

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	1
1.3	Der Solar Butterfly	2
2	Anforderungen und Auslegung	3
2.1	Anforderungen an den Solar Butterfly	3
2.2	Auslegungskriterien	3
2.2.1	Aluminiumstrukturen	3
2.2.2	Sandwichstrukturen	4
2.2.3	Nieten	5
2.2.4	Klebeverbindungen	6
2.2.5	Schrauben	6
2.2.6	Spannpratzen	6
2.3	Verformung	6
3	Lastenheft	7
3.1	Modus A: Fahren	7
3.2	Modus B1 und B2: Ausfahren	12
3.3	Modus C: Ausgefahren	13
3.4	Failuremodes	14
4	Komponenten und Verbindungen	15
4.1	Komponenten	15
5	FEM	16
6	Auslegung und Design	16
II	Anhang	16
A	Quellenverzeichnis	16
B	Abbildungsverzeichnis	17
C	Tabellenverzeichnis	17
D	Rissfortschritt	17
D.1	Zeichnungen	17
D.1.1	Zeichnung des Probenrohlings - Erste Serie	17
D.1.2	Zeichnung des Probenrohlings - Zweite Serie	17
III	Elektronischer Anhang	17

A Elektronischer Anhang	17
A.1 Zeichnungen	17
A.1.1 Zeichnung des Probenrohrlings - Erste Serie	17
A.1.2 Zeichnung des Probenrohrlings - Zweite Serie	17

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 "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. 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 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 Lasteinleitungen. 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 wurde. Die Struktur des vorliegenden Dokumentes entspricht dabei dem 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 Lastfällen - und Kombinationen davon - muss der Solar Butterfly ausgelegt werden.

Als nächster Schritt wurden 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 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.

1.3 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.)

Koordinatensystem Definieren

2 Anforderungen und Auslegung

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 Strukturelemente bedeutet. Es wird beschrieben mit welchen Methoden die Auslegung angegangen wird und welche Vereinfachungen getroffen werden.

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

Zu den Auslegungskriterien der Aluminiumstrukturen gehört das Festigkeitsproblem der plastischen Verformung (Fließen) und das Stabilitätsproblem der Knickung. 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 Spannung 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 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 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 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.

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 *Laterale Beschleunigung*, 2.1 *Wind von links*, 3.2 *Neigung längs negativ* und 4.1 *Mobiliar vorne* aus dem Modus *A*.

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

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 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.

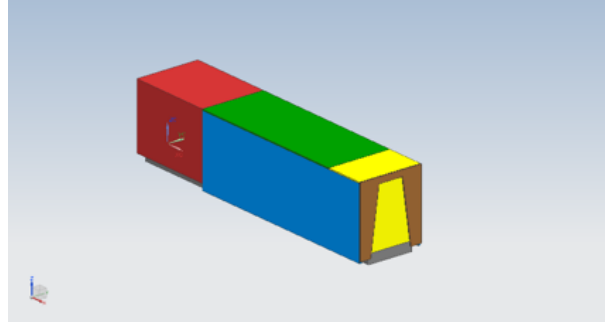


Abbildung 1: Modus A

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 Bremsschwelle 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 x_r^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] 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.

Da der Achsenabstand des Solar Butterflies, 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 Butterflies verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass die Beschleunigungen, welcher 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 Butterflies nahe beisammen liegen und eher den letzteren Fall beschreiben.

Aufgrund den getroffenen Annahmen 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* werden dabei mit einem Wert von 50 festgelegt was ein 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 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.

Longitudinale Beschleunigungen welche durch Unfälle jeglicher Art auftreten werden nicht berücksichtigt.

1.3 Longitudinale Beschleunigung - Negativ (Bremsen)

Longitudinale Verögerungen 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 ein Wert von 0.7 g gewählt bei einer *Ungenauigkeit* von 0.2 und einer *Auswirkung* von 30.

Longitudinale Verzögerungen welche durch Unfälle jeglicher Art auftreten werden nicht berücksichtigt.

1.4 Laterale Beschleunigung

Laterale Beschleunigungen entstehen vorallem 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 Solarbutterfly abwechselungsweise nach links und rechts, wodurch aufgrund von Trägheiten rotatorische Beschleunigungen auftreten. Um diese Beschleunigungen abschätzen zu können wird die folgende Berechnung durchgeführt:

Die folgende Gleichung beschreibt den Neigungswinkel φ des Solar Butterflys 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 $6.9 \frac{rad}{s}$.

Da die realen Bedingungen einer solchen Belastung 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.

Belastung durch Wind

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 des Winddruckes wird die erhöhte Geschwindigkeit von $100 \frac{km}{h}$ verwendet um Böhen und eventuelle Ungenauigkeiten in der Messung oder Abschätzung der Windgeschwindigkeiten abzudecken.

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

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

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

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

2.1 Wind von links Der Winddruck von $999 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly.

2.2 Wind von rechts Der Winddruck von $999 \frac{N}{m^2}$ wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, rechte Seite des Solar Butterfly.

Schluss: Winddruck bei 100 km/h, Max. 120; Risiko: 0.2×10

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 $+10^\circ$ 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.

Mobiliar

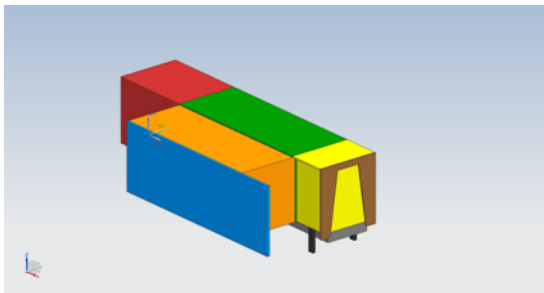
50kg Mobiliar im Fahrzeug verteilt

4.1 Mobiliar

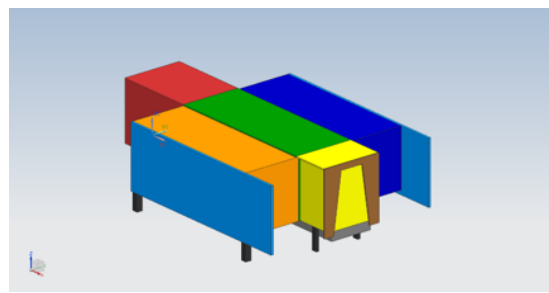
4.2

3.2 Modus B1 und B2: Ausfahren

Die Modi *B1* und *B2* beschreiben den Solar Butterfly während dem Ausfahrenvorgang 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 aufgeführt wird. Während dem Ausfahrenvorgang 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 Neigungsfällen 3.1 bis 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 Mobiliar

3.2

3.3 Modus C: Ausgefahren

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

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

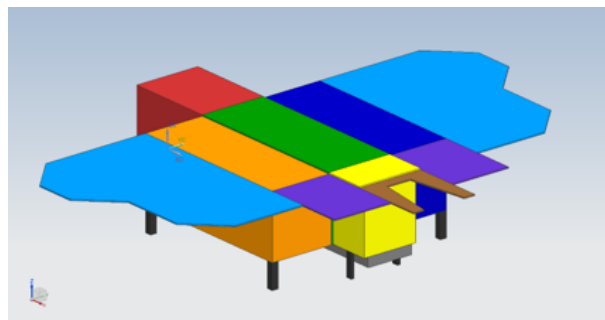


Abbildung 3: Modus *C*

Personenlast

1.1

1.2

Neigung

Die Lastfälle der Neigung sind analog zum den Lastfällen der Neigung im 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° 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 Failuremodes

Temperatur

Punktlast auf Boden

4 Komponenten und Verbindungen

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie der Solar Butterfly aufgebaut ist. Es werden verschiedene Komponenten eingeführt und analysiert wie diese Komponenten miteinander Verbunden sind und welche Kräfte die Verbindungen übertragen müssen.

Weiter wird beschrieben, wie der SB vereinfacht betrachtet wird (Biegebalken) in zwei Moden. (A und C)

4.1 Komponenten

bla bla

Hauptkörper Ganzer Körper als einen Kasten betrachten

Chassis

Idealisierung: Beam

Boden

Auslegung: Biegebalken Idealisierung: Schalenkörper

Stützen A und B

Auslegung: Schubwand mit Türe

Profile nehmen Kräfte auf, geben diese Jedoch an die Schubwand weiter

Dach

Panelen: Schubfläche

Dach an sich: Biegebalken (Durch eigengewicht) Im Modus C Kräfte auf nehmen durch Verriegelung der Seitenwände

Seitenmodul

Boden

Biegebalken und Schubfläche

Seitenwand

Modus A: Schubwand

Modus C: Keine

Ausfahrmechanismus (Scharniere)

Wand: Schubwand

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	8
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