die Richtung, in welcher die Erdbeschleunigung wirkt, verändert wird.

3.1 Neigung längs positiv +10° Neigung des Untergrundes in Fahrtrichtung.

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

3.3 Neigung quer positiv +10° 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.

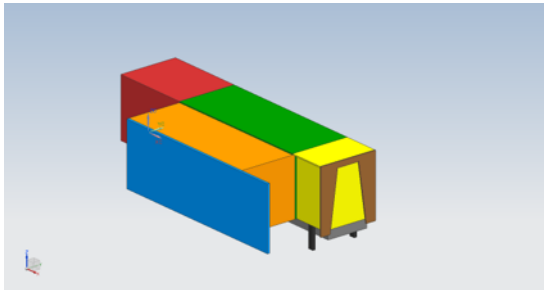
Mobiliar 50kg Mobiliar im Fahrzeug verteilt

4.1 Mobiliar vorne

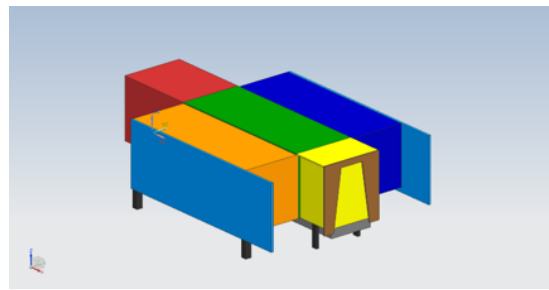
4.2 Mobiliar hinten

3.2 Modus B1 und B2: Ausfahren

Die Modi *B1* und *B2* beschreiben den Solar Butterfly während dem Ausfahrvorgang der Seitenmodule. Im Modus *B1* sind die Stützen am Chassis unten und das grosse Seitenmodul (In der Abbildung 2a orange dargestellt) ist ausgefahren. Im Modus *B2* sind zusätzlich die Stützen am grossen Seitenmodul unten und das kleine Seitenmodul (In der Abbildung 2b dunkelblau dargestellt) ist ausgefahren. Auch in diesen Modi herrscht die Erdbeschleunigung von $1g$, welche wiederum nicht als Lastfall definiert wird. Während dem Ausfahrvorgang befinden sich keine Personen im Fahrzeug.



(a) Modus B1



(b) Modus B2

Abbildung 2: Modi beim Ausfahren

Wind

1.1

1.2

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 Fällen 3.1 - 3.4 im Modus *A* durchgeführt.

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.

Mobiliar

3.1

3.2

3.3 Modus C: Ausfahren

Kein einzelner Lastfall für den Wind. Wind ist in den Lastfällen der Panels enthalten. Die Lasten werden von Yannick und Dominik berechnet.)

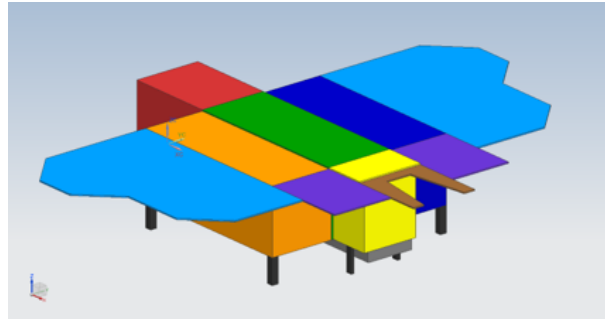


Abbildung 3: Modus C

Personenlast

1.1

1.2

Neigung Die Lastfälle der Neigung sind analog zum Modus B.

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.

Mobiliar Hauptmodul

3.1

3.2

Mobiliar Seitenteil

4.1

4.2

Panelen Klein

5.1

5.2

Panelen Gross

6.1

6.2

3.4 Failuremode

Temperatur

Punktlast auf Boden

4 FEM

Wie ist das FEM aufgesetzt und welchen Zweck erfüllt es?

5 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	9
2	Modi beim Ausfahren	12
3	Modus C	13

C Tabellenverzeichnis

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