

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	Abgrenzung der Arbeit	1
1.3	Vorgehen	1
1.4	Theorie	2
1.5	Der Solar Butterfly	3
2	Anforderungen und Methodik	4
2.1	Anforderungen an den Solar Butterfly	4
2.2	Auslegungskriterien	4
2.2.1	Aluminiumstrukturen	4
2.2.2	Sandwichstrukturen	5
2.2.3	Nieten	7
2.2.4	Klebeverbindungen	7
2.2.5	Schrauben	7
2.2.6	Spannpratzen	7
2.3	Verformung	7
3	FEM	7
4	Auslegung und Design	7
II	Anhang	7
A	Quellenverzeichnis	8
B	Abbildungsverzeichnis	8
C	Tabellenverzeichnis	8
D	Rissfortschritt	8
D.1	Zeichnungen	8
D.1.1	Zeichnung des Probenrohlings - Erste Serie	8
D.1.2	Zeichnung des Probenrohlings - Zweite Serie	8
III	Elektronischer Anhang	8
A	Elektronischer Anhang	8
A.1	Zeichnungen	8
A.1.1	Zeichnung des Probenrohlings - Erste Serie	8
A.1.2	Zeichnung des Probenrohlings - Zweite Serie	8

List of Symbols

B	The area of the needle point	
E_d	E-Modul der Deckschicht	
E_k	E-Modul der Kernschicht	
G_k	Schub-Modul des Schaumkernes	
h	Abstand der neutralen Fasern der Deckschichten	
m	Moment pro Länge	N
N	The number of angels per needle point	
n	Normalkraft pro Länge	N/mm
p	Streckenlast	N/mm^2
p_k	Kritische Knicklast	N/mm
$p_k B$	Euler-Knicklast des schubsteifen Balkens	N/mm
$p_k S$	Schubknicklast	N/mm
q	Schubkraft Pro Länge	N/mm
t_d	Höhe der Deckschicht	
t_k	Höhe des Schaumkernes	
w_b	Verformung durch Biegebelastung	mm
w_s	Verformung durch Schubbelastung	mm
w_{Ges}	Gesamtverformung	mm

Teil I

Dokumentation

1 Einleitung

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

Sein neues Projekt ist der *Solar Butterfly* - ein autarker Wohnwagen - mit welchem er die Welt erneut umrunden will. Dieses mal jedoch mit "etwas mehr Komfort". Seine Vision ist es, ein Wohnwagen, mit zwei ausziehbaren Wohn-Modulen und ca. 100m² integrierte Photovoltaik-Fläche, zu realisieren. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll, zusammen mit drei weiteren Studenten der HSLU, seine Vision in die Realität umgesetzt.

Bat mit vier Leuten mit je einer Aufgabe: Auslegung Ausfahrmechanismus, Auslegung und Konstruktion von Paneelen Ausfahrmechanismus

Globales CAD, Gewicht usw. In dieser Arbeit wird die Auslegung und Dimensionierung der Grundstruktur beschrieben

Anforderungen, Lastenheft, Globales FEM zur Lastpfadbestimmung -> Auslegung der Komponenten und Strukturen

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 Abgrenzung der Arbeit

1.3 Vorgehen

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

Sicherheit gegen Fliessen

Steifigkeit

Sicherheit

Dauerfestigkeit 200'000km Fahren
Muss den Lasten im Lastenheft standhalten können.

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

- Platten:
- Verbindungen:
- Dauerfestigkeit:

Globales FEM-Modell für die Ermittlung der Lastpfade
Überprüfung einzelner ausschnitte des Butterflies gemäss Kriterien.

1.4 Theorie

Leichtbau:

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

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

Da ein typisches Einsatzgebiet von Leichtbaukonstruktionen die Verkehrstechnik (Automobilbau, Schienen- und Luftfahrzeuge) ist, dürfen Leichtbaukonstruktionen nicht „unsicherer“ als vergleichbare Massivkonstruktionen sein. Dies bedingt eine sorgfältige Auslegung auf Steifigkeit (Instabilitäten), Bruchfestigkeit sowie Zuverlässigkeit und Nutzungsdauer. (S20)

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

aufeinander aufbauende Arbeitsschritte mit etwa folgenden Inhalten: - Klären der Aufgabenstellung: Informationsbeschaffung über die Anforderungen einer Aufgabe und Erstellung einer Anforderungsliste; Eingrenzung bestehender Bedingungen und ihre Bewertung für die Lösungserfüllung; Festlegung einer Lösungsrichtung; technisch-wirtschaftliche Konsequenzen. - Konzipieren

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

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

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

S206 Abb.

1.5 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.)

2 Anforderungen und Methodik

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

2.1 Anforderungen an den Solar Butterfly

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

2.2 Auslegungskriterien

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

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

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

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

Sicherheitsfaktor $SF = 1.5$

2.2.1 Aluminiumstrukturen

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

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

nung ist, wobei sich die zulässige Spannung aus der Dehngrenze des gewählten Materials und einem Sicherheitsfaktor zusammensetzt. Die *Von Mises*-Vergleichsspannung kann gemäss der Formel 1 berechnet werden [2].

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

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

Knicken Wird durch design verhindert (?)

2.2.2 Sandwichstrukturen

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

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

Zu den Stabilitätsproblemen gehören unter anderem;

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

Die auszulegenden Sandwichstrukturen werden gegenüber diesen Festigkeits und Stabilitätsproblemen abgesichert. Um den Rechenaufwand und die Komplexität zu verringern werden Annahmen und Vereinfachungen getroffen.

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

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

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

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

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

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.

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

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.

$$p_{kB} = \frac{\pi^2 \cdot B_y}{l_k^2} \quad (4)$$

Wobei sich die Biegesteifigkeit B_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.

$$B_y = E_d \cdot \frac{(t_d + t_k)^2 \cdot t_d}{2} \quad (5)$$

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

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

Die totale kritische Knickstreckenlast p_k ergibt sich dann aus der Formel 7:

$$p_k = \frac{1}{\frac{1}{p_{kB}} + \frac{1}{p_{kS}}} \quad (7)$$

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.

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

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 FEM

Wie ist das FEM aufgesetzt und welchen Zweck erfüllt es?

4 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,"

B Abbildungsverzeichnis

C Tabellenverzeichnis

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