

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	Vertikale Beschleunigung	23
4.2	Longitudinale Beschleunigung	25
4.3	Laterale Beschleunigung	26
4.4	1.5 Rotatorische Beschleunigung	28
5	FEM	28
6	Auslegung und Design	29
II	Anhang	29
A	Quellenverzeichnis	29
B	Abbildungsverzeichnis	30
C	Tabellenverzeichnis	30
D	Rissfortschritt	31
D.1	Zeichnungen	31
D.1.1	Zeichnung des Probenrohlings - Erste Serie	31
D.1.2	Zeichnung des Probenrohlings - Zweite Serie	31
III	Elektronischer Anhang	31

A Elektronischer Anhang	31
A.1 Zeichnungen	31
A.1.1 Zeichnung des Probenrohlings - Erste Serie	31
A.1.2 Zeichnung des Probenrohlings - Zweite Serie	31

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 einem Elektrofahrzeug - dem Solarfahrzeug *Solartaxi* - die Erde und gilt somit als ein Pionier im Bereich der Elektromobilität [2].

Sein neuestes Projekt ist der *Solar Butterfly* - ein autarker Wohnwagen, mit welchem er “eine Reise zu den Klimälösungen dieser Welt [...] im ersten solarbetriebenen «Mobile Home» der Welt” antreten will. Ein Ziel von Palmer ist es, mit dem Solar Butterfly weltweite Aufmerksamkeit zu erregen und so nachhaltige Lösungen im Bereich des Klimaschutzes und Elektromobilität zu ermutigen und voran zu treiben.

Die erneute Weltumrundung soll dieses mal mit “etwas mehr Komfort” geschehen. Seine Vision ist es, ein Wohnwagen, mit zwei ausziehbaren Wohnmodulen mit rund 100 m² integrierte Photovoltaikfläche, zu realisieren. Der Wohnwagen soll sich selbst mit Solar-Energie versorgen und autonom operiert werden können. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll, in Zusammenarbeit mit drei weiteren Studenten der HSLU T&A, seine Vision des Solar Butterflys 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)* aufgeteilt.

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 des Projektes.

1.1 Aufgabenstellung

Der Fokus dieser Arbeit liegt im Festlegen der Auslegungskriterien, dem Ausarbeitung eines detaillierten Lastenheftes, sowie mit der Dimensionierung der Grundstruktur. Zur Bestimmung von Schnittgrössen, mit welchen Handrechnungen getätigt oder verifiziert werden können, soll dabei ein globales FEM-Modell zur Anwendung kommen. Ebenfalls sollen zulässige Festigkeitswerte abhängig von der gewählten Bauweise abgeschätzt werden (Design-Allowables).

Weiter beinhaltet die Aufgabenstellung eine enge Zusammenarbeit mit den Mitstudenten. Es soll sich aktiv an der Lösungsfindung beteiligt und dabei besonders die Aspekte der strukturellen Integrität berücksichtigt und vertreten werden.

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 Standpunkt der strukturellen Integrität aus betrachtet, gerecht werden muss. Weiter werden die Auslegungskriterien bestimmt. Sie beschreiben im Detail, nach welchen Kriterien die einzelnen Komponenten des Solar Butterflies ausgelegt werden. So wird zum Beispiel beschrieben, welche Kriterien die Sandwichplatten erfüllen müssen, dass diese unter Belastung nicht baulen.

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

Als nächster Schritt wird der Solar Butterfly grob idealisiert und für die kritischen Lastfälle Handrechnungen durchgeführt, um so Kräfte und Spannungen bestimmen zu können. Dies wird zum einen gemacht, um die Grössenordnung der Kräfte besser abschätzen zu können. Andererseits kann dadurch eine erste grobe Dimensionierung der wichtigsten Komponenten erfolgen.

Weiter werden 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 Ergebnis dieser Analyse ist das erlangte Verständnis für Belastungsarten und idealisierte Kraftverläufe durch die Komponenten und Struktur des Solar Butterflies 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 welchen eine Verifizierung der Handrechnungen und eine genauere Dimensionierung der Komponenten erfolgen kann. Weiter können in den FEM-Analysen für die Funktionstauglichkeit kritische Verformungen festgestellt werden, welche in der Konstruktion berücksichtigt werden müssen.

Hierbei handelt es sich um ein stark iteratives Vorgehen. Erkenntnisse in einem Bereich des Projektes haben Auswirkungen

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 wer-

den, 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 (fertigstellungs- 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 diese Unterkapitels ist es, einen Überblick des Solar Butterflys zu verschaffen. Die Funktionalität 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 Butterflies 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 werden kann, dass diese erfüllt werden.

2.1 Anforderungen an den Solar Butterfly

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 [AHNAHNG] oder im elektronischen Anhang [ANHANG] zu finden.

- Der Solar Butterfly muss strukturelle Integrität aufweisen. Dies bedeutet, dass die Struktur des Solar Butterflies den vorgesehenen Belastungen (vgl. Lastenheft Kapitel 3) standhalten muss, ohne dabei durch Bruch, Verformung oder Ermüdung zu versagen.
- 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 Butterflies 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 [3]. 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 diesen Materialkennwerten sind die Sicherheitsfaktoren drinnen und die Absicherung gegen Ermüdung.

GFK: $R_m = 250\text{MPa}$, $\sigma_{bW} = 50\text{MPa}$, $E - \text{Modul} = 16'000\text{MPa}$ 5052: $R_{p0.2} = 240\text{MPa}$, $\sigma_{zdW} = 80\text{MPa}$, $E - \text{Modul} = 70'000\text{MPa}$

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	$\tau_{zul} = 0.6$

Design-Allowables und Materialkennwerte

2.2.1 Aluminiumstrukturen

Zu den Auslegungskriterien der Aluminiumstrukturen gehört das Festigkeitsproblem der plastischen Verformung (Fließen) und das Stabilitätsproblem der Knickung. Für die Grobauslegung werden die Aluminiumstrukturen ausgelegt, dass diese eine Sicherheit gegen Fließen von 1.5 aufweisen. Dabei wird sich an *Roloff Matek Maschinenelemente* orientiert [4]. Für das Stabilitätsproblem der Knickung wird sich an *Bärtsch* orientiert und eine Sicherheit von 4 gewählt [5].

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. Die *Von Mises*-Vergleichsspannung kann gemäss der Formel 1 berechnet werden [5].

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

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

Knicken Der Versagensfall der Knickung

2.2.2 Sandwichstrukturen

Versagenkriterien der Sandwichstrukturen können in die beiden Kategorien *Festigkeitsprobleme* und *Stabilitätsprobleme* eingeteilt werden [6]. Zu den Festigkeitsproblemen gehören;

- Fließen 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 der Berechnungen zu verringern werden Annahmen und Vereinfachungen getroffen. Für die Auslegung von Sandwichstrukturen können folgende Annahmen getroffen werden [3][6];

- 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.

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

Mit der Formel 3 lassen sich die Schubspannungen in der Kernschicht berechnen und somit Aussagen über ihre Resistenz gegenüber dem Schubbruch machen.

$$\tau_k = \frac{q}{t_k} \quad (3)$$

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 [3] mit der Formel 4 berechnen.

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

Wobei sich das Widerstandsmoment I vereinfacht gemäss der Formel 5 berechnen lässt. Hier wurde die Annahme getroffen, dass die Eigenbiegesteifigkeiten der Deckschichten vernachlässigbar sind. Diese Annahme kann gemäss Klein [3] ab einem Verhältnis von t_d zu t_k von 0.25, getroffen werden.

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

Die kritische Schubknicklast lässt sich gemäss Klein [3] 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. [6]

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

Die kritischen Spannungen, bei welcher das Knittern der Deckschicht auftritt, lässt sich mit der Formel 9 berechnen. [6]

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

Wobei für Auslegungen $k_s = 0.5$ gilt.

2.2.3 Nieten

Für die Grobauslegung von Nietverbindungen wird angenommen, dass die herrschenden Schubkräfte gleichmässig auf die Anzahl Nieten in einer Verbindung verteilt werden. Anzahl und Typ der Nieten wird dabei so gewählt, dass die zulässige Scherkraft der Niete nicht überschritten wird. Laut Klein [3] gehört zum Tragfähigkeitsnachweis von Nietverbindungen für gewöhnlich ein Abscher- und Lochleibungsnachweis. Insofern sei für Nietverbindungen ein Nachweis auf Scherbruch (Formel 10) und Lochleibung (Formel 11) zu erbringen:

$$F \leq F_{SB} = \frac{d_N^2 \cdot \pi}{4} \cdot \tau_B \quad (10) \quad F \leq F_{LF} = d_N \cdot t \cdot \sigma_{FL} \quad (11)$$

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 um den Faktor 2 bis 2.2 zu verringern.

2.2.4 Klebeverbindungen

Die Fähigkeit einer Klebeverbindungen Schubfluss zu übertragen wird gemäss der Formel 12 beurteilt.

$$\tau_K = \frac{q}{b} \leq \frac{\tau_{KB}}{S} \quad (12)$$

Für dynamische Verbindungen werden folgende Abminderungsfaktoren verwendet. [3]

$$\begin{aligned} \textit{wechselnd} : \tau_{KW} &\approx (0.2 \dots 0.4) \cdot \tau_{KB} \\ \textit{schwellend} : \tau_{KSch} &\approx 0.8 \cdot \tau_{KB} \end{aligned} \quad (13)$$

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 Bremmschwelle 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 dazugehörigen *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.

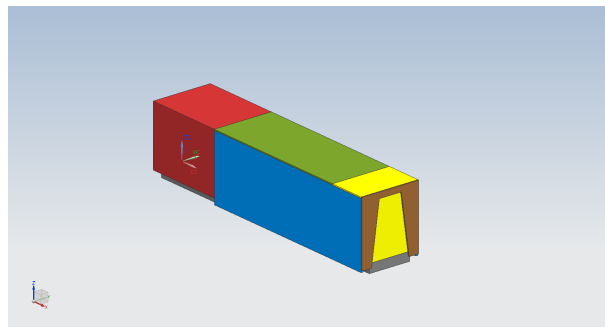


Abbildung 1: Modus A

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:

$$x_r^n = h \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{n\Delta t \cdot v}{l}\right) \quad (14)$$

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.

$$x_{SB}^n = x_{SB}^{(n-1)} + v^{(n-1)} \cdot \Delta t \quad (15)$$

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 Butterflies x_{SB}^n berechnet.

$$s^n = x_r^n - x_{SB}^n \quad (16)$$

$$v_s^n = \frac{s^n - s^{(n-1)}}{\Delta t} \quad (17)$$

Die Beschleunigung des Solar Butterfly ergibt sich dann zu:

$$a_{SB}^n = \frac{k \cdot s^n + d \cdot v_s^n}{m} \quad (18)$$

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.

$$v^n = v^{(n-1)} + a_{SB}^n \cdot \Delta t \quad (19)$$

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* [7] 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. [8] 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. [9] 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 [10] 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 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 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* [11] 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 Verögerungen entstehen durch abminderung der Fahrgeschwindigkeit. Die extremste graduelle Verzögerung entsteht dabei durch eine Notbremsung.

Kudarauskas [12] zeigt bei seiner Analyse der Notbremsungen von Personenwagen, dass die maximalen Verzögerungen bei rund 0.9 g liegen. Das *Institut für Unfallanalysen Hamburg* [13] 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 vorallem beim Kurvenfahren und sind abhängig von der Geschwindigkeit mit welcher die Kurve durchfahren wird und des Kurvenradius.

Hugemann et al. [14] massen in einem Personenwagen auf einer Landstrasse laterale Beschleunigungen von 0.6 g. *Xu* et al. [15] 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 :

$$\varphi(t) = \varphi \cdot \sin(\omega t) \quad (20)$$

wobei φ für die maximale Neigung steht und ω sich wie folgt berechnen lässt:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad (21)$$

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:

$$\alpha(t) = \ddot{\varphi}(t) = -\Delta\varphi \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \quad (22)$$

Mit einer Schwingdauer von einer Sekunde und einer maximalen Neigung φ von 6.5° , welche sich aus einem Höhenunterschied des Rades von 200 mm und dem Radstand des Solar Butterflies von 1770 mm ergibt, resultiert eine maximale Winkelbeschleunigung von $4.4 \frac{rad}{s^2}$. 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 [16] zeigen, dass laterale Windgeschwindigkeiten von $108 \frac{km}{h}$ für Fahrzeuge auf trockener Strasse kritische seien.

Die Blog-Seite *rvblogger.com* [17] 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* [18] 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 23 berechnet.

$$P_W = c_p \frac{\rho}{2} v^2 \quad (23)$$

Wobei für die Dichte von Luft ρ ein Wert von $1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und für den Strömungswiderstandskoeffizient eines Rechteckes $c_{p,\text{Rechteck}}$ ein Wert von 1.1 gewählt wird. Bei einer Windgeschwindigkeit von $102.2 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ergibt sich gemäss der Gleichung 23 ein Winddruck von 532 Pa.

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 Pa wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly.

2.2 Wind von rechts

Der Winddruck von 532 Pa 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.

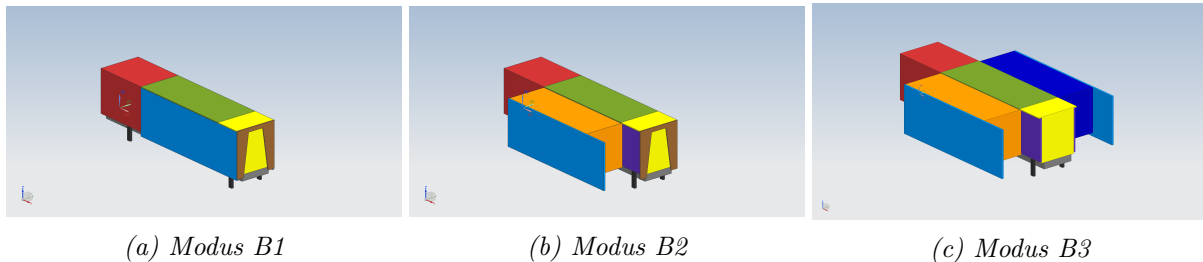
3.3 Neigung quer positiv $+10^\circ$ Neigung des Untergrundes normal zur Fahrtrichtung. Anstieg befindet sich in Fahrtrichtung rechts.

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 Pa wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly.

1.4 Wind von rechts

Der Winddruck von 486 Pa 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° 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.

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.

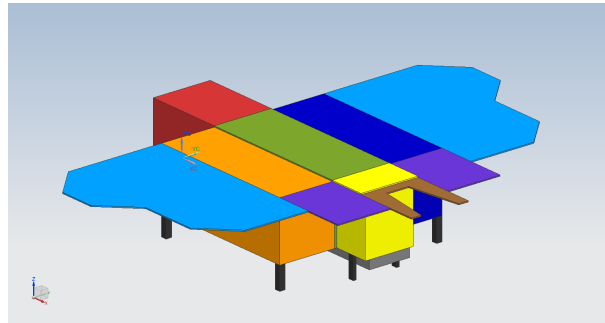


Abbildung 3: Modus C

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.

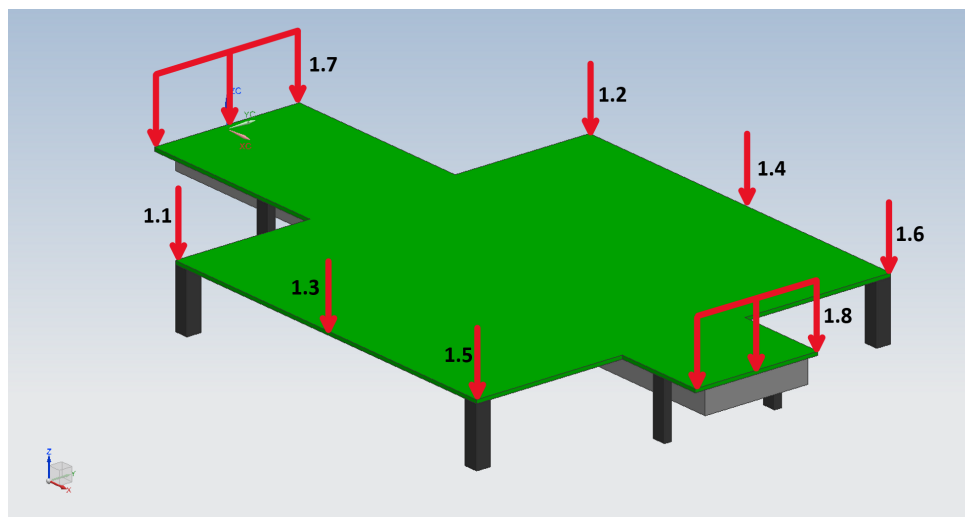


Abbildung 4: Visualisierung der Personenlasten

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 Pa wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly.

4.2 Wind von rechts

Der Winddruck von 282 Pa 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 2: 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 Pa	Der Winddruck von 532 Pa wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly.	0.4	10	4
2.2	Wind von rechts	532 Pa	Der Winddruck von 532 Pa 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 3: Lastfälle Modus B

Modus B: Ausfahren

Nr.	Bezeichnung	Belastung	Einleitung / Richtung	Uns.	Ausw.	Risiko
Windlasten						
1.1	Wind extrem links	898 Pa	Der Winddruck von 898 Pa wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly.	0.4	20	8
1.2	Wind extrem rechts	898 Pa	Der Winddruck von 898 Pa wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, rechte Seite des Solar Butterfly.	0.4	20	8
1.3	Wind von links	532 Pa	Der Winddruck von 532 Pa wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly.	0.4	10	4
1.4	Wind von rechts	532 Pa	Der Winddruck von 532 Pa 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 4: 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. Anstieg befindet sich in Fahrtrichtung rechts.	0.1	10	1
2.4	Neigung quer negativ	-5°	-5° Neigung des Untergrundes noraml zur Fahrtrichtung. Anstieg 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 Pa	Der Winddruck von 532 Pa wirkt auf die, in Fahrtrichtung gesehen, linke Seite des Solar Butterfly	0.4	10	4
4.2	Wind von rechts	532 Pa	Der Winddruck von 532 Pa 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 wird beschrieben, wie Kräfte und Spannungen im Solar Butterfly, entstehend durch verschiedene Lastfälle, vereinfacht berechnet werden. Es wird erläutert welche Annahmen und Idealisierungen getroffen werden und wie bei den Berechnungen vorgegangen wird.

Die Berechnungen wurden mit einer Excel-Tabelle gemacht, welche im elektronischen Anhang [ANHANG] einsehbar ist. In ihr sind die exakten Resultate sowie der detailliertere Lösungsweg zu finden.

Massenverteilung

Die 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 festlegung der Massenverteilung 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 mit der Hilfe des GEWICHTSEXCEL aus der Arbeit von *Huber* (Anhang [ANHANG]) abgeschätzt und ist in der Abbildung 5 grafisch dargestellt.

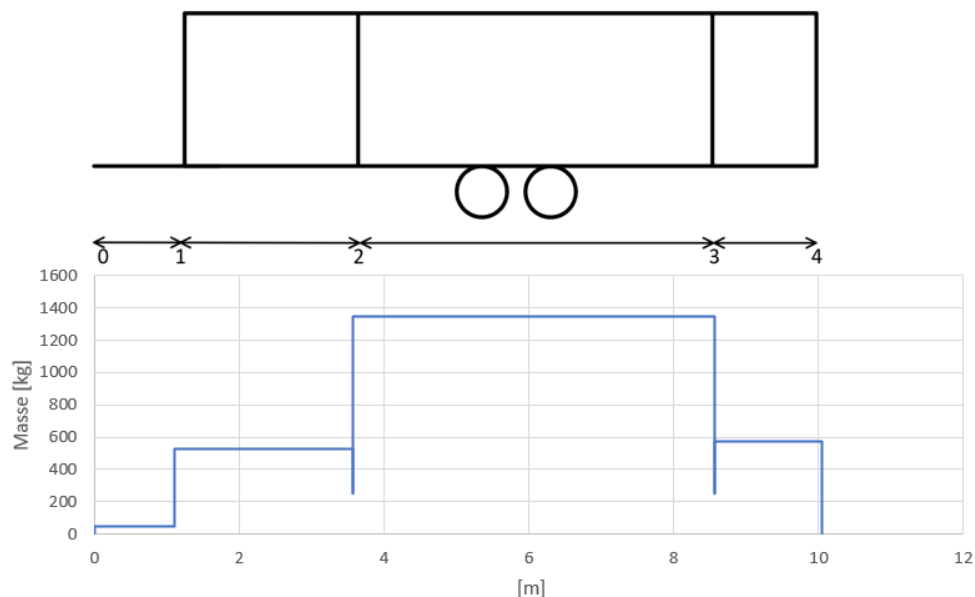


Abbildung 5: Massenverteilung über die Bereiche

4.1 Vertikale Beschleunigung

Idealisierung

Um die Kräfte und Spannungen in der Struktur, welche aufgrund der vertikalen Beschleunigung (Lastfall 1.1 *Vertikale Beschleunigung*) entstehen, berechnen zu können, wird der Solar Butterfly als Biegebalken mit dem in der Abbildung 6a dargestelltem 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. Das Profil des Chassis ist vom Hersteller vorgegeben und muss in der Grobauslegung nicht dimensioniert werden. Für die Längsträger des Daches wird für eine erste Iteration der Berechnungen ein 50x25-Rechteckprofil mit einer Wandstärke von 3 mm verwendet. Dieser Profilquerschnitt wurde aufgrund den Er-

kenntnissen, welche im Kapitel REF erlangt wurden, gewählt. Die Lagerung des Biegebalkens ist in der Abbildung 6b dargestellt.

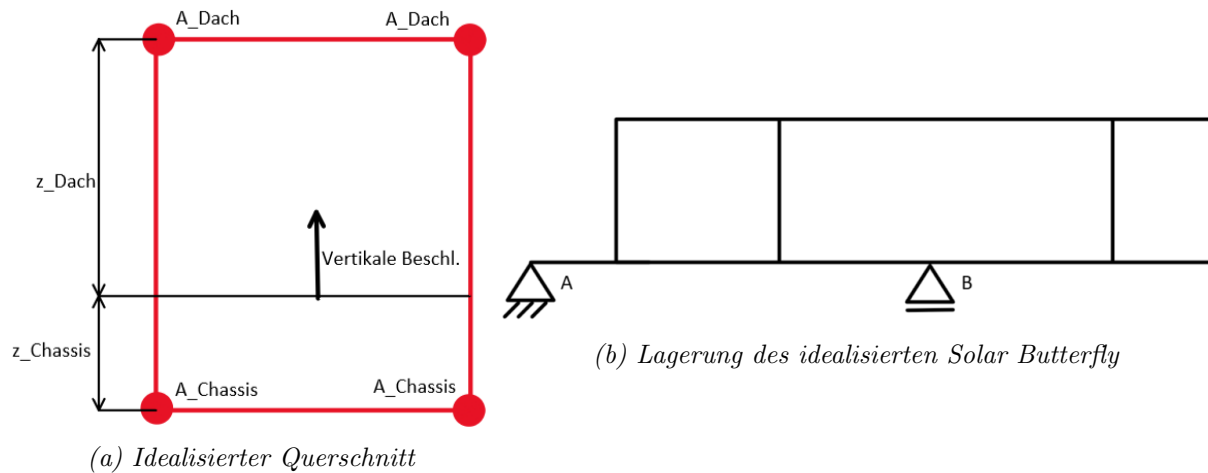


Abbildung 6: Idealisierung des Solar Butterfly für den Lastfall der vertikalen Beschleunigung

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 können durch integration wiederum der Querkraft- und Biegemomentenverlauf berechnet werden, welche in der Abbildung 7 dargestellt sind.

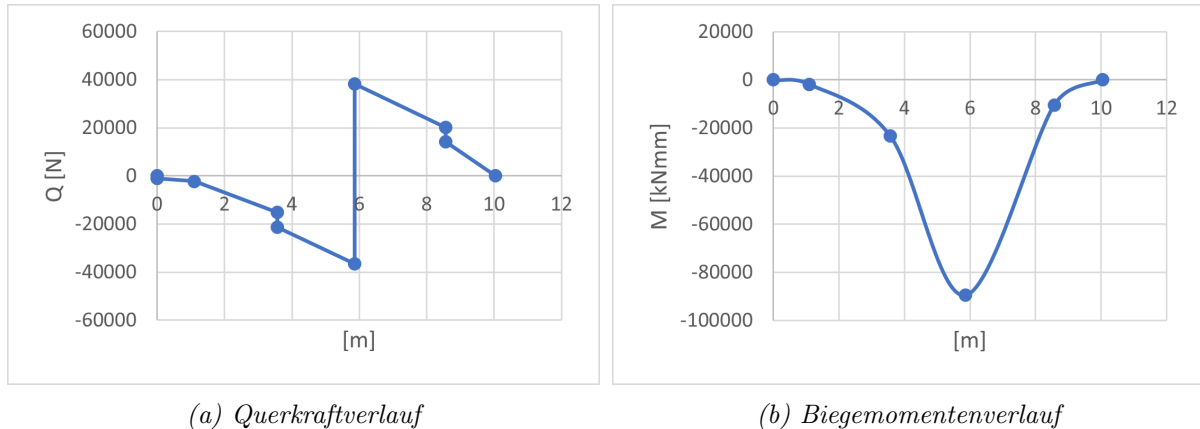


Abbildung 7: Querkraft- und Biegemomentenverlauf

Spannungen und Kräfte

Da die Profile im Dach aus Aluminium sind, das Chassis jedoch aus Stahl, und daher unterschiedliche Steifigkeiten aufweisen, können die Spannungen nicht mit dem Widerstandsmoment, sondern müssen über die Biegesteifigkeit berechnet werden. Die Biegesteifigkeit ergibt sich durch die Gewichtung der Widerstandsmomente mit der Steifigkeit des jeweiligen Profils (Formel 24). Die Spannungen in den Profilen können wiederum mit der Formel 25 berechnet werden.

$$\overline{EI}_y = \sum A_i \cdot y_i^2 \cdot E_i; \quad \overline{EI}_z = \sum A_i \cdot z_i^2 \cdot E_i \quad (24)$$

Spannungen:

$$\sigma_i = \frac{M_{b,y}}{EI_y} \cdot E_i \cdot y_i; \quad \sigma_i = \frac{M_{b,z}}{EI_z} \cdot E_i \cdot z_i \quad (25)$$

Bei einem maximalen Biegemoment von rund 90'000 kNmm ergeben sich Spannungen von 27 MPa im Chassis, sowie 36 MPa im Dachträger was Kräften von 45 kN, respektive 15 kN entspricht.

Für die Berechnung des Schubflusses wird die Unterscheidung der unterschiedlichen Materialien in den Gurten nicht gemacht, da dies den Rechenaufwand stark erhöhen würde. In diesem Falle wird der Schubfluss vereinfacht mit den statischen Moment und der Querkraft berechnet. Bei einer maximalen Querkraft von rund 38 kN resultiert ein Schubfluss von $8.9 \frac{N}{mm}$ in jeder Seitenwänden.

4.2 Longitudinale Beschleunigung

Für die Berechnung der Belastung durch longitudinale Beschleunigungen wird lediglich der Lastfall *1.2 Longitudinale Beschleunigung negativ* (Notbremsung) betrachtet, da die longitudinale Beschleunigung im Lastfall *1.3 Longitudinale Beschleunigung positiv* (Erhöhung der Geschwindigkeit) 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 Verzögerung des Solar Butterflies wird angenommen, dass die Trägheitskräfte des Aufbaus über die Seitenwände (Feld A und Feld B vgl. Abbildung 8) auf das Chassis abgetragen werden. Der Solar Butterfly wird als "offen" betrachtet, sodass die Seitenwände der ausfahrbaren Modulen keine Schubkräfte aufnehmen. Das Chassis wiederum wird über Bremskräfte in der Deichsel und den Räder verzögert. Die Druckspannungen im Chassis liegen im schlimmsten Fall (Verzögerung nur durch Bremskraft in der Deichsel) tiefer als 10 MPa und werden nicht weiter untersucht. Eine weitere Annahme welche getroffen wird ist, dass die Masse über die Höhe des Solar Butterflies gleichmässig verteilt ist. Weiter wird die Masse des Hauptteils und der Ausfahrmodule (Bereich 2-3) für die Berechnung gleichmässig auf die beiden Felder A und B verteilt. Die Trägheitskräfte des Hauptteils werden demnach über die Felder A und B abgetragen.

Die Felder A und B werden wiederum als Schubfeldträger idealisiert. Diese Idealisierung besagt, dass das Schubfeld die Schubkräfte und die umrahmenden Profile die Normalkräfte aufnehmen.

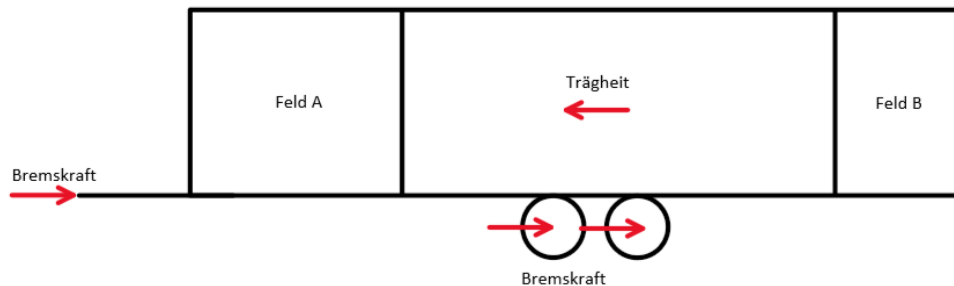


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Kräfte während der longitudinalen Beschleunigung

Kräfte und Spannungen

Die idealisierten Felder A und B und deren Lagerreaktionen und Schubkräfte sind in der Abbildung 9 dargestellt. Die Kraft F_a und F_b ergeben sich aus der Masse des Aufbaus und der herrschenden Beschleunigung. Um die Berechnung zu vereinfachen werden die Lastenleitungen jeweils in eine obere Ecke des Feldes gesetzt.

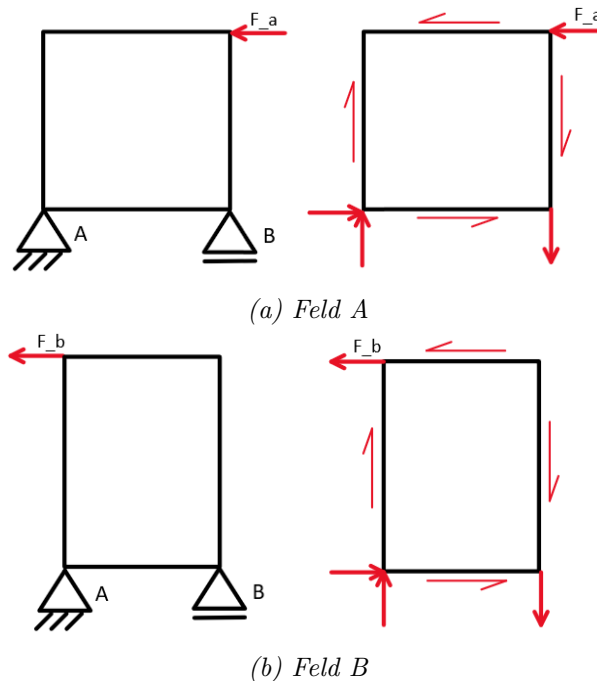


Abbildung 9: Idealisierte Seitenwände, angreifende Kräfte und Lagerreaktionen

Bei einer Beschleunigung von 0.7 g ergeben sich Schubspannungen von $1.6 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$ im Feld A, sowie $2.8 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$ im Feld B. Die Normalkräfte in den umrahmenden Profilen belaufen sich auf maximal 3.9 kN in den horizontalen Träger im Feld A und auf 5.6 kN in den vertikalen Träger im Feld B.

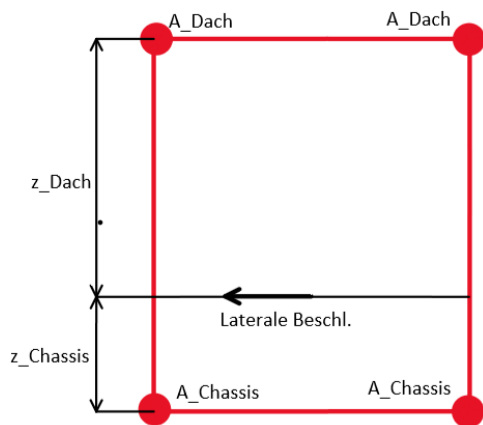
4.3 Laterale Beschleunigung

Idealisierung

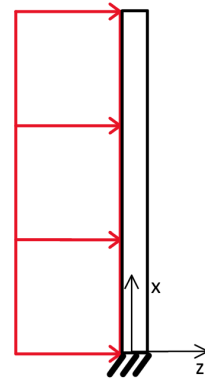
Für den Lastfall 1.4 *lateralen Beschleunigung* wird der Solar Butterfly wie im Kapitel 4.1 als Biegebalken idealisiert. Da davon ausgegangen wird, dass sich der Schwerpunkt des Solar Butterflys auf einer ähnlichen Höhe wie der Flächenschwerpunkt des idealisierten Querschnittes befindet, wird vereinfacht angenommen, dass die lateralen Trägheitskräfte im Flächenschwerpunkt angreifen. (Vgl. Abbildung 10a) So kommt es zu keiner Verdrehung des Biegebalkens.

Die Lagerung des idealisierten Solar Butterflys ist in der Abbildung 11 dargestellt. Sie stellt die Ansicht von Oben auf den Solar Butterfly dar wobei der “Spitz” auf der linken Seite die Deichsel repräsentiert.

Weiter wird angenommen, dass die Trägheitskräfte des Aufbaus über die Träger A und B auf das Chassis abgetragen werden. Wird angenommen, dass die Masse über die Höhe des Aufbaus gleichmässig verteilt ist, können die Trägheitskräfte als Streckenlasten, welche auf die Träger A und B wirken, idealisiert werden. Die insgesamt Profile der Träger A und B müssen demnach je ein Viertel der Kräfte auf das Chassis übertragen. Die Idealisierung eines Profils der Träger wird schematisch in der Abbildung 10b dargestellt.



(a) Idealisierter Querschnitt



(b) Schematische Darstellung der Idealisierung eines Profils der Träger.

Abbildung 10: Idealisierungen des Solar Butterflys für den Lastfall der lateralen Beschleunigung

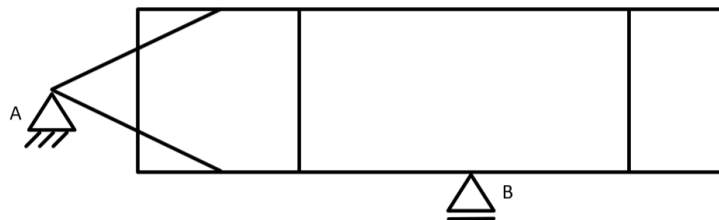
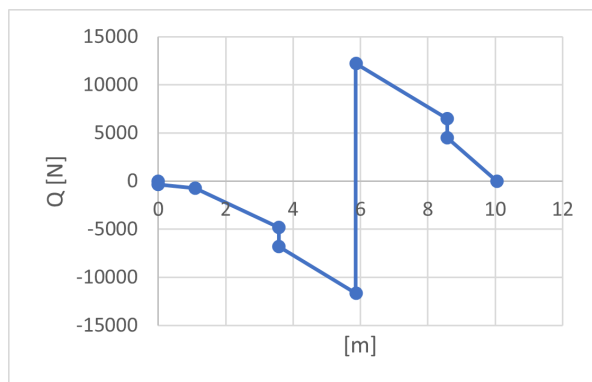


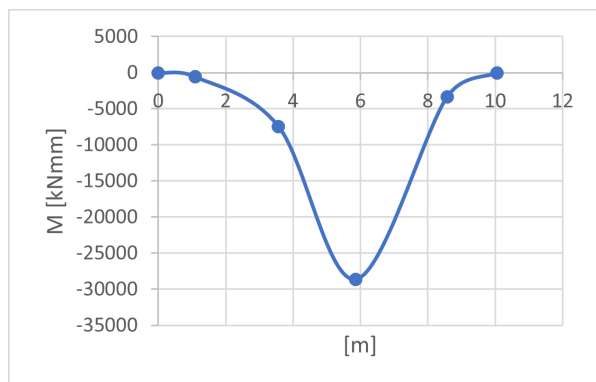
Abbildung 11: Lagerung des idealisierten Solar Butterfly

Querkraft- und Biegemomentenverlauf

Aus der Massenverteilung und der Beschleunigung können die Lagerreaktionen sowie die Trägheitskräfte berechnet werden. Der daraus resultierende Querkraft- und Biegemomentenverlauf ist in der Abbildung 13 dargestellt.



(a) Querkraftverlauf



(b) Biegemomentenverlauf

Abbildung 12: Querkraft- und Biegemomentenverlauf des als Biegebalken idealisierten Solar Butterfly im Lastfall der lateralen Beschleunigung

Kräfte und Spannungen

Die Kräfte und Spannungen werden analog zum Kapitel 4.1 *Vertikale Beschleunigung* berechnet. Bei einem Maximalen Biegemoment von 29'000 kNm ergeben sich Spannungen von 7 MPa im

Chassis, sowie 2.3 MPa in den Dachträgern. Sie entsprechen Kräften von 11.4 kN, respektive 0.9 kN. Der Schubfluss ergibt sich zu $2.65 \frac{N}{mm}$

Spannungen in den Trägern

Aus der Masse des Aufbaus, der wirkenden Beschleunigung und der Höhe des Profils kann die Streckenlast pro Träger ermittelt werden, woraus wiederum der Querkraft- und Biegemomentenverlauf bestimmt werden kann. Dieser ist in der Abbildung 13 dargestellt.

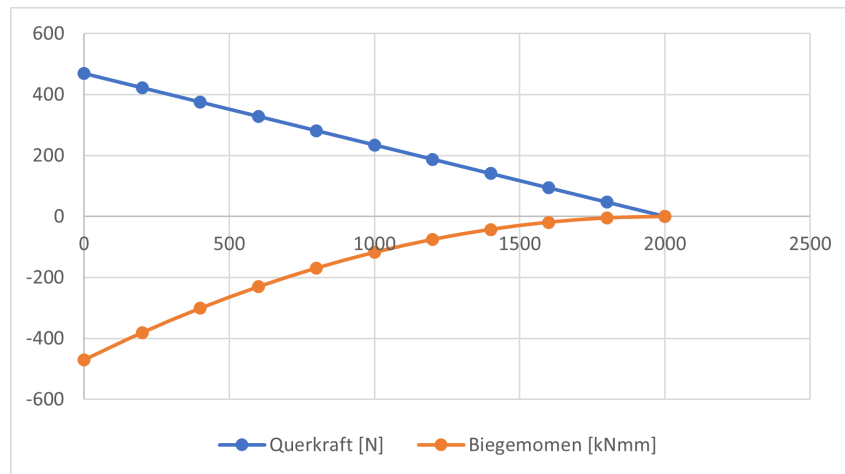


Abbildung 13: Querkraft und Biegemomentenverlauf in den Profilen der Träger im Lastfall der lateralen Beschleunigung

4.4 1.5 Rotatorische Beschleunigung

Idealisierung

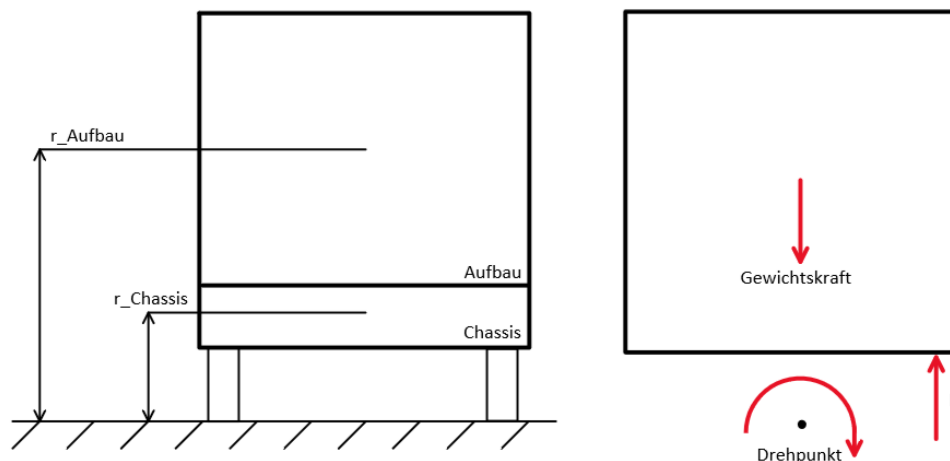


Abbildung 14: Schematische Darstellung des Solar Butterflys für den Lastfall der rotatorischen Beschleunigung.

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] L. Palmer, “Story “solartaxi”.”
- [3] B. Klein, “Leichtbau-konstruktion dimensionierung, strukturen, werkstoffe und gestaltung,”
- [4] H. Wittel, D. Jannasch, J. Vošiek, and C. Spura, *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 23 ed., 2017.
- [5] R. Bärtsch, *Mechanik & Festigkeit - Festigkeitslehre*. 2 2019.
- [6] B. Harry, “Eth-skript,”
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Institut für Unfallanalysen Hamburg, “Beschleunigungstabelle.” publisher: Institut für Unfallanalysen Hamburg.
- [12] N. Kudarauskas, “Analysis of emergency braking of a vehicle,” *Transport*, vol. 22, no. 3, pp. 154–159, 2007.
- [13] Institut für Unfallanalysen Hamburg, “Bremstabelle A.” publisher: Institut für Unfallanalysen Hamburg.
- [14] 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.

- [15] 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.
- [16] P. Sesar and A. Krecak, “Impact of wind bora on croatian highways and bridges,” *IABSE Symposium Report*, vol. 90, pp. 23–29, 01 2005.
- [17] M. Scarpignato, “When is it too windy to drive an rv?,” Nov 2020.
- [18] 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
5	Massenverteilung über die Bereiche	23
6	Idealisierung des Solar Butterfly für den Lastfall der vertikalen Beschleunigung .	24
7	Querkraft- und Biegemomentenverlauf	24
8	Schematische darstellung der Kräfte während der longitudinalen Beschleunigung .	25
9	Idealisierte Seitenwände, angreifende Käfte und Lagerreaktionen	26
10	Idealisierungen des Solar Butterflys für den Lastfall der lateralen Beschleunigung	27
11	Lagerung des idealisierten Solar Butterfly	27
12	Querkraft- und Biegemomentenverlauf des als Biegebalken idealisierten Solar But- terfly im Lastfall der lateralen Beschleunigung	27
13	Querkraft und Biegemomentenverlauf in den Profilen der Träger im Lastfall der lateralen Beschleunigung	28
14	Schematische Darstellung des Solar Butterflys für den Lastfall der rotatorischen Beschleunigung.	28

C Tabellenverzeichnis

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

D Rissfortschritt

D.1 Zeichnungen

D.1.1 Zeichnung des Probenrohrlings - Erste Serie

D.1.2 Zeichnung des Probenrohrlings - Zweite Serie

Teil III

Elektronischer Anhang

A Elektronischer Anhang

A.1 Zeichnungen

A.1.1 Zeichnung des Probenrohrlings - Erste Serie

A.1.2 Zeichnung des Probenrohrlings - Zweite Serie