



TU UB

WIEN Universitätsbibliothek

TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

## Diplomarbeit

# Entwicklung einer Beschattungsanlage mit senkrechten, separat ansteuerbaren Lamellen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

## Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Kartnig**

(E307 Institut für Konstruktionswissenschaften und technische Logistik,

Forschungsbereich Konstruktionslehre und Fördertechnik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Patrick Diem**

E0553653 (066 482)

Hagenberggasse 49

1130 Wien

Wien, im November 2014

---

Patrick Diem



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und, dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im November 2014

---

Patrick Diem

## **Kurzfassung**

Die vorliegende Arbeit dokumentiert den Entwicklungsprozess einer Beschattungsanlage für ein österreichisches Architekturunternehmen. Diese Anlage soll aus senkrechten Lamellen bestehen und zur Beschattung einer 12 Meter langen und zweistöckigen Fensterfront dienen. Die Lamellen sollen verfahrbar sowie an vorgesehenen Stellen verriegelbar und verdrehbar ausgeführt werden. Die Entwicklung erfolgte gemäß „*VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*“. Ergebnis dieser Entwicklung ist ein Entwurf der Anlage sowie ein Vorschlag für den Bau eines Prototyps zum Testen der Funktionalität derselben.

## **Abstract**

The present paper documents the development process of a shading system, developed for an Austrian architecture agency. The construction consists of vertical blinds and is thought to shade a two-storey, 12 meters long glass front. Traveling as well as locking and turning at certain positions needs to be possible. The development process is executed in accordance with the „*VDI 2221: Systematic approach to the design of technical systems and products*“. The results of this development are the draft of the construction as well as the proposal for a prototype for testing of the functionality of relevant parts.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Aufgabenstellung .....	2
3	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung.....	2
3.1	Anforderungsliste .....	3
4	Konzipieren.....	6
4.1	Abstrahieren .....	7
4.2	Funktionsstruktur .....	8
4.3	Suche nach Wirkprinzipien .....	10
4.3.1	Intuitiv betonte Methoden .....	10
4.3.2	Diskursiv betonte Methoden .....	12
4.3.3	Recherche.....	13
4.3.4	Morphologischer Kasten .....	14
4.4	Kombination zu Wirkstrukturen .....	18
4.4.1	Lösungsvariante 1.....	19
4.4.2	Lösungsvariante 2.....	21
4.4.3	Lösungsvariante 3.....	22
4.4.4	Lösungsvariante 4.....	24
4.4.5	Lösungsvariante 5.....	26
4.4.6	Lösungsvariante 6.....	27
4.4.7	Lösungsvariante 7.....	29
4.4.8	Lösungsvariante 8.....	31
4.5	Auswahl der Lösungsvarianten.....	33
5	Entwerfen .....	36
5.1	Theoretische Grundlagen .....	36
5.1.1	Grundregeln der Gestaltung .....	37
5.1.2	Gestaltungsprinzipien.....	39
5.1.3	Gestaltungsrichtlinien .....	40
5.2	Vorläufiger Gesamtentwurf LV5.....	40
5.2.1	Aufbau .....	41
5.2.2	Berechnung .....	45

5.2.3	Grobe Stückliste und wirtschaftliche Bewertung.....	46
5.3	Vorläufiger Gesamtentwurf LV7 .....	47
5.3.1	Aufbau .....	47
5.3.2	Berechnung .....	49
5.3.3	Grobe Stückliste und wirtschaftliche Bewertung.....	50
5.4	Vorläufiger Gesamtentwurf LV8.....	51
5.4.1	Aufbau .....	51
5.4.2	Berechnung .....	54
5.4.3	Grobe Stückliste und wirtschaftliche Bewertung.....	56
5.5	Bewerten nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien .....	57
5.6	Gesamtentwurf LV8.....	59
5.6.1	Beseitigung der beim Bewerten erkannten Schwachstellen .....	59
5.6.2	Finales Produktdesign .....	60
5.6.3	Abschätzung der Gesamtkosten der Anlage .....	64
5.6.4	Vorläufige Stückliste.....	66
5.6.5	Vorläufige Montageanweisung.....	67
6	Prototyp.....	71
6.1	Fehler- Möglichkeits- und Einfluss- Analyse (FMEA).....	71
6.2	Ausführung .....	73
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	76
8	Literaturverzeichnis.....	77
9	Abbildungsverzeichnis.....	78
10	Tabellenverzeichnis .....	79
11	Anhang.....	80
11.1	Berechnung LV5.....	80
11.2	Berechnung LV7 .....	87
11.3	Berechnung LV8.....	105

# 1 Einleitung

Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit ist der Auftrag des Architekturbüros Häfele zur Planung einer Beschattungsanlage. Auf Basis der Kundenanforderungen wird der Produktentwicklungsprozess gemäß VDI 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*<sup>1</sup> bis zum Ende der Entwurfsphase und zur Planung eines ersten Prototyps durchlaufen.

Als Arbeitsunterlage zur konkreten Durchführung dient die in *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*<sup>2</sup> ausführlich beschriebene und auf den Maschinenbau bezogene methodische Vorgangsweise der VDI 2221. Ziel dieser Vorgangsweise ist es, die Entwicklung planbar, flexibel, optimierbar und nachprüfbar zu machen. Die geschilderte Methodik ist dazu gedacht, den Prozess überschaubarer zu machen und Intuition zu fördern. Dementsprechend ist sie als hilfreiches Werkzeug zu sehen, und auf keinen Fall streng dogmatisch zu verfolgen. Die Sinnhaftigkeit der einzelnen Arbeitsschritte hängt stark von der Art der Entwicklung, sowie von den verfügbaren Recourcen ab. Ebenso ist es oft nicht möglich streng chronologisch vorzugehen, da es sich in vielen Fällen nicht vermeiden lässt, gewisse Schritte iterativ mehrfach zu durchlaufen.

Die einzelnen Kapitel dieser Arbeit spiegeln die Phasen und Arbeitsschritte der Produktentwicklung wieder. Wo es sinnvoll ist, werden die nötigen theoretischen Grundlagen beschrieben, um die Basis für die darauffolgende Darstellung der praktischen Anwendung und ihrer Ergebnisse zu geben. Zusammen mit den im Anhang beigelegten Berechnungen, beinhaltet diese Arbeit die detaillierte Dokumentation der gesamten bisherigen Produktentwicklung und soll als Anhaltspunkt und Informationsquelle für die Weiterentwicklung dienen.

Aufgrund des Umfangs und der Komplexität der Aufgabe wurden Herr Michael Winkler und Herr Jakob Glazer hinzugezogen, um Teile des Projektes im Zuge Ihrer Bachelorarbeit mitzuarbeiten.

---

<sup>1</sup> (Verein Deutscher Ingenieure, 1993)

<sup>2</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

## 2 Aufgabenstellung

Aufgabe war die Entwicklung einer Beschattungsanlage für das österreichische Architekturbüro Häfele. Der Kunde suchte nach einer Beschattungslösung für eine große, zweistöckige Glasfassade. Die Anlage sollte durch senkrechte Lamellen realisiert werden, die automatisch gesteuert verfahren, gedreht sowie an vorgesehenen Stellen verriegelt werden können. Diese Lamellen sollten zusätzlich zur Gänze in einer „Garage“ verstaubar sein, um auf Wunsch einen freien Blick aus dem Hausinneren zu gewähren.

## 3 Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung

Bei diesem Produktentwicklungsschritt geht es um die Klärung und präzise Formulierung der lösungs- und gestaltbeeinflussenden Produktspezifikationen. Dabei versucht man, die Spezifikationen quantitativ zu beschreiben, da sie so besser überprüfbar sowie messbar sind. Sollte dies nicht möglich sein, muss man auf eine qualitative Beschreibungen zurückgreifen.

Um bei dieser Aufgabe keine wichtigen Punkte zu übersehen, sollte man sich der Unterschiede zwischen den verschiedenen Typen von Kundenanforderungen bewusst sein:

- **Grundlegende Anforderungen:** Diese sind nicht ausgesprochene, implizite Wünsche des Kunden. Sie werden deshalb nicht ausgesprochen, weil sie als selbstverständlich erachtet werden. Ihre Erfüllung ist, obwohl sie nicht bekanntgegeben werden, sehr wichtig, da ihr Fehlen große Unzufriedenheit des Kunden hervorruft.
- **Technisch kundenspezifische Anforderungen:** Hierbei handelt es sich um explizite Forderungen. Zu dieser Art der Anforderungen können konkrete Angaben gemacht werden. Sie werden vom Kunden klar angesprochen, und sind gut messbar was den Vergleich mit Mitbewerbern ermöglicht. Die Kundenzufriedenheit hängt in diesem Fall direkt mit dem Ausmaß der Erfüllung dieser Anforderungen zusammen.
- **Attraktivitätsanforderungen:** Diese sind dem Kunden oft selbst nicht bewusst und daher, ebenso wie die grundlegenden Anforderungen, implizit. Allerdings lösen sie bei Nichterfüllung keine Unzufriedenheit aus, können aber bei Erfüllung große Begeisterung beim Kunden auslösen.<sup>3</sup>

Unter Beachtung der Tatsache, dass nicht alle Kundenwünsche auch ausgesprochen werden, dass implizite Anforderungen aber den Unterschied zwischen einem gelungenen und einem nicht gelungenen Produkt ausmachen können, wird klar, dass dieser Schritt im Produktentwicklungsprozess keinesfalls vernachlässigt werden darf. Um keine wichtigen Anforderungen zu übersehen und ein geordnetes, gut dokumentiertes Vorgehen zu garantieren, dient die im folgenden Teilkapitel beschriebene Anforderungsliste als sehr nützliches Werkzeug.

---

<sup>3</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

### 3.1 Anforderungsliste

Beim Erstellen der Anforderungsliste werden zuerst offensichtliche Anforderungen festgehalten. Diese werden in einem zweiten Schritt mit Hilfe von Methoden wie der Hauptmerkmalliste sowie der Szenariotechnik ergänzt.

Wie schon oben erwähnt ist es dabei vor allem wichtig, präzise Aussagen zu machen. Quantitative Aussagen sind qualitativem vorzuziehen. Selbstverständliches ist wegzulassen und sofern es in einem frühen Stadium noch nicht möglich sein sollte, präzise Aussagen zu machen, ist dies zu einem späteren Zeitpunkt nachzuholen beziehungsweise zu ergänzen. Während des Erstellens der Anforderungsliste kann es vorkommen, dass erste Funktionen oder Lösungen angesprochen oder angedacht werden. Diese sollten nicht in die Anforderungsliste aufgenommen werden, jedoch für den späteren Produktentwicklungsprozess notiert werden.

Bei den Einträgen der Liste wird zwischen Forderungen und Wünschen unterschieden. Forderungen sind unter allen Umständen zu erfüllen. Bei Wünschen wird nach Möglichkeit versucht, diese unter begrenztem Mehraufwand zu erfüllen. Hier kann der akzeptable Mehraufwand natürlich mit ihrer Wichtigkeit variieren. Die Anforderungsliste ist ein sehr nützliches Mittel um Missverständnissen vorzubeugen. Der Auftraggeber muss klare Stellungnahmen abgeben und der Produktentwickler muss sich zwingend an diese Anforderungen halten.<sup>4</sup>

Der in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellten Anforderungsliste liegt ein schriftliches Dokument des Kunden zugrunde auf dem mit Hilfe der zuvor erwähnten Methoden aufgebaut wurde. In einem abschließenden Gespräch mit dem Kunden wurde jeder Punkt besprochen und fixiert.

---

<sup>4</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

TU Wien, E307 Institut für Konstruktionswissenschaften und technische Logistik		Anforderungsliste für Beschattungsanlage (V3)	Blatt: 1	Seite: 1
Änder.	F W	Anforderungen	Herkunft	
		<b>Geometrie</b>		
	F	senkrechte Lamellen	Häfele	
	F	Lamellenhöhe = 3,5m	Häfele	
	F	Lamellenstärke = 50mm	Häfele	
	F	Lamellenbreite = 378,6mm	Häfele	
	W	ästhetische Lamellen	Häfele	
	F	Die Motorik und der gesamte „Bahnhof“ sind architektonisch nur auf einer Seite vorgesehen.	Häfele	
	F	Maximalabmessungen der Führung oberhalb, unterhalb der Lamellen sowie zwischen 2 Stockwerken: H= 8cm; B=360cm	Häfele	
	F	Abmessungen des "Bahnhofes": L=1,2-1,4m	Häfele	
	F	Länge der zu beschattenden Hausfassade = 12m	Häfele	
	F	Hausfassade mit mehreren Stockwerken (mindestens 2)	Häfele	
		<b>Kinematik</b>		
	F	Lamellen in beide Richtungen verfahrbar	Häfele	
	F	translatorische Geschwindigkeit der Lamellen: 5 min um komplette Fassade zu verdunkeln	Institut	
	F	rotatorische Geschwindigkeit der Lamellen: 10 sek für 90°	Institut	
	W	translatorische Beschleunigung der Lamellen: 5 sek auf Fahrtgeschwindigkeit	Institut	
	W	rotatorische Beschleunigung der Lamellen: 1 sek auf Drehgeschwindigkeit	Institut	
	F	Lamellen können an diversen, genau bestimmten Stellen wahlweise angehalten und verriegelt werden	Häfele	
	F	verdrehen der Lamellen mit einer minimalen Teilung von 15°	Häfele	
	W	stufenloses Verdrehen der Lamellen	Häfele	
	F	maximaler Verdrehwinkel +/- 90° (Summe 180°)	Häfele	
	W	gleichzeitig in unterschiedliche Richtungen verfahrbar	Häfele	
		<b>Kräfte</b>		
	F	Obergrenze der Windgeschwindigkeit zum Verfahren/Drehen = 20 m/s	Institut	
	F	sturmsicher in geschlossenem Zustand	Häfele	
		<b>Energie</b>		
	F	Elektrische Anschlussleistung ist flexibel	Häfele	
		<b>Stoff:</b>		
	F	Lamellen aus metallischem Material (Ästhetik)	Häfele	
		<b>Sicherheit</b>		
	F	für Personen (Klemmschutz Poolbereich/Fenster)	Institut	
	F	gegen witterungsbedingte Beschädigung der Anlage	Institut	

Tabelle 1: Anforderungsliste, Seite 1



## 4 Konzipieren

Ziel des Konzipierens ist es, eine prinzipielle Lösung festzulegen. Um dabei nichts zu übersehen und nicht nur innerhalb festgefahrener Ideen zu agieren, bedient man sich der Abstraktion des Problems und der darauffolgenden Synthese.

In Abbildung 1 sind die Teilschritte der Phase des Konzipierens dargestellt. Wichtig dabei ist, dass ein mehrfaches Durchlaufen der Schritte mit einem besseren Informationsstand sehr sinnvoll sein kann.

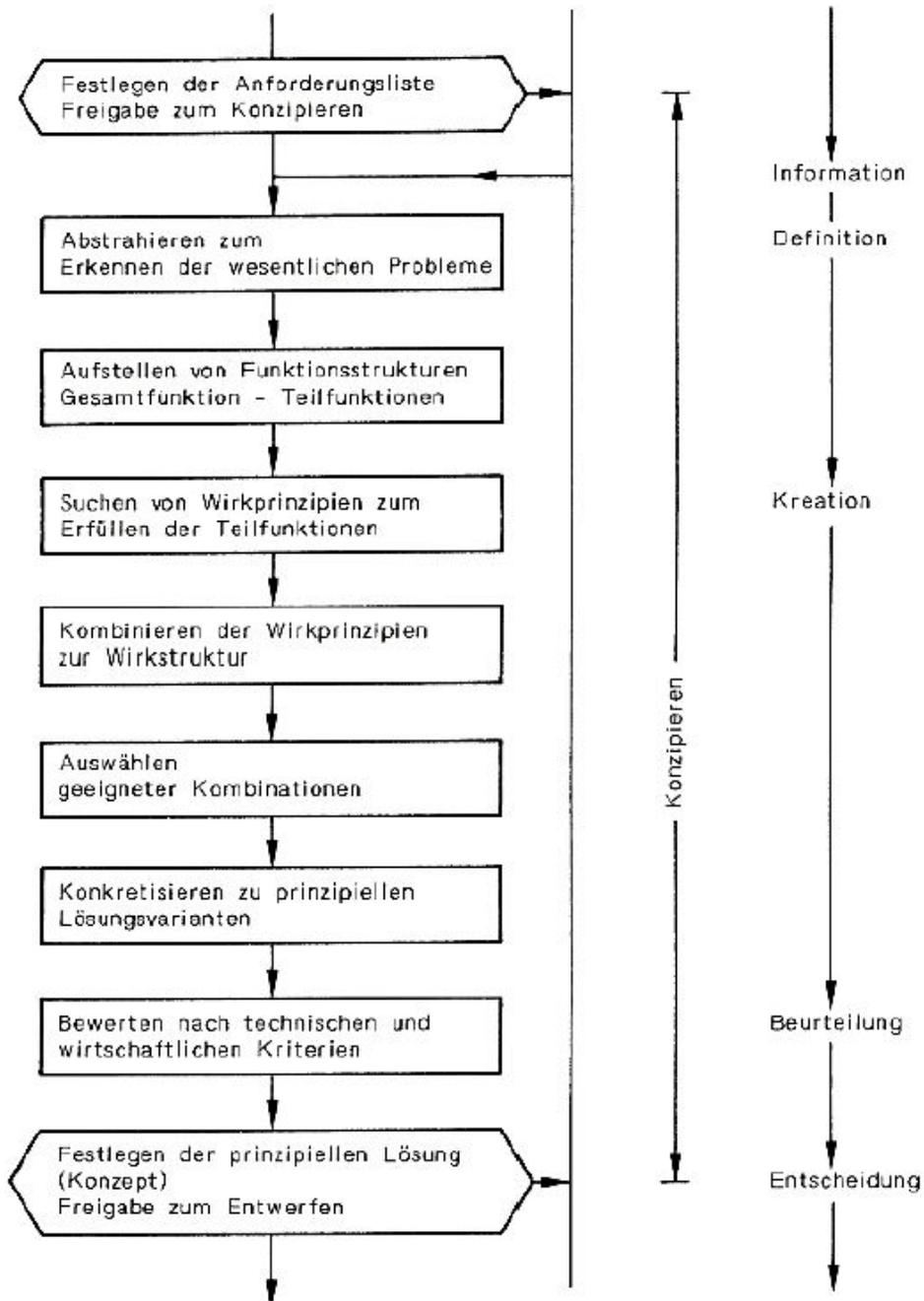


Abbildung 1: Teilschritte des Konzipierens<sup>5</sup>

<sup>5</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

## 4.1 Abstrahieren

Bei der Abstraktion geht es vorwiegend darum, den wesentlichen Kern der Aufgabe zu erkennen und zu bearbeiten und sich damit von Vorurteilen und Konventionen zu lösen. Sie hilft dabei, eigene Barrieren zu überwinden und nur echte Einschränkungen gelten zu lassen.<sup>6</sup>

Mit folgendem, schrittweisen Vorgehen kristallisieren sich die wesentlichen Eigenschaften der Beschattungsanlage aus der Anforderungsliste auf einfache Weise heraus:

1. Gedanklich Wünsche weglassen:
  - Siehe Anforderungsliste ohne Wünsche
2. Nur noch Funktionen berücksichtigen, die die Funktionen und wesentlichen Bedingungen unmittelbar betreffen:
  - Senkrechte Lamellen
  - Lamellen in beide Richtungen verfahrbar
  - Lamellen können an diversen, genau bestimmten Stellen wahlweise angehalten und verriegelt werden
  - Drehung der Lamellen an Verriegelungsstellen in beide Richtungen
3. Quantitative Angaben in qualitative umsetzen und dabei auf wesentliche Aussagen reduzieren:
  - Siehe 2 (Aussagen schon qualitativ)
4. Erkanntes sinnvoll erweitern:
  - Siehe 2 (Erweiterung nicht notwendig)
5. Problem lösungsneutral formulieren:

„Senkrechte Lamellen in beide Richtungen verfahren, an bestimmten Stellen anhalten, drehen und verriegeln.“

Wie man sieht hat sich auf diese Weise sehr schnell eine Definition der Zielsetzung auf abstrakter Ebene gefunden, ohne eine bestimmte Art der Lösung festzulegen. Bei der Bearbeitung der Anforderungsliste zur Findung einer lösungsneutralen Formulierung des Problems ist darauf zu achten, dass gegebene Bedingungen hinterfragt werden. Im Zweifelsfall sind diese mit dem Kunden abzuklären, da sie unnötige Behinderungen darstellen können.

---

<sup>6</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

## 4.2 Funktionsstruktur

Die Funktionsstruktur soll die gegebene Aufgabenstellung in einem Blockschaltbild übersichtlich und lösungsneutral darstellen, sowie den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen angeben. Die einzelnen Blöcke der Funktionsstruktur werden durch Gesamt- und Teilfunktionen gebildet, die lösungsneutral formuliert sind und im Optimalfall nur aus einem Verb und einem Nomen bestehen. Diese Funktionen werden durch Energie-, Stoff- und/oder Signalflüsse verbunden, die im Blockdiagramm durch verschiedenartige Pfeile dargestellt sind. Sie stellen ebenso die Verbindung des betrachteten Systems mit seiner Umgebung über die Systemgrenze hinaus dar. Beim Zusammenfügen der einzelnen Strukturelemente ist es zweckmäßig, den Hauptfluss zu erkennen und zunächst nur diesen zu verfolgen. Wenn dadurch eine Struktur entstanden ist, können weitere Flüsse hinzugefügt werden. Grundsätzlich ist bei der Bildung der Funktionsstruktur auf einen einfachen Aufbau zu achten, da ein solcher meist auch zu einfacheren und damit kostengünstigeren Lösungen führt. Es kann sich also durchaus als sinnvoll erweisen, die Struktur sowie die Systemgrenze zu variieren, um sie zu vereinfachen. Nachdem sich aus einer solchen Variation oft schon erste Lösungen ergeben, ist die Bildung der Funktionsstruktur bereits als ein Schritt der Lösungssuche zu betrachten.<sup>7</sup>

Da es sich bei dem vorliegenden Projekt um eine Neukonstruktion handelt, ist für die Bildung der Funktionsstruktur die Anforderungsliste und die daraus gewonnene abstrakte Problemformulierung als Ausgangspunkt zu sehen. Damit ergibt sich für die Gesamtfunktion:

*„Lamellen verfahren, drehen und verriegeln“.*

In einem weiteren Schritt wird nun die Gesamtfunktion in Teilfunktionen unterteilt, um die Komplexität zu verringern. Es ist also sinnvoll, diejenigen Funktionen noch einmal zu unterteilen, die besonders komplex sind. Ist die Unterteilung ausreichend und ein gutes Mittel zwischen einer geringen Komplexität der einzelnen Funktionen und einer geringen Komplexität der Funktionsstruktur gefunden, kann die Systemgrenze gelegt werden. In Abbildung 2 ist die Funktionsstruktur der Beschattungsanlage dargestellt. Ebenso sind die Schritte der Unterteilung gut zu erkennen. Auf die Darstellung des Energie- und des Informationsflusses wurde zu Gunsten der Einfachheit verzichtet.

---

<sup>7</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

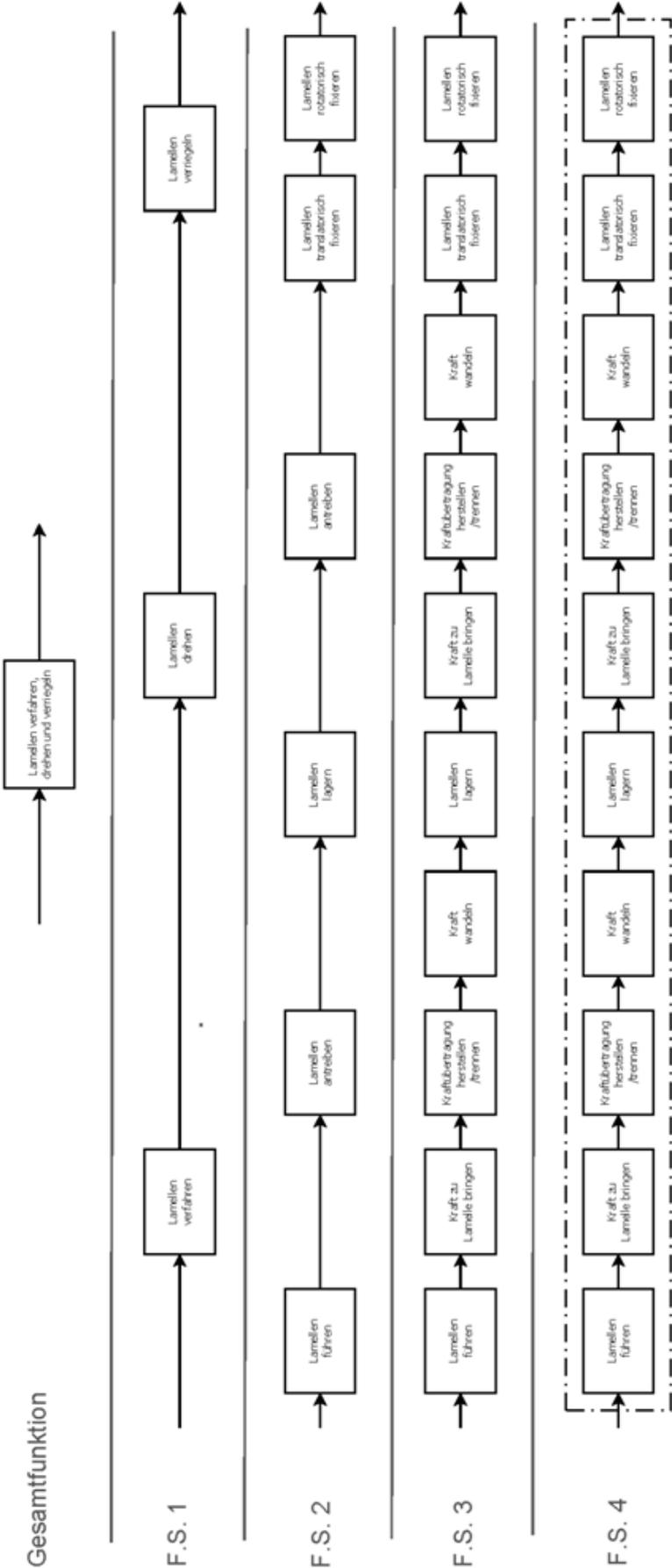


Abbildung 2: Funktionsstruktur der Beschattungsanlage

## 4.3 Suche nach Wirkprinzipien

Für die in der Funktionsstruktur verwendeten Teilfunktionen werden nun Wirkprinzipien gesucht. In der Regel werden diese in Prinzipskizzen dargestellt und enthalten den für die Erfüllung einer Funktion notwendigen physikalischen Effekt, sowie die geometrischen und stofflichen Merkmale. In den folgenden Teilkapiteln sind mehrere Methoden zur Lösungssuche und ihre Anwendung aufgeführt. Die Ergebnisse werden über ihre physikalischen Effekte sowie geometrischen Merkmale dargestellt.

### 4.3.1 Intuitiv betonte Methoden

Oft werden Lösungen intuitiv durch einen guten Einfall oder eine neue Idee gefunden. Diese Ideen sind aufgrund von Erfahrung und Fachkenntnis schon hinsichtlich ihrer Nützlichkeit vorgefiltert, ihre Herkunft ist allerdings oft nicht erkennbar. Um die intuitive Lösungsfindung zu fördern wurden die folgenden Methoden entworfen. Sie haben eine Durchführung in kleinen, aus Mitgliedern unterschiedlicher Fachgebiete bestehenden Gruppen gemeinsam:

- Brainstorming
- Synektik
- Galeriemethode
- Methode 635

Viele der im folgenden Morphologischen Kasten beschriebenen Wirkprinzipien wurden mittels intuitiver Ideenfindung gewonnen. Einige darunter sind durch die Anwendung der Methode der Synektik entstanden, die zur Lösungsfindung Analogien verwendet. Diese Analogien finden sich für die Lösung technischer Probleme eher in nichttechnischen oder halbtechnischen Bereichen. Obwohl die Vorgehensweise dieses Verfahrens systematischer als beim Brainstorming ist, gelten dennoch dieselben Regeln bezüglich Unbefangenheit und Vermeidung von Hemmung und Kritik.<sup>8</sup>

Die Ergebnisse der Anwendung dieser Methode finden sich in Tabelle 3.

---

<sup>8</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

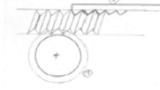
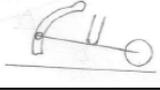
SYNEKTIK			
Funktion(en)	Analogie	Lösungsvorschlag	Bild/Erklärung
Lamellen führen Lamellen lagern	Schwimmkörper	Wasser muss soundso abgefangen werden	
Lamellen transl./rotat. verriegeln	Flöte	Löcher verschließen und nur öffnen wenn Lamelle stehen bleiben/einrasten soll	
Lamellen führen	Klappstuhl	Platz sparen in Bahnhof	
Lamellen antreiben	Zeichenblock	Schnecke zur Fortbewegung	
Lamellen transl./rotat. verriegeln	Teesieb	Schnappverbindung zum Ver-/Entriegeln	
Lamellen antreiben Lamellen transl./rotat. verriegeln	Couvoisier Kanone	Hebel über Drehpunkt zum Ver-/Entriegeln	
Lamellen antreiben Lamellen transl./rotat. verriegeln	Kleiderhaken ohne Haken	Lamelle leicht von Kupplung und Aufhängevorrichtung entkoppelbar zum Austausch	
Lamellen führen	Schubladen mit Plastikführung	Verzicht auf Rollen	
Lamellen transl./rotat. verriegeln	Terrassentüre	Hebel zum Ver-/Entriegeln	
Lamellen antrieben	Ruderanlage Segelboot	Motor/Getriebe in der Mitte zwischen beiden "Antriebsrädern"	
Lamellen transl./rotat. verriegeln	Klettern Schlingen	Schlingen oder Ösen werden durch ortsfestes Stellsystem umgeklappt und rasten ein	
Lamellen transl./rotat. verriegeln	Papierklammern	Lagerung/Führung mit Mulde und Feder (auch radial)	

Tabelle 3: Ergebnisse Synektik

### 4.3.2 Diskursiv betonte Methoden

Bei der Anwendung diskursiver Methoden ergeben sich Lösungen, im Unterschied zu den oben beschriebenen intuitiven Methoden, durch ein in Arbeitsschritte unterteilbares Vorgehen. Hierbei soll Intuition nicht ausgeschlossen sondern auf die Einzelprobleme fokussiert werden. Die Problemlösung mittels Konstruktionskatalogen ist eine dieser diskursiven Methoden. In Konstruktionskatalogen finden sich bewährte Lösungen für Teilfunktionen beziehungsweise für konstruktive Aufgaben. Diese Lösungen können physikalische Effekte, Wirkprinzipien sowie Lösungen für komplexere Aufgabenstellungen darstellen. In der untenstehenden Tabelle 4 sind die mittels dieser Methode gefundenen Lösungen dargestellt.<sup>9</sup>

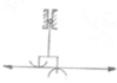
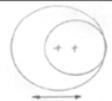
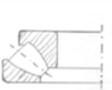
KATALOGE						
Funktion(en)	Stelle in Roth					
Lamellen transl. verriegeln	11.2.4					
Lamellen transl. verriegeln	11.3.6					
Lamellen rotat. verriegeln	11.4.3					
Lamellen antrieben	Bild 11.51					
Lamellen lagern	11.9.4					
						

Tabelle 4: Ergebnisse Konstruktionskataloge<sup>10</sup>

<sup>9</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

<sup>10</sup> (Roth, 1994)

### 4.3.3 Recherche

Um auf weitere Lösungsmöglichkeiten zu kommen wurde in der Literatur aus den Bereichen Fördertechnik und Maschinenbau (siehe Tabelle 5) sowie im Internet (siehe Tabelle 6) recherchiert.

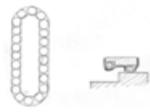
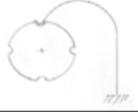
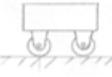
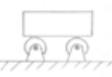
LITERATURRECHERCHE - (Muhs, Wittel, Jannasch, & Voßiek, 2007)						
Funktionen(en)	Seite					
Lamellen antrieben	S643					
Lamellen verriegeln	S286					
Lamellen antrieben/verriegeln	S412	 <i>Ein Stecker mit Kugel verbunden</i>				
LITERATURRECHERCHE - (Haberhauer & Bodenstein, 1996)						
Funktionen(en)	Seite					
Lamellen führen	S439					
LITERATURRECHERCHE - (Tuttle, 1967)						
Funktionen(en)	Seite					
Lamellen antrieben/verriegeln	S41 internal geneva					
Lamellen verriegeln	S142 circular detents					
LITERATURRECHERCHE - (Springer, 1995)						
Funktionen(en)	Seite					
Lamellen antrieben/verriegeln	S19					
LITERATURRECHERCHE - (McGraw & Hill)						
Funktionen(en)	Seite					
Lamellen führen						
LITERATURRECHERCHE - (Hoffmann, Krenn, & Stanker, 2005)						
Funktionen(en)	Seite					
Lamellen führen	S18					

Tabelle 5: Literaturrecherche

INTERNETRECHERCHE					
<b>Name</b>	Hubmagnet + Zahnrad	Harmonic drive	Zykloidgetriebe		
<b>Quelle</b>	www.red- magnetics.com	www.harmonicdrive.d e	http://de.wikipedia.or g/wiki/Zykloidtrieb e		
<b>Funktion(en)</b>	Lamellen verriegeln	Lamellen antreiben	Lamellen antreiben		
					

Tabelle 6: Internetrecherche

#### 4.3.4 Morphologischer Kasten

Das Endergebnis dieser Lösungssuche sollte ein sich aus den Teilfunktionen und den zugeordneten Wirkprinzipien ergebendes Lösungsfeld sein. In Tabelle 7 bis Tabelle 9 werden alle zuvor beschriebenen sowie intuitiv ergänzten Wirkprinzipien nach ihrer Verwendbarkeit für die verschiedenen Teilfunktionen geordnet angegeben. Kombiniert man diese drei Tabellen, so ergeben sie einen sehr detailreichen Morphologischen Kasten, der in dieser Form nicht der Weiterbearbeitung in den folgenden Produktentwicklungsschritten dienen soll. Er ist eher als Auflistung gedacht, um typische Lösungsmöglichkeiten nicht zu vergessen und ungewöhnliche Lösungsansätze nicht zu übersehen.

Lösung Funktion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Funktion	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Lamellen führen												
	Zahnriemen Keilriemen Drahtseil Kette	Zahnriemen Keilriemen Drahtseil Kette	Zahnriemen Keilriemen Drahtseil Kette	Zahnriemen Keilriemen Drahtseil Kette	Zahnriemen Keilriemen Drahtseil Kette	Schnecke	Zahnriemen Keilriemen Drahtseil Kette	Zahnriemen Keilriemen Drahtseil Kette	Zahnriemen Keilriemen Drahtseil Kette	Motor(en) auf jeder Lamelle	Motor(en) in Laufkatze(n)	Laufkatze(n) + externer Motor(en)
Kraft zu Lamelle bringen												
	Reibkupplung (Scheibekupplung, Kegelkupplung, Zylinderkupplung)	Schragverzahnung	Zange	Haken	Rad bewegt sich	Stift	Drehung blockieren	Blöcke	Blöcke	Block auf Rad (Reib- /Formschluss)	Zahnstange	Formschluss (90°, 60° usw.)
Kraftübertragung herstellen/trennen												
	Rücklaufsperr e	Rücklaufsperr e	T-Fliplop	Rücklaufsperr e	Schaliklaue	Fahrradschaltung						Weichensystem
Kraft wandeln												
	Stirnrad	Kegelrad	Stirnrad- schraubgetriebe	Kegelrad- Schraubgetriebe	Schneckengetriebe	Malterskreuz- Getriebe	Internal genova	Innen-aussen	Zykloidgetriebe	harmonic drive		

Tabelle 7: detaillierter Morphologischer Kasten; Lamellen verfahren



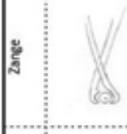
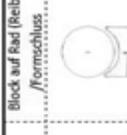
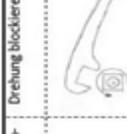
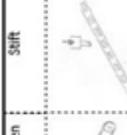
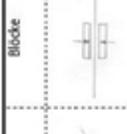
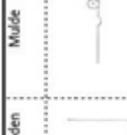
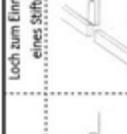
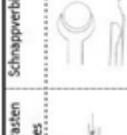
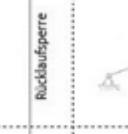
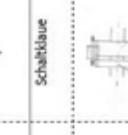
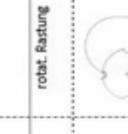
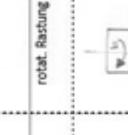
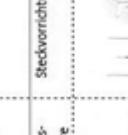
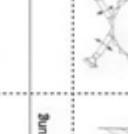
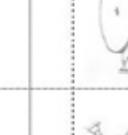
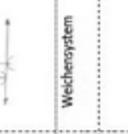
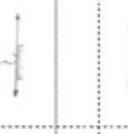
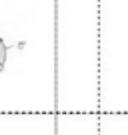
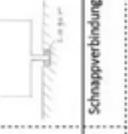
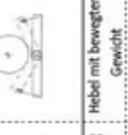
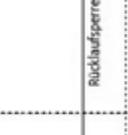
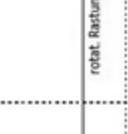
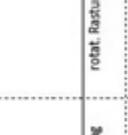
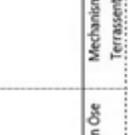
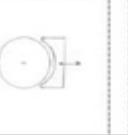
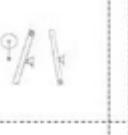
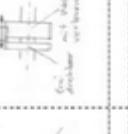
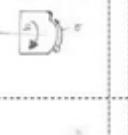
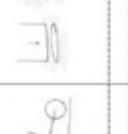
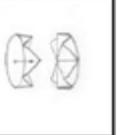
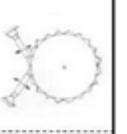
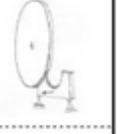
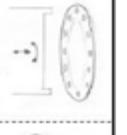
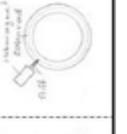
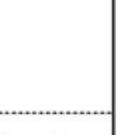
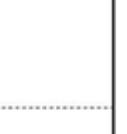
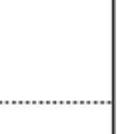
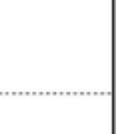
Lamellen verriegeln		Lamellen translatorisch fädern										Lamellen rotatorisch fädern											
Ausnehmung	Stifte blockieren	Zange	Block auf Rad (Reib-/Formschluss)	Drehung blockieren	Stift	Blöcke	Reibung am Boden	Mulde	Loch zum Einrasten eines Stiftes	Schnappverbindung	Hebel mit bewegtem Gewicht	Trennen der Lamelle vom Rest	Rücklauf Sperre	Rücklauf Sperre	Rücklauf Sperre	Schaltklappe	rotat. Rastung	Mechanismus-Terrassentüre	Steckvorrichtung	Einlinken von Ose	Mechanismus-Terrassentüre	Steckvorrichtung	
																							
																							
																							

Tabelle 9: detaillierter Morphologischer Kasten; Lamellen verriegeln

Um auf einen für die weitere Produktentwicklung verwendbaren Morphologischen Kasten zu kommen wurden die Wirkprinzipien des detaillierten Morphologischen Kastens auf ihre Verfolgungswürdigkeit geprüft und zusammengefasst. Auf diese Weise ergab sich die in Tabelle 10 dargestellte, übersichtliche Aufteilung mit maximal fünf Wirkprinzipien pro Teilfunktion.

		Lösung				
Funktion		1	2	3	4	5
Lamellen verfahren	Lamellen führen	Linear-Wälzlager	Linear-Gleitlager	Rolle(n)		
	Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
	Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
	Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuz-getriebe		
Lamellen drehen	Lamellen lagern	Gleitlager	Wälzlager	Axiallager	Radiallager	
	Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
	Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
	Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuz-getriebe		
Lamellen verriegeln	Lamellen translatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial
	Lamellen rotatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial

*Tabelle 10: Morphologischer Kasten; komprimiert*

## 4.4 Kombination zu Wirkstrukturen

Bei diesem Schritt der Synthese wird versucht, die Gesamtfunktion durch Verknüpfung der den Teilfunktionen zugeordneten Wirkprinzipien zu einer Wirkstruktur zu erfüllen. Dabei ist vor allem auf die Verträglichkeit zwischen den verbundenen Wirkprinzipien sowie auf Kollisionsfreiheit in geometrischer Hinsicht zu achten. Bei der Auswahl der Kombinationen muss neben der Erfüllung der technischen Funktionen auch auf die Einhaltung der Sicherheit sowie auf die wirtschaftliche Realisierbarkeit Wert gelegt werden. Aus diesem Grund wird dieser Schritt oft in interdisziplinären Teams durchgeführt. So können zum Beispiel Konsequenzen für die Fertigung schon in diesem frühen Stadium besser abgeschätzt werden.

Um die ausgewählte Wirkstruktur hinsichtlich ihrer Eignung beurteilen zu können, müssen folgende Punkte behandelt werden:

- Orientierende vereinfachte Berechnung
- Skizzen, wenn möglich schon maßstäblich
- Quantitatives wirtschaftliches Konzept <sup>11</sup>

<sup>11</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

### 4.4.1 Lösungsvariante 1

		Lösung Funktion	1	2	3	4	5
A	Lamellen verfahren	Lamellen führen	Linear-Wälzlager	Linear-Gleitlager	Rolle(n)		
B		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
C		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
D		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuz- getriebe		
E	Lamellen drehen	Lamellen lagern	Gleitlager	Wälzlager	Axiallager	Radiallager	
F		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
G		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
H		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuz- getriebe		
I	Lamellen verriegeln	Lamellen translatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial
J		Lamellen rotatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial

**Tabelle 11: Wirkstruktur LV1**

Um einen Überblick über die ausgewählten Wirkprinzipien zu geben, ist in der obigen Tabelle 11 die Wirkstruktur von Lösungsvariante 1 dargestellt. In Abbildung 3 und Abbildung 4 sind Skizzen zur leichteren Verständlichkeit der folgenden Beschreibung zu finden.

Die Lamelle ist in der Lamellenaufhängung gelagert. Werden beide Zahnriemen (Zahnriemen 1 [über Verbinder mit Lamellengehäuse verbunden] und Zahnriemen 2 [über Verbinder mit Lamelle verbunden]) gleichzeitig angetrieben, so bewegt sich die Lamelle in x-Richtung translatorisch, was einem Verfahren entlang der Fensterflächen gleichkommt. Befindet sich die Lamelle an der richtigen Stelle, wird Zahnriemen 1 angehalten, jedoch Zahnriemen 2 weiter verfahren (entweder in x-Richtung → Drehung in + Richtung oder in minus x-Richtung → Drehung in - Richtung). Die Drehung wird dadurch bewirkt, dass Zahnriemen 2 über den Verbinder und die Führungsrolle mit der Lamelle verbunden ist und bei einer Linearbewegung des Verbinders die Lamellenflanke verdreht. Dabei bewegt sich die Stützschiene mit dem zugehörigen Zahnriemen 2 in Richtung Fassade (y-Richtung). Die Fassade ist in vier Abschnitte unterteilt. Um unterschiedliche Stellungen der Lamellen auf den einzelnen Abschnitten zu ermöglichen, ist jeder Abschnitt mit eigenen Zahnriemen ausgestattet. Die Verbinder der Lamellen werden an den Übergängen zwischen den Abschnitten von Zahnriemen zu Zahnriemen übergeben. Die Zahnriemen werden dazu von über Encoder gesteuerten Schrittmotoren synchron angetrieben.

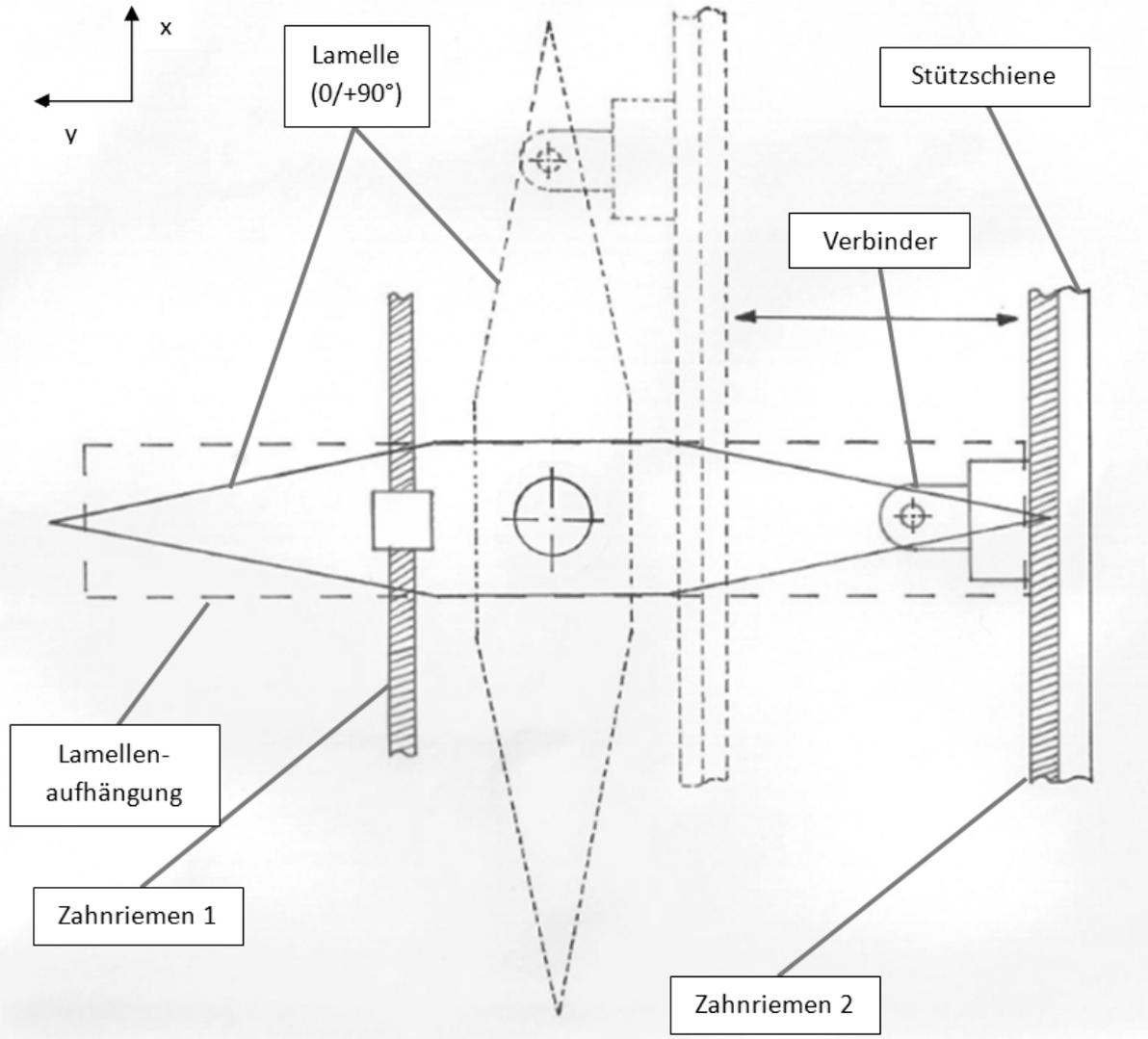


Abbildung 3: Prinzipskizze Grundriss LV1

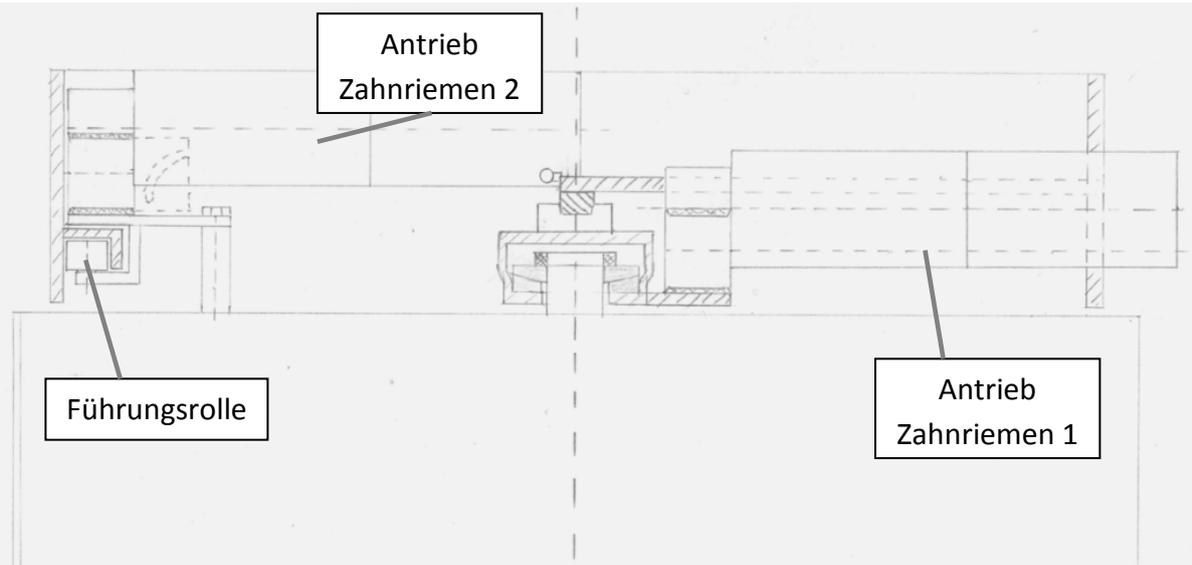


Abbildung 4: Skizze Aufriss LV1

### 4.4.2 Lösungsvariante 2

Bei dieser Lösungsvariante wurde versucht, mithilfe eines Schaltgetriebes eine formschlüssige Kupplung sowie eine stufige Verriegelung zu realisieren (siehe Tabelle 12).

		Lösung					
		Funktion	1	2	3	4	5
A	Lamellen verfahren	Lamellen führen	Linear-Wälzlager	Linear-Gleitlager	Rolle(n)		
B		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
C		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
D		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuzgetriebe		
E	Lamellen drehen	Lamellen lagern	Gleitlager	Wälzlager	Axiallager	Radiallager	
F		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
G		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
H		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuzgetriebe		
I	Lamellen verriegeln	Lamellen translatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial
J		Lamellen rotatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial

**Tabelle 12: Wirkstruktur LV2**

Zahnrad 2 ist verschiebbar (genaue Ausführung in Prinzipskizze vernachlässigt) auf der Lamellenwelle aufgebracht (siehe Abbildung 5). In der eingezeichneten Stellung 1 (ganz oben) ist es mit dem Zahnrad 1 verbunden (im Eingriff). In dieser Position stellt der Linearaktor eine Verbindung mit einer Verriegelung her, sodass die Lamelle translatorisch fixiert ist. Wird nun der Zahnriemen angetrieben, so dreht sich die Lamelle.

Wird Zahnrad 2 ganz nach unten geschoben, so ist es mit der "Verzahnung" im Eingriff, wodurch die Lamelle formschlüssig mit der Lamellenaufhängung verbunden wird und eine Rotation verhindert wird. Wenn zusätzlich noch der Linearaktor gegen eine Linearbewegung sichert, so ist die Lamelle im fixierten Zustand.

Wenn Zahnrad 2 in Mittelstellung gebracht wird - das bedeutet, dass es sowohl mit Zahnrad 1 als auch mit der "Verzahnung" im Eingriff ist - dann wird die Lamelle gegen Verdrehen gesichert. Treibt man nun den Zahnriemen an, so kann sich Zahnrad 1 nicht drehen, wodurch sich die gesamte Lamellenaufhängung inklusive Lamelle linear in x-Richtung bewegt (natürlich darf dazu der Linearaktor nicht im Eingriff mit der Verriegelung sein).

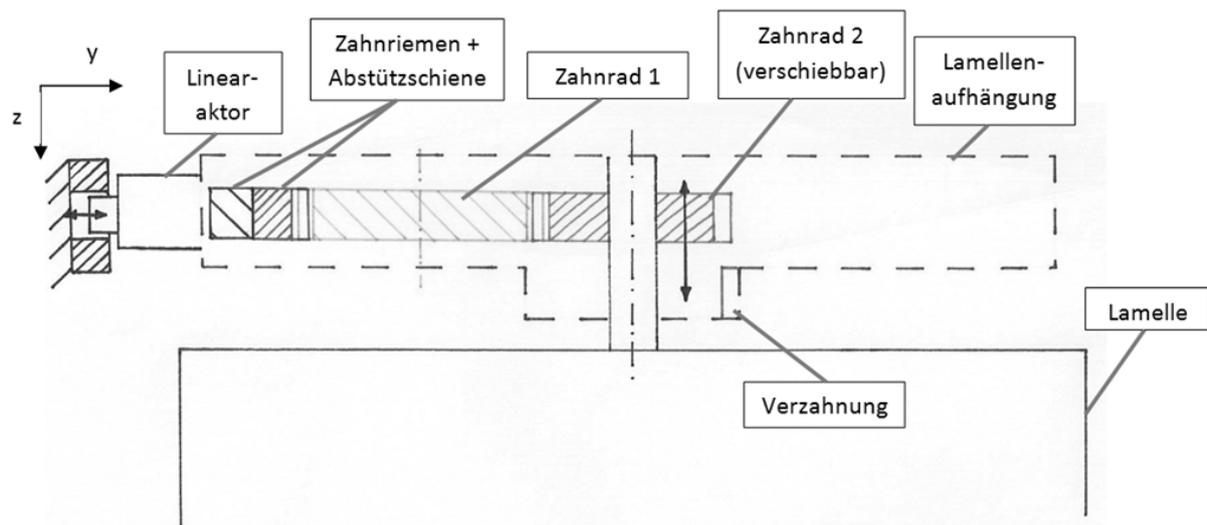


Abbildung 5: Prinzipskizze LV2

### 4.4.3 Lösungsvariante 3

Wie in Tabelle 13 ersichtlich, wurden ähnliche Wirkprinzipien wie bei Lösungsvariante 2 verwendet. Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten liegen hauptsächlich in der geometrischen Anordnung der Bauteile.

		Lösung	1	2	3	4	5
		Funktion					
A	Lamellen verfahren	Lamellen führen	Linear-Wälzlager	Linear-Gleitlager	Rolle(n)		
B		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
C		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
D		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuzgetriebe		
E	Lamellen drehen	Lamellen lagern	Gleitlager	Wälzlager	Axiallager	Radiallager	
F		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
G		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
H		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuzgetriebe		
I	Lamellen verriegeln	Lamellen translatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial
J		Lamellen rotatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial

Tabelle 13: Wirkstruktur LV3

In der dargestellten Stellung (siehe Abbildung 6) verbindet die Schaltmuffe Zahnrad 3 und 4. Weiters ist die Außenverzahnung (mit Lamellenaufhängung fest verbunden) mit dem Zahnrad 1 im Eingriff. Beginnt sich nun der Zahnriemen zu drehen, wird die Lamellenaufhängung, und damit die Lamelle, linear (in x-Richtung) bewegt.

Wird das Zahnrad 1 über den Schalthebel, durch den Linearaktor in y-Richtung (nach rechts) gezogen, so befindet sich das Zahnrad 1 nicht mehr im Eingriff mit der Außenverzahnung. Gleichzeitig wird die Lamellenaufhängung durch den Linearaktor 1 in x-Richtung fixiert. Dreht sich nun der Zahnriemen, und die Schaltmuffe befindet sich weiterhin in der dargestellten Position, dann wird die Lamelle über das Kronenrad in Rotation versetzt.

Wenn die Schaltmuffe nach links bewegt wird (durch Linearaktor 2), dann wird die Verbindung zum Zahnriemen getrennt, sodass dieser andere Lamellen verfahren kann, ohne die entkoppelte zu beeinflussen. Gleichzeitig muss der Linearaktor 2 das Lamellengehäuse gegen ein Verfahren in x-Richtung sichern und Zahnrad 2 muss sich im Eingriff mit der Außenverzahnung befinden, um ein Drehen der Lamelle zu verhindern.

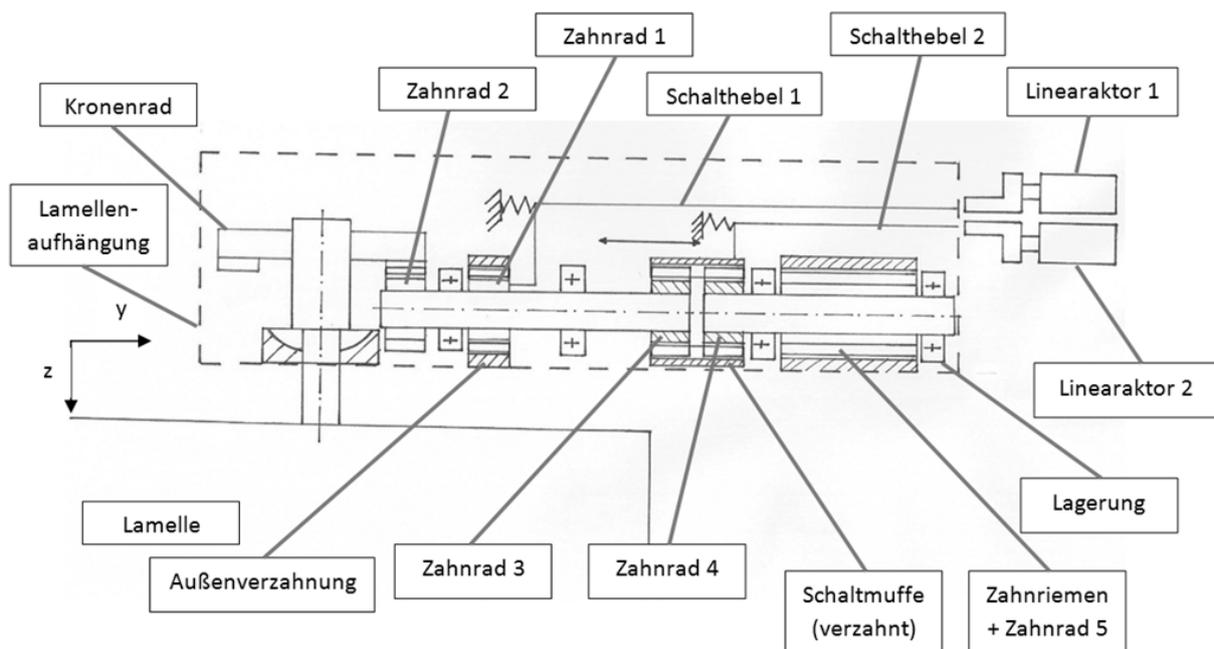


Abbildung 6: Prinzipskizze LV3

#### 4.4.4 Lösungsvariante 4

		Lösung Funktion	1	2	3	4	5
A	Lamellen verfahren	Lamellen führen	Linear-Wälzlager	Linear-Gleitlager	Rolle(n)		
B		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
C		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
D		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuz- getriebe		
E	Lamellen drehen	Lamellen lagern	Gleitlager	Wälzlager	Axiallager	Radiallager	
F		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
G		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
H		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuz- getriebe		
I	Lamellen verriegeln	Lamellen translatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial
J		Lamellen rotatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial

**Tabelle 14: Wirkstruktur LV4**

Wie in Tabelle 14 zu sehen ist, ist die Besonderheit dieser Lösungsvariante die Verwendung eigener Antriebe für jede Lamelle, welche je nach Stellung der zugehörigen Linearaktoren eine Lamellendrehung oder eine Linearbewegung erzeugen.

Zum linearen Verfahren der Lamelle, wird der Linearaktor 1 (siehe Abbildung 7) in Eingriff gebracht, wodurch ein Verdrehen der Lamelle verhindert wird. Linearaktor 2 befindet sich nicht im Eingriff. Treibt der Antrieb nun das Zahnrad an, so rollt dieses auf der Zahnstange ab und die Lamelle bewegt sich, gemeinsam mit dem Lamellengehäuse, translatorisch.

Beim Verdrehen wird der Linearaktor 1 freigegeben und der Linearaktor 2, auf welchem eine Verzahnung angebracht ist, in Eingriff gebracht, wodurch die Lamelle translatorisch fixiert wird. Wird nun der Antrieb eingeschaltet, verdreht sich die Lamelle.

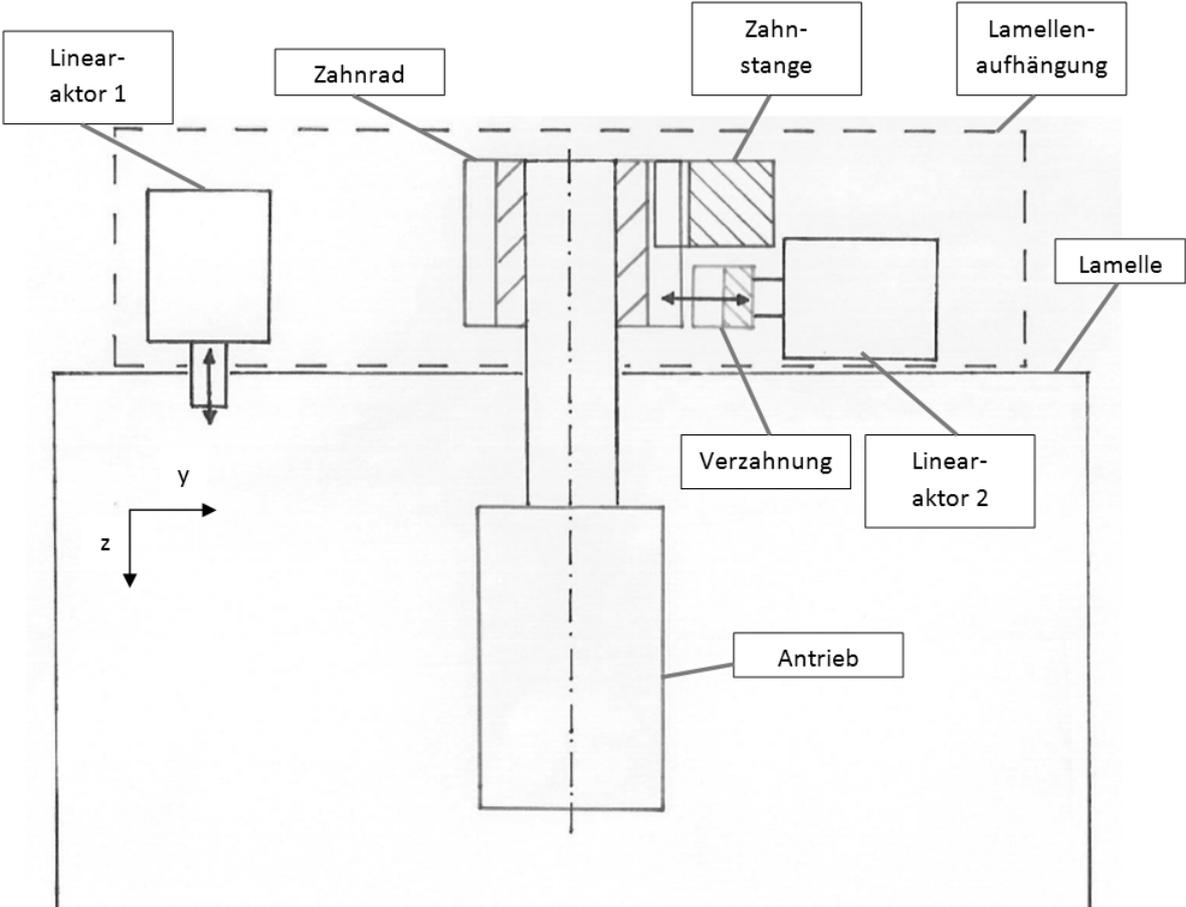


Abbildung 7: Prinzipskizze LV4

#### 4.4.5 Lösungsvariante 5

		Lösung Funktion	1	2	3	4	5
A	Lamellen verfahren	Lamellen führen	Linear-Wälzlager	Linear-Gleitlager	Rolle(n)		
B		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
C		Kraftübertragung herstellen/trennen	Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
D		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuz- getriebe		
E	Lamellen drehen	Lamellen lagern	Gleitlager	Wälzlager	Axiallager	Radiallager	
F		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
G		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
H		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuz- getriebe		
I	Lamellen verriegeln	Lamellen translatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial
J		Lamellen rotatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial

**Tabelle 15: Wirkstruktur LV5**

Jeweils sieben Lamellen werden zu einem Paket zusammengeschlossen, was bedeutet, dass dieses Paket nur gemeinsam verfahren und verdreht werden kann. Das ergibt bei 28 Lamellen vier separat manipulierbare Pakete. Die für diese Lösungsvariante verwendeten Wirkprinzipien sind in Tabelle 15 dargestellt.

Die Lamellenaufhängung (siehe Abbildung 8) ist auf zwei Führungsschlitten gelagert, die sich wiederum auf dem Trägerblech abstützen. Die Lamelle ist mit der Lamellenaufhängung über ein Gelenklager verbunden.

Die Aufhängung der jeweils ersten Lamelle eines Paketes gibt die Bewegung vor. Sie ist durch Zahnriemen und Zahnriemenscheiben mit den dahinterliegenden Lamellenaufhängungen verbunden. Diese werden also mitbewegt, wenn die erste Lamelle verfahren oder rotiert wird. Das Trägerblech ist fix mit einem Seilstrang verbunden, weiters ist auch die Seilscheibe mit einem Seilstrang verbunden. Werden nun beide Seile gleichzeitig angetrieben, bewegt sich die erste Lamelle linear, ohne sich zu drehen und zieht die anderen Lamellen hinterher. Wird nur der Seilstrang für die Seilscheibe angetrieben und der andere Seilstrang festgehalten, so dreht sich die Lamelle und dreht über die Zahnriemenverbindung auch die hinteren Lamellen mit.

Um die Lamellen auf Abstand zu halten und Spannung in den Zahnriemen zu erzeugen, ist ein Linearaktor vorgesehen, der jeweils immer die letzte Lamelle des Lamellenpaketes gegen ein weiteres Verfahren sichert. Für jedes Lamellenpaket sind eigene Antriebe notwendig, oder es ist ein Kupplungssystem vorzusehen. Welche Variante wirtschaftlicher ist, ist zu überprüfen.

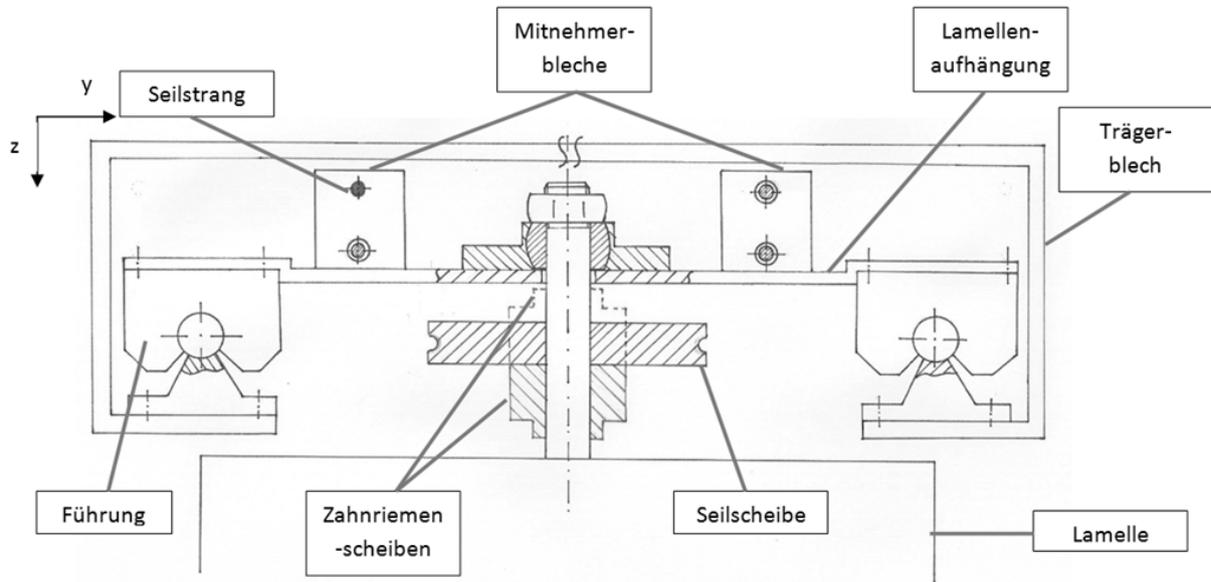


Abbildung 8: Prinzipskizze LV5

### 4.4.6 Lösungsvariante 6

Bei dieser Lösungsvariante wird die Fassade in vier Streckenabschnitte unterteilt. Die Lamellen können zwischen diesen Abschnitten übergeben und an jedem beliebigen Ort gedreht werden. Ausgangspunkt für diese Variante ist die Wirkstruktur in Tabelle 16.

		Lösung	1	2	3	4	5
		Funktion					
A B C D	Lamellen verfahren	Lamellen führen	Linear-Wälzlager	Linear-Gleitlager	Rolle(n)		
		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuzgetriebe		
E F G H	Lamellen drehen	Lamellen lagern	Gleitlager	Wälzlager	Axiallager	Radiallager	
		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuzgetriebe		
I J	Lamellen verriegeln	Lamellen translatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial
		Lamellen rotatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial

Tabelle 16: Wirkstruktur LV6

An der Lamellenwelle ist ein Zahnrad (siehe Abbildung 9) befestigt, welches mit zwei Zahnriemen verbunden ist. Die Zahnriemen sind lediglich außen verzahnt und werden über verzahnte Antriebsräder angetrieben und über (nicht verzahnte) Synchronscheiben geführt. Die Zahnriemen werden über Stützschiene abgestützt. Bewegen sich beide Zahnriemen synchron in die gleiche Richtung, so wird die Lamelle translatorisch in x-Richtung bewegt, ohne sich zu drehen. Bewegen sich die Zahnriemen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit, oder in entgegengesetzte Richtung, dann wird die Lamelle gedreht.

Die Zahnriemen werden wechselweise "oben" und "unten" an den Synchronscheibenwellen angebracht. Die übereinanderliegenden Synchronscheiben sind voneinander entkoppelt, wodurch es möglich wird, einzelne Streckenabschnitte anzusteuern und die restlichen Zahnriemen nicht zu verfahren. Dadurch können alle in einem Streckenabschnitt befindlichen Lamellen gleichzeitig angesteuert werden, ohne die restlichen zu beeinflussen.

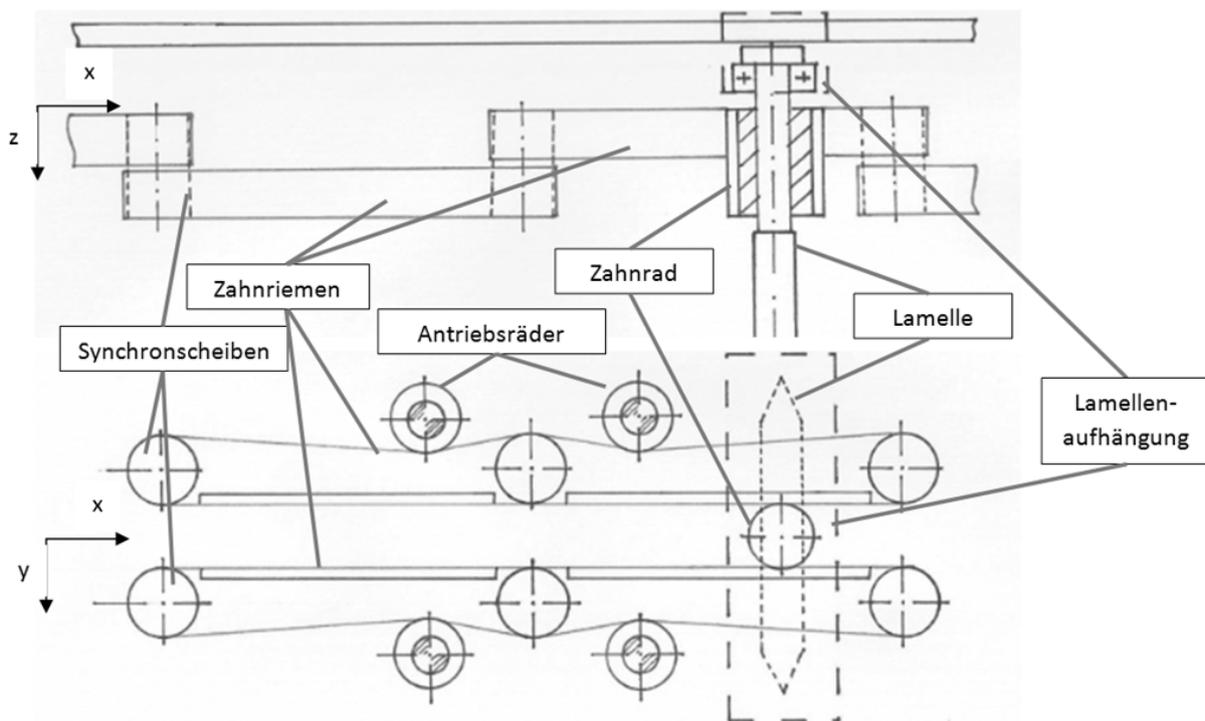


Abbildung 9: Prinzipskizze LV6

#### 4.4.7 Lösungsvariante 7

		Lösung Funktion	1	2	3	4	5
A	Lamellen verfahren	Lamellen führen	Linear-Wälzlager	Linear-Gleitlager	Rolle(n)		
B		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
C		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
D		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuzgetriebe		
E	Lamellen drehen	Lamellen lagern	Gleitlager	Wälzlager	Axiallager	Radiallager	
F		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
G		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
H		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuzgetriebe		
I	Lamellen verriegeln	Lamellen translatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial
J		Lamellen rotatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial

**Tabelle 17: Wirkstruktur LV7**

Wie schon bei einigen anderen Lösungsvarianten wurde auch hier auf die formschlüssige Kupplung und stufige Verriegelung Wert gelegt (siehe Tabelle 17). Die Lamellen werden über einen Zahnriemen angetrieben. Ob die Lamellen verfahren, sich drehen oder der Zahnriemen keine Kraft auf die Lamelle überträgt, hängt von der Stellung der Linearaktoren (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11) ab, die in allen Fällen als bistabile Hubmagnete ausgeführt sind. Die von außen in die Gehäuse eingreifenden Aktoren sind zur Verriegelung der Lamellen an ihrem vorgesehenen Standort vorgesehen. Bei ihrem Eingriff versorgen sie die jeweiligen Lamellen mit Strom, sodass die im Gehäuse ober- und unterhalb der Lamellen sitzenden Aktoren gesteuert werden können.

Um nun die Lamelle verfahren zu können müssen alle drei Aktoren in die ihnen zugehörigen Zahnräder eingreifen und diese blockieren. Soll eine Lamelle verdreht werden, so geschieht das durch das Öffnen der Aktoren 2 und 3. Der Kraftfluss führt über die Riemenscheibe, das Zahnrad 1 und das auf der Abtriebswelle gelagerte Zahnrad 2 auf den Aktor 1, der fix mit der Abtriebswelle verbunden ist. Soll die Kraft des Zahnriemens, zum Beispiel für das Verfahren anderer Lamellen nicht auf die Lamelle übertragen werden, müssen die Aktoren 1 und 3 öffnen und Aktor 2 geschlossen bleiben um ein Verdrehen der Lamelle zu verhindern. Das eigentliche Kupplungssystem mit den Aktoren 1 und 2 sowie den Zahnrädern 1-3 ist abwechselnd oben und unten angeordnet. Das (bei Überlappung der Lamellen) durch den Wind entstehende Moment löst somit eine verhältnismäßig kleine Kraft an Zahnrad 2 aus, welches durch diese Anordnung mit einem größeren Durchmesser ausgeführt werden kann.

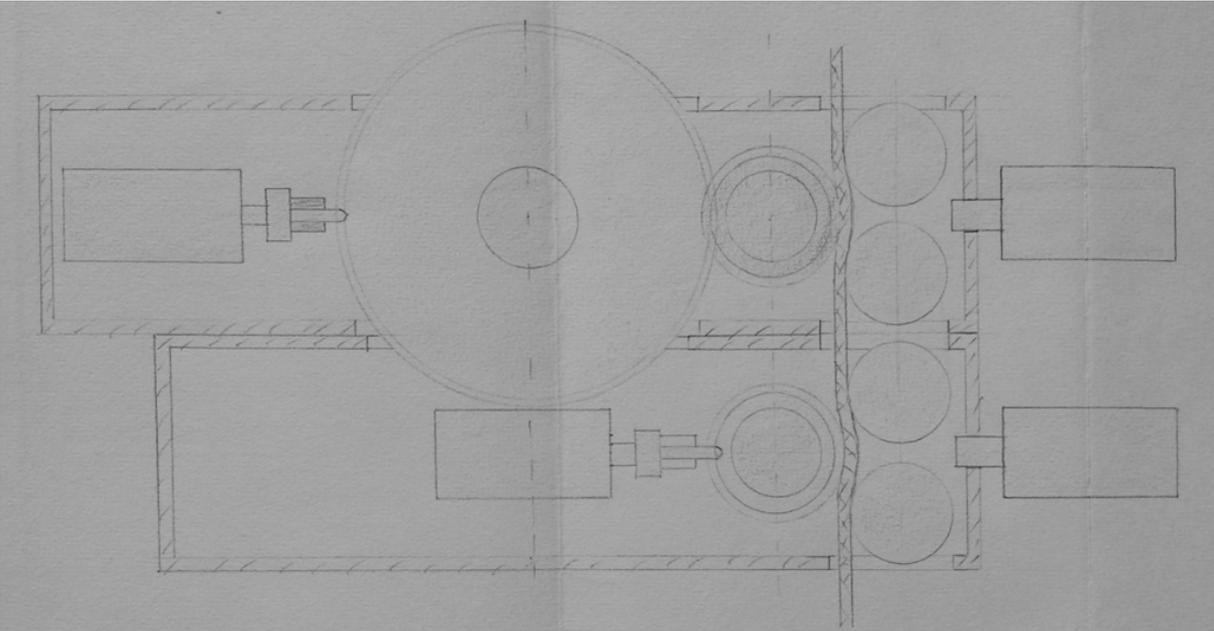


Abbildung 10: Skizze Grundriss LV7

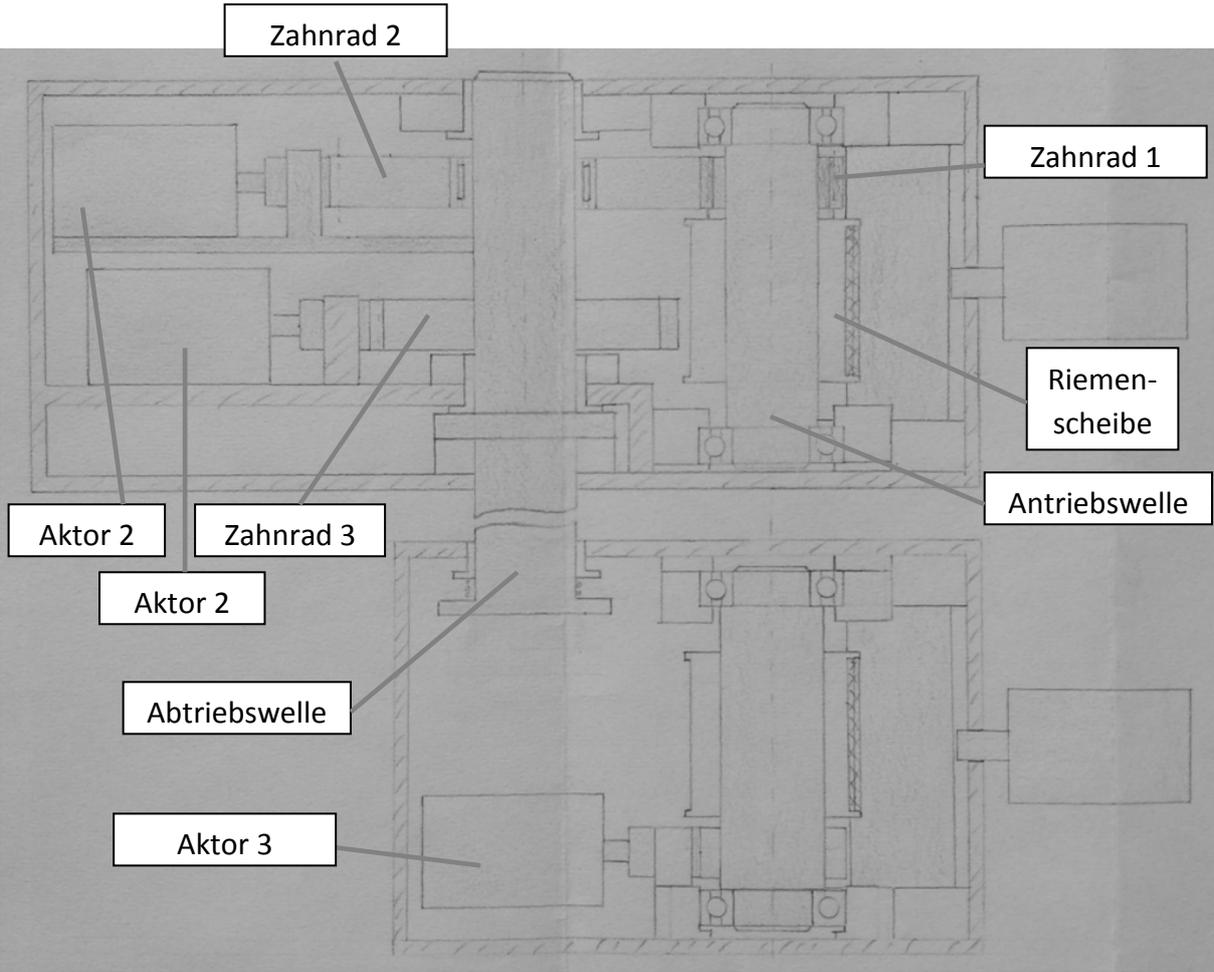


Abbildung 11: Skizze Aufriss LV7

#### 4.4.8 Lösungsvariante 8

		Lösung Funktion	1	2	3	4	5
A	Lamellen verfahren	Lamellen führen	Linear-Wälzlager	Linear-Gleitlager	Rolle(n)		
B		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
C		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
D		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuzgetriebe		
E	Lamellen drehen	Lamellen lagern	Gleitlager	Wälzlager	Axiallager	Radiallager	
F		Kraft zu Lamelle bringen	Zugmittel	Spindel	eigene Antriebe	lineare(r) Manipulierer	
G		Kraftübertragung herstellen/trennen	keine Kupplung	formschlüssige Kupplung	kraftschlüssige Kupplung		
H		Kraft wandeln	Ja	Nein	Malteserkreuzgetriebe		
I	Lamellen verriegeln	Lamellen translatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial
J		Lamellen rotatorisch fixieren	stufig	kontinuierlich	selbsthemmend	radial	axial

**Tabelle 18: Wirkstruktur LV8**

In dieser Lösungsvariante wird die rotatorische Bewegung durch die Kombination aus einem eigenen Antrieb und einer Spindel ausgeführt (Siehe Tabelle 18). Dazu wird ein Gleichstrommotor mit einem aufgesetzten Schneckengetriebe verwendet. Solche Motoren werden in der Automobilindustrie als Scheibenwischermotoren sowie als Fensterhebermotoren eingesetzt und sind durch die dort üblichen hohen Stückzahlen verhältnismäßig billig. Da nur ein Motor pro Lamelle für die Verdrehung nötig ist, können diese abwechselnd oben und unten ausgeführt werden, was bei der Größe dieser Getriebemotoren ohnehin notwendig ist.

Das Verfahren der Lamellen wird durch jeweils einen Schlitten oben und unten bewerkstelligt. Diese werden durch einen Schrittmotor über eine Transversalwelle und Zahnriemen bewegt. Auf jedem Schlitten sitzen 7 Linearschrittmotoren, die in bis zu 7 Lamellengehäuse über die dort vorhandenen, gefederten Verriegelungsbolzen eingreifen können (siehe Abbildung 12). Ohne einen Eingriff eines Linearmotors werden diese Bolzen durch die Feder in eine Arretierung gedrückt und die Lamellen sind fixiert. In dieser Stellung wird auch die Stromzufuhr für die Getriebemotoren hergestellt. Die Stromzufuhr der Linearmotoren auf dem Schlitten erfolgt über eine Stromschiene.

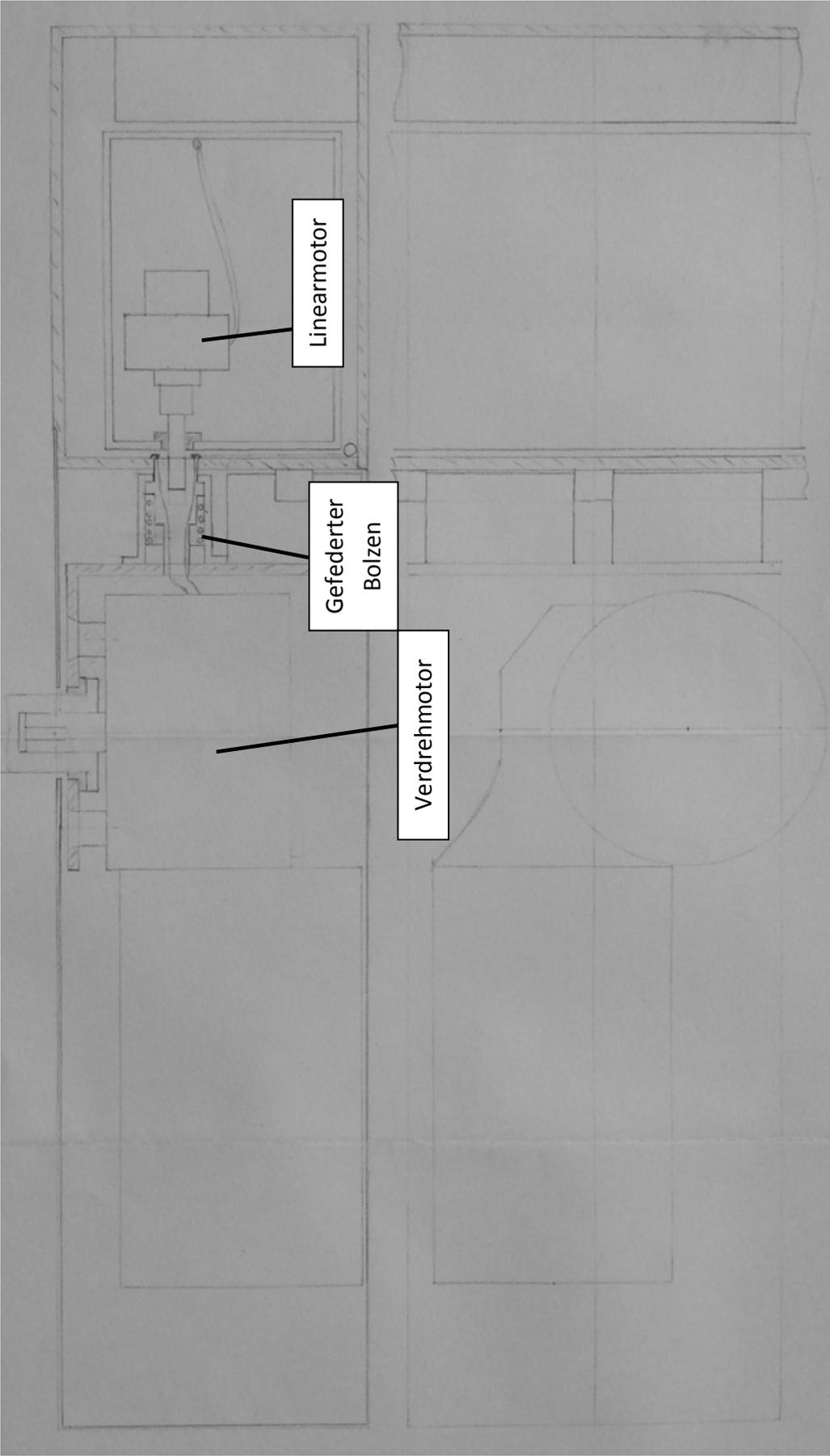


Abbildung 12: Skizze LV8

## 4.5 Auswahl der Lösungsvarianten

Um die normalerweise große Anzahl der gefundenen Lösungsvorschläge möglichst bald einschränken zu können, kann man sich der Auswahlliste bedienen. Dieses Auswahlverfahren kann sowohl auf Wirkprinzipien, als auch auf Wirkstrukturen angewandt werden. Dabei wird nach bestimmten Kategorien beurteilt. Sobald für eine Funktion ein (-) bei einer dieser Kategorien gesetzt wird, ist die Funktion ausgeschieden und alle nachfolgenden Bewertungskategorien müssen nicht mehr beurteilt werden. So können absolut ungeeignete Varianten schnell ausgeschieden werden. Danach werden nur die eindeutig besseren Lösungsvarianten ausgewählt um weiterverfolgt und konkretisiert zu werden.<sup>12</sup>

In Tabelle 19 ist eine solche Auswahlliste für die Beurteilung der gefundenen Wirkstrukturen dargestellt. Nachfolgend werden die unter Bemerkungen angegebenen Gründe für getroffene Entscheidungen genauer behandelt.

Diem Winkler								Beschattungsanlage	S1
Lv	A Mit Aufgabenstellung verträglich	B Forderungen der Anforderungsliste erfüllt	C Grundsätzliche Realisierungschance gegeben	D Zulässiger Aufwand zu erwarten	E Unmittelbare Sicherheitstechnik gegeben	F Im eigenen Bereich bevorzugt	G Erkenntnisstand ausreichend	Lösungsvarianten (Lv) nach AUSWAHLKRITERIEN beurteilen: (+) ja (-) nein (?) Informationsmangel (!) Anforderungsliste überprüfen  ENTSCHEIDEN: (+) Lösung weiterverfolgen (-) Lösung scheidet aus (?) Information beschaffen (Lösung erneut beurteilen) (!) Anforderungsliste auf Änderung überprüfen	Bemerkungen
LV1	+	+	-					Schlechter Zugwinkel am Ende der Drehung, Spindel muss sicher greifen	-
LV2	+	+	-					Moment bei Klemmen des Schlittens wird zu groß, genaue Lagerung aber für Eingriff der Zahnräder nötig	-
LV3	+	+	-					Keine Anbieter für Schaltungen dieser Art gefunden	-
LV4	+	+	+	?	?	+	?	Stromzuführung nicht geklärt, Bauraum für Bremse/Motor nicht geklärt	?
LV5	+	+	+	+	+	+	?	Hält Seilzusystem Belastungen aus?	?
LV6	+	+	-					Zu kleiner Umschlingungswinkel des Zahnrades durch den Zahnriemen	-
LV7	+	+	+	+	+	+	?	Einschätzung der Hubmagnete?	?
LV8	+	+	+	+	+	+	?	Zuverlässigkeit der Verriegelung	?

Tabelle 19: Auswahlliste

<sup>12</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

Wie auch bei weiteren Lösungsvarianten war in diesem frühen Stadium in der Entwicklung noch nicht klar, wie viel die Führung der Lamellen für Lösungsvariante 1 kosten würde. Es wurde in Tabelle 19 ein (-) gesetzt, weil der Zahnriemen nur eine Kraft in x-Richtung übertragen kann. Wird die Lamelle geschlossen ( $90^\circ$ ), so übt er keine Kraft in y-Richtung aus. Dementsprechend muss auch zur Fixierung der Lamelle in geschlossener Stellung eine Arretierung vorgesehen werden, was eine Unsicherheit bezüglich des sicheren Eingriffes mit sich bringt. Zusätzlich zu den technischen Bedenken wurde die mit der Verdrehung der Lamellen einhergehende Versetzung der Vorderfronten als unästhetisch erachtet.

Bei Lösungsvariante 2 stellte sich vor allem der Vorgang des Schaltens beziehungsweise Kuppelns als Problem heraus. Um Konstruktionsaufwand und Geld zu sparen wurde eine fertige Lösung wie zum Beispiel eine elektromagnetische Kupplung oder eine axiale Zahnkupplung angedacht. Elektromagnetische Kupplungen, die für die Übertragung der vorhandenen Momente geeignet sind, bauen allerdings zu groß. Ebenso konnten keine fertigen axialen Zahnkupplungen beziehungsweise Schaltklauen gefunden werden. Da für das genaue Eingreifen des sich verschiebenden Zahnrades eine sehr genaue Lagerung notwendig wäre, diese aber durch das Verbiegen der Lamellen im Wind sehr große Momente aufnehmen müsste, ist diese Lösungsvariante ebenfalls ausgeschieden.

Ähnlich wie bei Lösungsvariante 2 ist auch bei Lösungsvariante 3 das Kuppeln ein Problem. Es wurden keine Anbieter für Schaltklauen beziehungsweise fertige Getriebe dieser Art gefunden.

Bei Lösungsvariante 4 wurde vor allem die Stromzuführung der Motoren als kritisch empfunden. Hier wurde sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch die Zuverlässigkeit des Systems hinterfragt. Um das Moment, das durch den Wind bei Überlappung der Lamellen auftreten kann, aufnehmen zu können, wird eine Bremse benötigt. Bei dem geringen Bauraum im Inneren der Lamelle wäre eine solche wahrscheinlich unterdimensioniert.

Bei Variante 5 stellte sich vorwiegend die Frage, ob das Seilzug-System bei dem geringen verfügbaren Bauraum den Belastungen standhalten würde.

Da bei Lösungsvariante 6 ein nur sehr kleiner Umschlingungswinkel des Zahnrades durch den Zahnriemen gegeben ist, wurde bei der Bewertung die übertragbare Kraft in Frage gestellt. Die zuverlässige Übergabe des Zahnrades zwischen den Abschnitten ist ebenso in Frage zu stellen. Abgesehen davon wäre wahrscheinlich eine Spezialanfertigung des Zahnrades nötig, was zu höheren Kosten führen würde.

Hauptproblem bei Lösungsvariante 7 war die Einschätzung der verwendeten Hubmagnete. Zum einen war nicht klar, ob diese Art der Linearaktoren genug Kraft für das Ein- und Ausklinken gegen die Reibkraft hat. Zum anderen können die Aktoren nicht in dem vorhandenen Ausmaß normal auf die Achse des bewegten Zylinders belastet werden. Dementsprechend müsste der Zylinder zusätzlich gelagert werden, was die Konstruktion komplizierter und kostenintensiver machen würde.

Bei Lösungsvariante 8 ist die Ausführung des Verriegelungsmechanismus für das translatorische Verfahren und Fixieren der Lamellen in dieser Phase noch nicht beurteilbar. Einerseits wurde die genaue Auslegung des Bolzens noch nicht vorgenommen und andererseits muss die Spreizung des Lochbleches durch die vom eingeklinkten Bolzen übertragenen Windkräfte überprüft werden.

Wegen der in dieser Phase noch hohen Unsicherheit bezüglich der Verfolgungswürdigkeit der verschiedenen Lösungsvarianten, wurden die Lösungsvarianten 5, 7 und 8 zum Entwurf freigegeben. Obwohl keine der Teilfunktionen von Lösungsvariante 4 eindeutig negativ bewertet wurde, schied diese im Vergleich mit Lösungsvariante 8 aus, da die dort verbauten Motoren mit selbsthemmendem Schneckengetriebe als zuverlässiger und wirtschaftlicher erachtet wurden.

In der Phase des Konzipierens hat sich noch keine Wirkstruktur als eindeutig vorteilhaft gezeigt. Den zur weiteren Bearbeitung ausgewählten Lösungsvarianten liegen sehr unterschiedliche Konzepte zugrunde, woraus sich nur schwer vergleichbare Vor- und Nachteile ergeben. Lösungsvariante 5 hat einen einfachen Aufbau und eine geringe Anzahl an Einzelteilen, was ihr vorraussichtlich vor allem einen wirtschaftlichen Vorteil verschaffen wird. Durch das Verfahren in Paketen ist sie allerdings unflexibler als die beiden anderen Lösungsvarianten. Bei Lösungsvariante 7 steht der komplizierte Aufbau der möglichen Flexibilität gegenüber. Ähnlich verhält es sich bei Lösungsvariante 8, bei der im Unterschied zu Lösungsvariante 7 eine quasi stufenlose Verdrehung der Lamellen möglich ist.

## 5 Entwerfen

### 5.1 Theoretische Grundlagen

Ziel des Entwerfens ist es, ausgehend von der Wirkstruktur die Baustruktur zu erarbeiten. Im folgenden Blockschaltbild (Abbildung 13) sind die Schritte dieser Phase dargestellt.

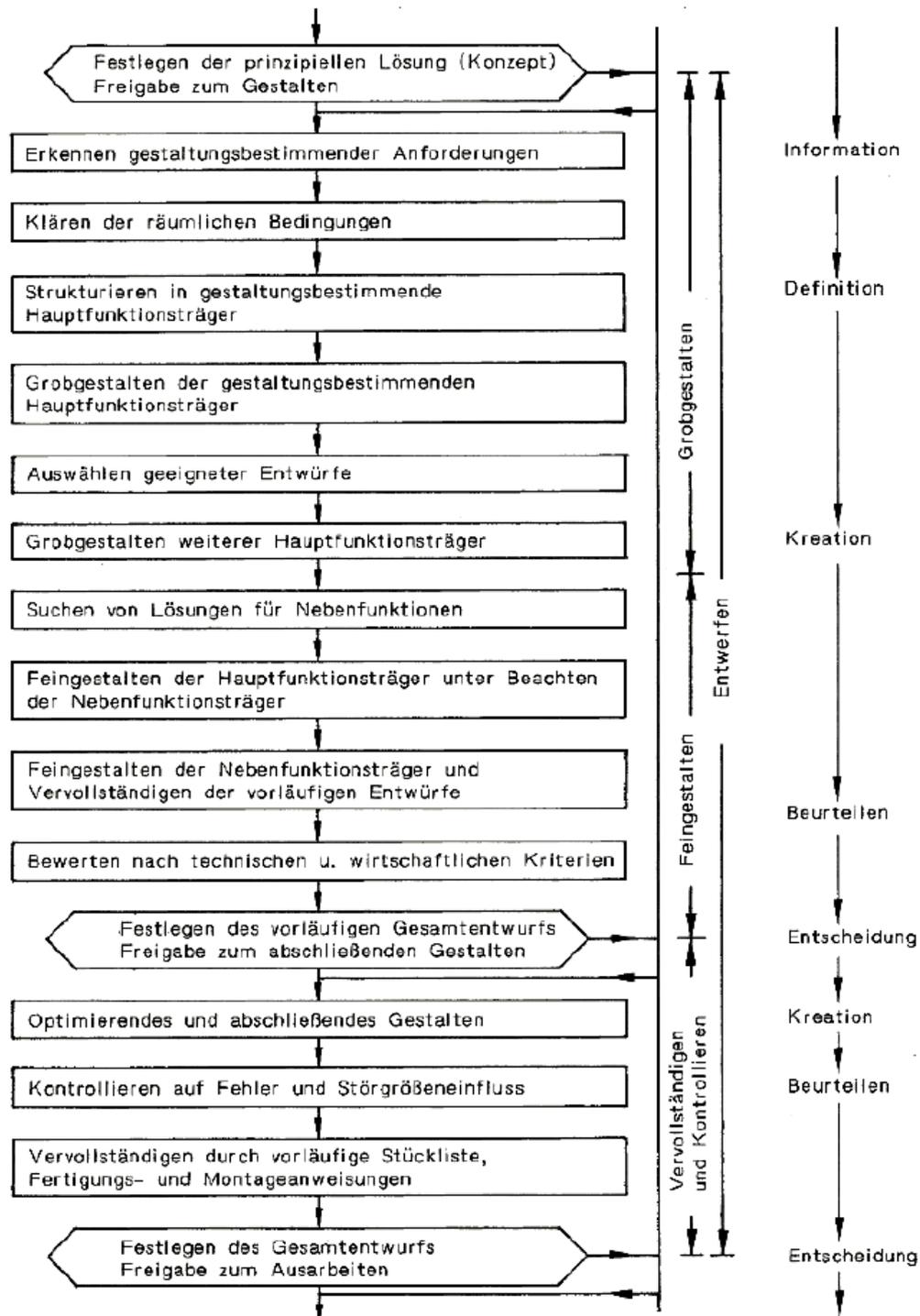


Abbildung 13: Teilschritte des Entwerfens<sup>13</sup>

<sup>13</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

### 5.1.1 Grundregeln der Gestaltung

Die Grundregeln eindeutig, einfach und sicher sind unbedingt einzuhalten. Zum einen, um die Realisierungschancen zu erhöhen und zum anderen, um Fehler, Schäden oder Unglücke zu vermeiden. Nachfolgend werden die 3 Grundregeln genauer beschrieben.

#### Eindeutig

Durch Beachtung dieser Grundregel können Wirkungen und Verhalten zuverlässig vorausgesagt werden. Dadurch können Zeit und aufwändige Untersuchungen eingespart werden. Um das zu bewerkstelligen müssen geordnete Energie- beziehungsweise Kraftflüsse, sowie Stoff und Signalflüsse in der Wirkstruktur sichergestellt werden. Ebenso ist auf beschreibbare Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung der gewählten physikalischen Effekte zu achten.

Die durch ein Fest- und ein Loslager ausgeführte Lagerung einer Welle kann hier als Beispiel angeführt werden. Bei dieser Lagerung sind Verformungsmöglichkeiten durch Belastungen sowie Temperaturschwankungen gegeben. Es kann also nicht zu Verspannungszuständen, erhöhten Kräften oder raschem Verschleiß kommen.

#### Einfach

Die Grundregel „einfach“ stellt normalerweise eine wirtschaftliche Lösung sicher. Eine geringere Zahl der Teile sowie einfache Gestaltungsformen lassen sich besser und billiger fertigen. Oft muss zwischen der Anzahl der Teile und deren Komplexität ein Kompromiss gefunden werden. Zum Beispiel sind für das Ersetzen einer komplizierten Gussform durch einfache Teile meist eine hohe Anzahl sowie eine kompliziertere Bearbeitung nötig.

#### Sicher

Diese Grundregel zwingt zur konsequenten Behandlung der Fragen Haltbarkeit, Zuverlässigkeit und Unfallfreiheit sowie gegebenenfalls zum Umweltschutz. In Abbildung 14 sind die Zusammenhänge zwischen den Arten der Zuverlässigkeit und den Arten der Sicherheit dargestellt. Ist die Zuverlässigkeit des technischen Systems nicht gegeben, so sind die Sicherheiten nicht erreichbar.

Bei der Einhaltung der Sicherheit bedient man sich der Sicherheitstechnik, die in die drei Stufen unmittelbar, mittelbar und hinweisend eingeteilt wird. Grundsätzlich versucht man unmittelbare Sicherheit herzustellen, sodass von vornherein keine Gefährdung vom gewählten technischen System ausgeht. Ist das nicht möglich so wird die mittelbare Sicherheitstechnik, also das aufbauen von Schutzeinrichtungen, und in letzter Instanz die Hinweisende Sicherheitstechnik angewandt.<sup>14</sup>

---

<sup>14</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

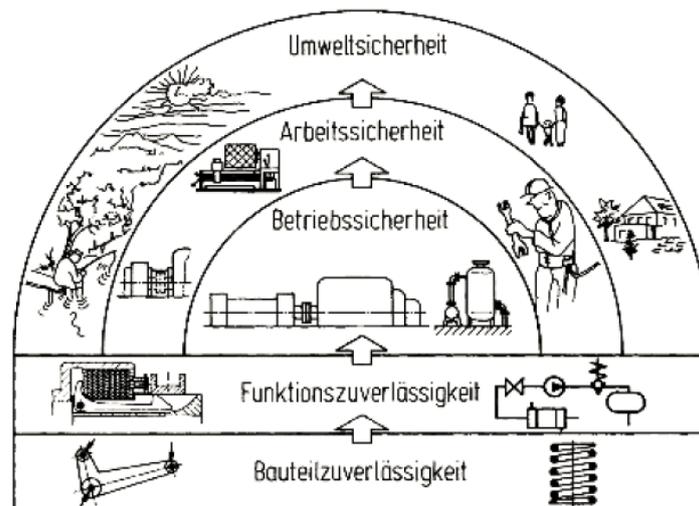


Abbildung 14: Zuverlässigkeit und Sicherheit<sup>15</sup>

### Unmittelbare Sicherheitstechnik:

Um unmittelbare Sicherheit zu gewährleisten muss man sich für eines der folgenden 3 Prinzipien entscheiden.

- Prinzip des sicheren Bestehens (safe-life Verhalten): Das Produkt muss so beschaffen sein, dass es alle möglichen Vorkommnisse überstehen kann. Das ist nötig, wenn ein Versagen schwere Folgen hätte, beispielsweise bei einer Brücke oder einem Flugzeugflügel.
- Prinzip des beschränkten Versagens (fail-safe Verhalten): Bei diesem Prinzip wird während der Einsatzzeit eine Funktionsstörung oder einen Bruch zugelassen, ohne, dass es dabei zu schwerwiegenden Folgen kommen darf. Bei Drahtseilen beispielsweise ist eine bestimmte Anzahl von Drahtbrüchen pro Längeneinheit zulässig.
- Prinzip der redundanten Anordnung: Hier wird eine Erhöhung der Sicherheit durch eine Mehrfachanordnung erreicht. Es wird zwischen aktiver und passiver Redundanz unterschieden. Aktive Redundanz bedeutet, dass sich alle Komponenten an der Leistung des Systems beteiligen, wie es beispielsweise bei Flugzeugen mit mehreren Triebwerken der Fall ist. Passive Redundanz wird durch das Vorsehen von Reserveeinheiten, wie Reservereifen bei Fahrzeugen, erreicht.

### Mittelbare Sicherheitstechnik:

Sofern die unmittelbare Sicherheitstechnik den nötigen Schutz nicht bieten kann, kommen Schutzsysteme, Schutzorgane oder Schutzeinrichtungen zum Einsatz. Schutzsysteme lösen bei Gefährdung eine Schutzreaktion aus. Es wird also ein Signalumsatz benötigt. Beispielsweise schaltet das Öffnen der Türe zu einem Roboterarbeitsplatz den Roboter aus, um Verletzungen zu vermeiden. Schutzorgane, wie zum Beispiel Überdruckventile, lösen ohne Signalumsatz die nötige Schutzfunktion aus. Schutzeinrichtungen stellen die

<sup>15</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

gewünschte Sicherheit durch Trennen, Fernhalten oder Schützen her. Zu Ihnen gehören Verkleidungen, Abdeckungen und dergleichen.

#### **Hinweisende Sicherheitstechnik:**

Diese Art der Sicherheitstechnik sollte nur dann angewendet werden, wenn eine Anwendung von unmittelbarer oder mittelbarer Sicherheitstechnik nicht möglich ist.

### **5.1.2 Gestaltungsprinzipien**

Die im Folgenden dargestellten Prinzipien sind als Strategien zu sehen, die nur unter bestimmten Voraussetzungen zweckmäßig sind. Gegenüber den obengenannten Grundregeln haben sie eine untergeordnete Rolle. Die folgenden 4 Prinzipien sind ein kleiner Auszug aus den in *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*<sup>16</sup> angegebenen Gestaltungsprinzipien:

#### **Prinzipien der Kraftleitung:**

Kräfte und Momente, die nicht zur direkten Funktionserfüllung beitragen, sich aber nicht vermeiden lassen (z.B. Axialschub einer Schrägverzahnung), sollten möglichst an ihrem Entstehungsort ausgeglichen werden. Ebenso sollte darauf geachtet werden, die Kraftleitung so kurz wie möglich auszuführen, um Werkstoffaufwand und Verformung gering zu halten.

#### **Prinzip der Aufgabenteilung:**

Aufgabenteilung kann sowohl bei unterschiedlichen Funktionen (Kessel wird so gelagert, dass er sich ausdehnen kann) als auch bei gleicher Funktion (Keilriemen darf wegen Quersteifigkeit nicht zu breit sein und wegen Beigesteifigkeit nicht zu hoch, deswegen 2 Keilriemen) zu Verbesserungen führen.

#### **Prinzip der Selbsthilfe**

- Selbstverstärkende Lösungen
- Selbstausgleichende Lösungen
- Selbstschützende Lösungen

#### **Prinzip der Stabilität und Bistabilität**

- Prinzip der Stabilität: Das System kehrt nach einer Störung selbst wieder in den Ausgangszustand zurück.
- Prinzip der Bistabilität: Hier wird aus einem stabilen Zustand ein neuer, deutlich abgesetzter.

---

<sup>16</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

### 5.1.3 Gestaltungsrichtlinien

Die folgende Auflistung gibt die in *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*<sup>17</sup> erwähnten und genauer erklärten Gestaltungsrichtlinien wieder, die als Unterstützung zu den Grundregeln zu sehen sind.

- Ausdehnungsgerecht
- Kriech- und relaxationsgerecht
- Korrosionsgerecht
- Verschleißgerecht
- Ergonomiegerecht
- Formgebungsgerecht
- Fertigungsgerecht
- Montagegerecht
- Instandhaltungsgerecht
- Recyclinggerecht
- Risikogerecht
- Normengerecht

In den folgenden Kapiteln soll ein Überblick über die auf den in diesem Kapitel überblicksmäßig dargestellten theoretischen Grundlagen aufbauende praktische Durchführung der Entwicklungsphase gegeben werden. Die drei in der Konzeptphase zur weiteren Bearbeitung ausgewählten Lösungsvarianten wurden in CAD gezeichnet, berechnet sowie einer überschlägigen wirtschaftlichen Bewertung unterzogen. Auf Basis der darauf folgenden technisch-wirtschaftlichen Bewertung wurde die Auswahl der für den endgültigen Gesamtentwurf weiter verfolgten Lösungsvariante getroffen.

## 5.2 Vorläufiger Gesamtentwurf LV5

Um die Bearbeitung der Lösungsvariante 5 zu erleichtern wurde die Aufgabe des Konstruierens in mehrere Baugruppen unterteilt, die sich an den Hauptfunktionsträgern orientieren:

- Motoren und Bremsen
- Aufbau ober- und unterhalb der Kopflamellen
- Aufbau ober- und unterhalb der restlichen Lamellen
- System aus Drahtseilen
- Linearführung und Tragblech

Die Durchführung der Konstruktion sowie Berechnung dieser Lösungsvariante wurde von Hern Winkler im Zuge seiner Bachelorarbeit durchgeführt.

---

<sup>17</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

## 5.2.1 Aufbau

### Lamellen verfahren

Auf dem Tragblech werden die Profilschienenführungen angebracht, auf denen dann die entsprechenden Linearlager gleiten (siehe Abbildung 15). Auf den Linearlagern wird eine Traverse befestigt, die die Lamelle trägt. Am unteren Ende der Lamelle erfolgt eine analoge Anordnung, wobei hier auf die entsprechende Fest-/Loslagerung geachtet werden muss.

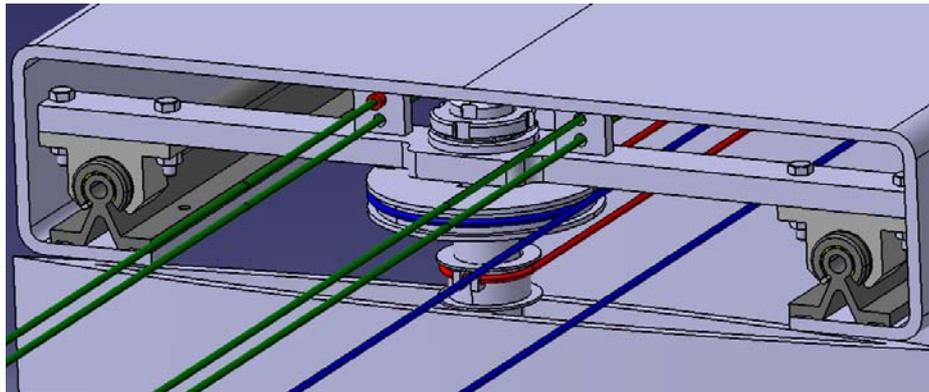


Abbildung 15: Verseilung der Kopflamelle LV5

In Abbildung 16 sind Wellenmutter und Sicherungsblech ausgeblendet, um die Gleitlagerbuchse sichtbar zu machen, die die Verbindung der Lamelle zwischen Lamellenwelle und Traverse herstellt.

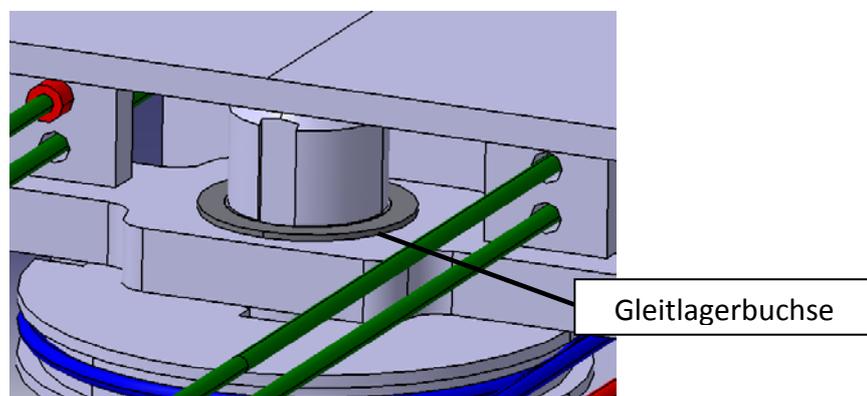
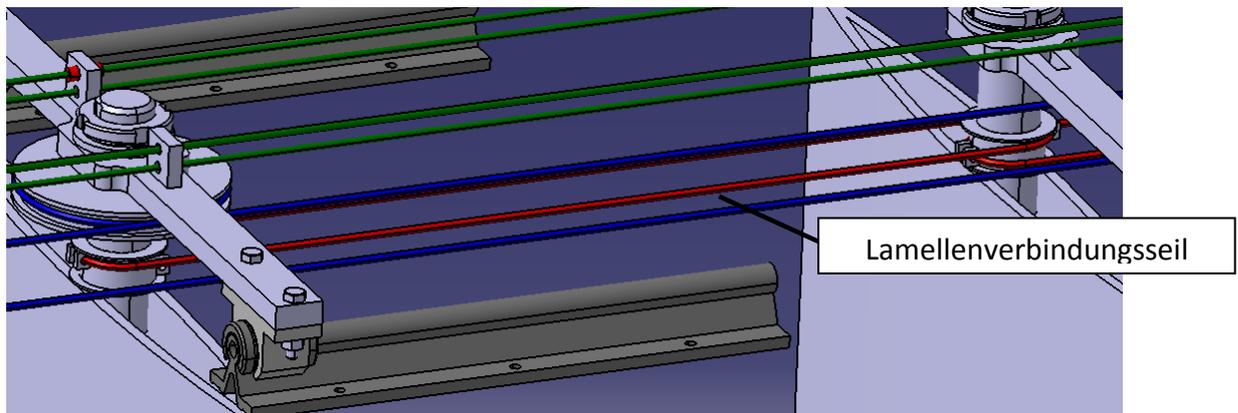


Abbildung 16: Gleitlagerbuchse

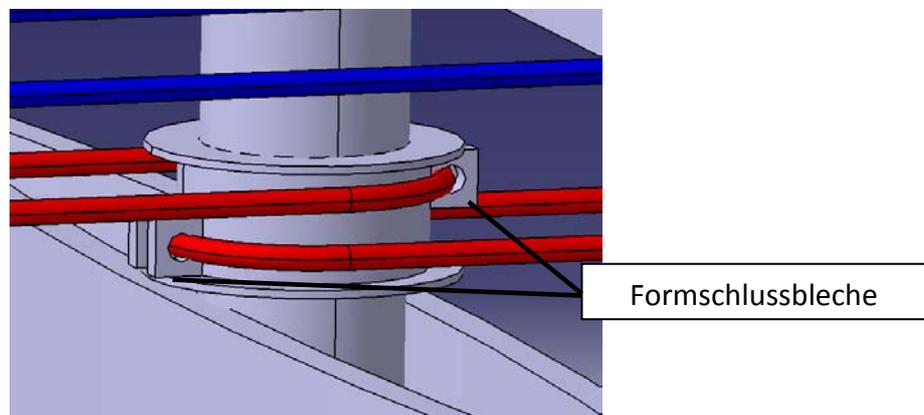
Die Lamellen werden in Lamellenpakete unterteilt, die sich nur gemeinsam bewegen können und für die auch die gleiche rotatorische Stellung gilt. Dazu gibt es bei jedem Lamellenpaket eine Kopflamelle, welche für die Positionierung des Lamellenpaketes verantwortlich ist. Diese Lamelle wird von der Garage aus angesteuert und in definierte Positionen gebracht. Die restlichen Lamellen des Paketes folgen ihr.

Die Kopflamelle ist über Seile mit den restlichen Lamellen verbunden und "zieht" diese quasi hinter sich her. Während dieses Vorganges ist die Lageposition der Folgelamellen nicht genau definiert.

Die Verbindung wird über Lamellenverbindungsseile mit Klemmen bewerkstelligt, die auf Lamellenverbindungsseilscheiben laufen (siehe Abbildung 17).

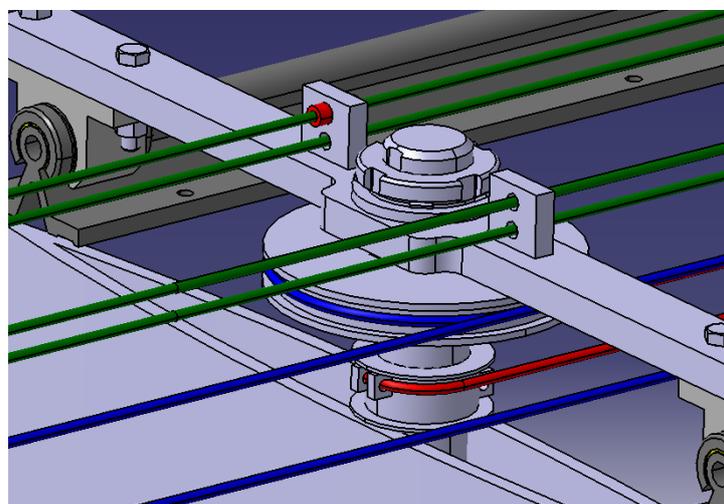


**Abbildung 17: Lamellenverbindungsseile (Führungsschiene teilweise ausgeblendet)**



**Abbildung 18: Lamellenverbindungsseilscheibe**

Diese Lamellenverbindungsseilscheiben haben die Aufgabe eine Lamelle mit der vorhergehenden und darauffolgenden zu verbinden. Die Verbindung ist formschlüssig, da das Seil zwischen den zwei "Formschlussblechen" mit einer Seilklemme geklemmt wird (siehe Abbildung 18).



**Abbildung 19: Translationsseile (grün) und Rotationsseil (blau)**

Die in Abbildung 19 grün dargestellten Translationsseile ziehen die "Kopflamelle" und damit auch die Folgelamellen. Für jede Kopflamelle gibt es zwei derartige Seile: eines in dem Tragblech oberhalb der Lamelle und eines in dem Tragblech unterhalb der Lamelle. Somit wird die Lamelle oben und unten gezogen.

Nur eines der 4 dargestellten Seile zieht die "Kopflamelle" - das Seil mit der rot dargestellten Klemme. Mit Hilfe dieser Klemme wird ein Formschluss zwischen Traverse und dem Translationsseil gewährleistet. Die restlichen 3 Seile sind die Translationsseile für die anderen 3 Lamellenpakete und werden nur durch die Mitnehmerbleche geführt.

Die zur gleichen "Kopflamelle" gehörenden Translationsseile (oben und unten) werden mit gleicher Geschwindigkeit (vom gleichen Antrieb) gezogen, um ein Verkanten der Lamelle zu verhindern.

In Abbildung 20 sind die Seilführung der oberen Lamellenhälfte, sowie ein kleiner Teil der unteren Lamellenhälfte dargestellt. Da die Motoren in dieser Abbildung hintereinander liegen, sind sie beispielsweise mit Antrieb 1+2 beschriftet.

Jedes Lamellenpaket verfügt über einen Motor für das Verfahren, sowie einen Motor für das Verdrehen. Die für das Verfahren zuständigen Motoren sind mit Antrieb 1 bis 4 beschriftet. Jeder dieser Motoren verfügt über zwei Seilscheiben, um die Lamelle symmetrisch über Umlenkrollen oben und unten antreiben zu können. Der Grund für ihre Positionierung auf halber Lamellenhöhe ist neben dem Platzmangel vor allem die Verwirklichung in etwa gleicher Seillängen, was in Anbetracht des Dehnschlupfes der Seile Vorteile bei der Positionierung mit sich bringt.

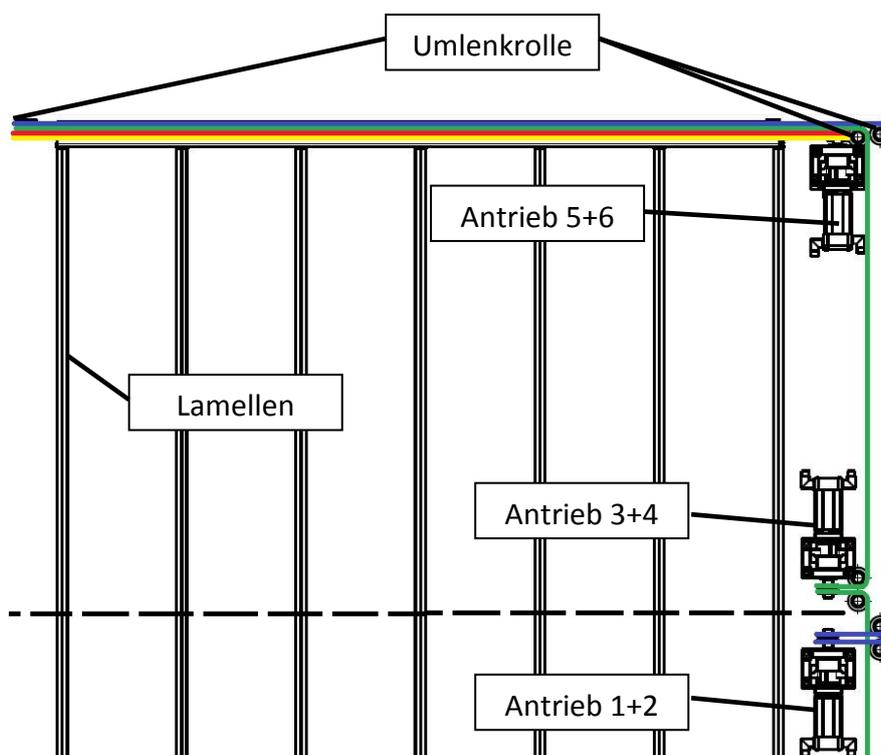
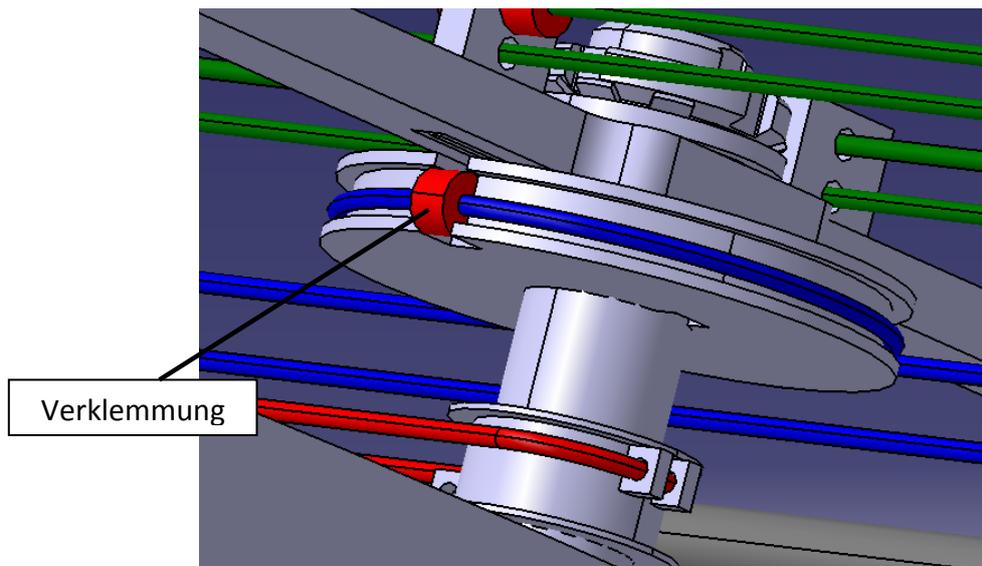


Abbildung 20: Seilführung (nur obere Hälfte)

**Lamellen drehen:**

Anders als beim Verfahren der Lamellen, muss das Verdrehen nicht symmetrisch oben und unten ausgeführt werden. Zwei der vier Lamellen werden daher nur oben, zwei nur unten angetrieben. Die für die Verdrehung oben zuständigen Motoren sind in der obigen Abbildung mit Antrieb 5+6 beschriftet.

Das für die Rotation der Lamellen verantwortliche Seil ist in Abbildung 21 blau dargestellt. Es umschlingt die Rotationsscheibe um 360° und ist auf einer Seite der Scheibe verklemmt, wodurch auch hier ein Formschluss gewährleistet wird.



*Abbildung 21: Verklemmung Rotationsscheibe*

Um eine Translationsbewegung der Lamellen zu bewerkstelligen, müssen sich sowohl die beiden Translationsseile als auch das Rotationsseil mit gleicher Geschwindigkeit bewegen. Ist dies nicht der Fall, so verdrehen sich die Lamellen.

Für die Rotationsbewegung müssen sich die beiden Translationsseile in Ruhe befinden und das Rotationsseil muss bewegt werden. Die Lamellentransversen, und damit auch die Lamellen, werden dadurch translatorisch fixiert. Durch die Bewegung des Rotationsseiles wird jedoch die Rotationsseilscheibe gedreht, wodurch sich auch die Kopflamelle mitdreht. Die Folgelamellen werden durch die Lamellenverbindungsseile mitgedreht.

**Lamellen verriegeln:**

Durch die formschlüssige Verbindung zwischen den Kopflamellen und Motoren können erstere durch an den Motoren angebrachte Bremsen sowohl gegen ein ungewolltes Verfahren als auch gegen ein ungewolltes Verdrehen gesichert werden.

Um die translatorische sowie rotatorische Fixierung der mit den Kopflamellen verbundenen weiteren Lamellen zu gewährleisten, kommen Linearaktoren zum Einsatz. Beim Herausfahren des Lamellenpaketes aus der Garage zieht die erste Lamelle die

daraufliegenden, wodurch das Lamellenverbindungsseil gespannt wird. Knapp vor der angesteuerten Endposition wird die letzte Lamelle durch einen Linearaktor gegen ein weiteres Verfahren gesichert, wodurch die Lamellenverbindungsseile auf Spannung gehalten werden und eine genaue Lageeinhaltung realisiert wird (siehe Abbildung 22).

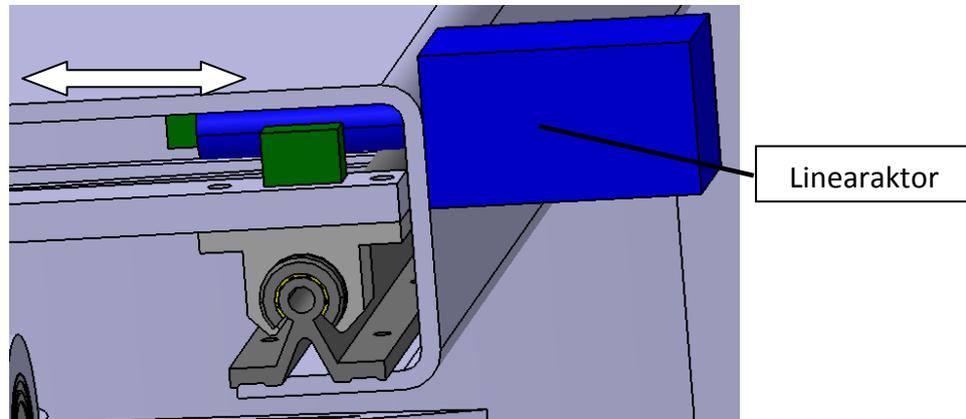


Abbildung 22: Linearaktor (zur Spannung der Lamellenverbindungsseile)

Wenn der Bolzen des Linearaktors ausfährt, verhindert er ein Vorbeifahren der letzten Lamellentaverse und spannt damit die Lamellenverbindungsseile.

Beim Zurückfahren der Lamellen werden diese zusammengeschoben und die Lamellenverbindungsseile entspannt. Will man das Lamellenpaket neu positionieren, muss man mit der letzten Lamelle des Paketes am Linearaktor vorbeifahren und dann den Linearaktor wieder ausfahren. Dadurch wird die letzte Lamelle fixiert und durch ein Verfahren der "Kopflamelle" in Ausfahrtrichtung werden den Lamellen wieder auseinandergezogen und die Lamellenverbindungsseile wieder gespannt.

### 5.2.2 Berechnung

Im folgenden wird ein Überblick über die Auslegung gegeben. Die gesamte Berechnung findet sich im Anhang.

Bei der Berechnung für Lösungsvariante 5 wurden zuerst die sich aus dem Lösungskonzept ergebenden kinematischen Bedingungen ermittelt. Wenn alle Lamellenpakete einzeln an den vorgesehenen Ort gefahren werden sollen, ergibt sich eine Verfahrensgeschwindigkeit von 0,16 m/s. Für die Drehung der Lamellen ergibt sich aus der Anforderungsliste eine Drehzahl von 1,5 1/min.

Aus der geforderten Windgeschwindigkeit von 20 m/s, bei der die Anlage noch betreibbar sein soll, ergibt sich durch eine überschlägige Berechnung mit dem cw-Wert für ein Halbrohr die Kraft des Winddruckes auf eine Lamelle. In den Berechnungen zu Lösungsvariante 8 wurde dieser Wert durch den leicht abgeminderten Wert für eine lange, rechteckige Platte ersetzt, da diese dem verwendeten Lamellenprofil geometrisch ähnlicher ist. Zusammen mit der zur Beschleunigung der Lamelle nötigen Kraft ergibt sich die gesamte Kraft auf ein verfahrenendes Lamellenpaket von 2,914 kN.

Diese Kraft wird zur Auslegung des Motors sowie des Drahtseiles verwendet:

- Stahldrahtlitze verzinkt, Konstruktion 1x19 (Mindestbruchkraft 8370N; Nenndurchmesser 3mm)
- Stirnradgetriebemotor mit Bremse (Abtriebsdrehzahl 0-47 1/min; Drehmoment 93-95 Nm)

Das für das Verdrehen eines Lamellenpaketes maximal notwendige Moment lässt sich aus der Beaufschlagung der halben Lamellen mit dem zuvor ermittelten Winddruck berechnen und beträgt 138,4 Nm. Dieser Fall tritt ein wenn sich die Lamellen durch ihre Stellung zur Windrichtung genau zur Hälfte überdecken. Die Berechnung der Belastungen ergibt, dass für Verfahren und Drehen die gleichen Motoren und Drahtseile verwendet werden können, was Vorteile hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit sowie der Einfachheit des Systems mit sich bringt. Die Festigkeitsberechnungen der weiteren relevanten mechanischen Bauteile sind in der Berechnung im Anhang zu finden.

### 5.2.3 Grobe Stückliste und wirtschaftliche Bewertung

Um eine Einschätzung der Stückzahlen sowie der Kosten dieser Lösungsvariante geben zu können, wurde die wirtschaftliche Bewertung in Tabelle 20 erstellt.

Preisabschätzung Beschattungsanlage LV5								
Nr.	Bezeichnung	Anzahl	Stückpreis	pro	Gesamtpreis	Preis	Anmerkung	Quelle
1	Lamelle	28	500	Stück	14000	geschätzt		Eigenfertigung
2	Antrieb	8	800	Stück	6400	geschätzt	ZG13 TA31 V30 BP05 ER TW	Zukauf
3	Wellenmutter	56	5	Stück	280	Herstellerepreis	DIN 981 - KM25	Zukauf
4	Sicherungsblech	56	2	Stück	112	Herstellerepreis	DIN 5406 - MB25	Zukauf
5	Traverse	56	25	Stück	1400	geschätzt	verbindet Lamellenaufhängung mit Drylin-Gleitlagerführungen	Eigenfertigung
6	Tragblech	8	250	3 Meter	2000	geschätzt		Eigenfertigung
7	Drylin (Tragprofil für Linearlager)	48	50	Meter	2400	Herstellerepreis	Gleitlagerführung IGUS - AWMU 12	Zukauf
8	Linearlager	56	23	Stück	1288	Herstellerepreis	IGUS OGAS-01-12	Zukauf
9	Gleitlager	56	2	Stück	112	Herstellerepreis	IGUS XFM-252833-08-1	Zukauf
10	Zwischenseilscheibe	28	20	Stück	560	geschätzt	D=30mm	Eigenfertigung
11	Rotationsseilscheibe	4	50	Stück	200	geschätzt	D=80mm	Eigenfertigung
12	Seilscheiben für Antriebe	12	30	Stück	360	geschätzt	D=56mm	Eigenfertigung
13	Umlenkrollen	40	30	Stück	1200	geschätzt	D=56mm	Eigenfertigung
14	Nadellager für Umlenkrollen	40	23	Stück	920	Herstellerepreis	SKF NKI-30-20 TN	Zukauf
15	Seil	576	4	Meter	2304	geschätzt	Carl Stahl Technocables - d=3mm 1x19	Zukauf
16	sonstige Teile (Wellen, Schrauben,...)	1	2000		2000	geschätzt		
					pro Stock	2 Stockwerke		
Summe:					35536	71072		

Tabelle 20: Wirtschaftliche Bewertung LV5

### 5.3 Vorläufiger Gesamtentwurf LV7

Wie für Lösungsvariante 5 zuvor schon beschrieben, wurde auch diese Lösungsvariante zur besseren Bearbeitung in Baugruppen unterteilt. Es wurden folgende Baugruppen gewählt:

- Antriebssystem
- Trägerelemente
- Führung

#### 5.3.1 Aufbau

Die untenstehenden Abbildungen (Abbildung 23 bis Abbildung 25) sind als Überblick gedacht. Alle folgenden Erklärungen dieses Kapitels beziehen sich darauf.

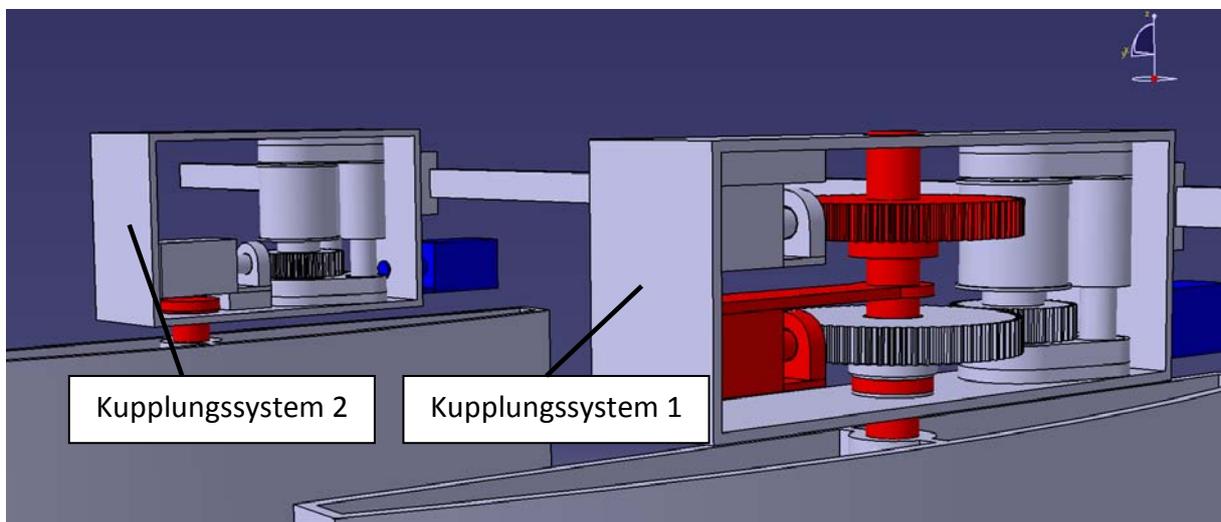


Abbildung 23: perspektivische Ansicht des Aufbaus oben LV7

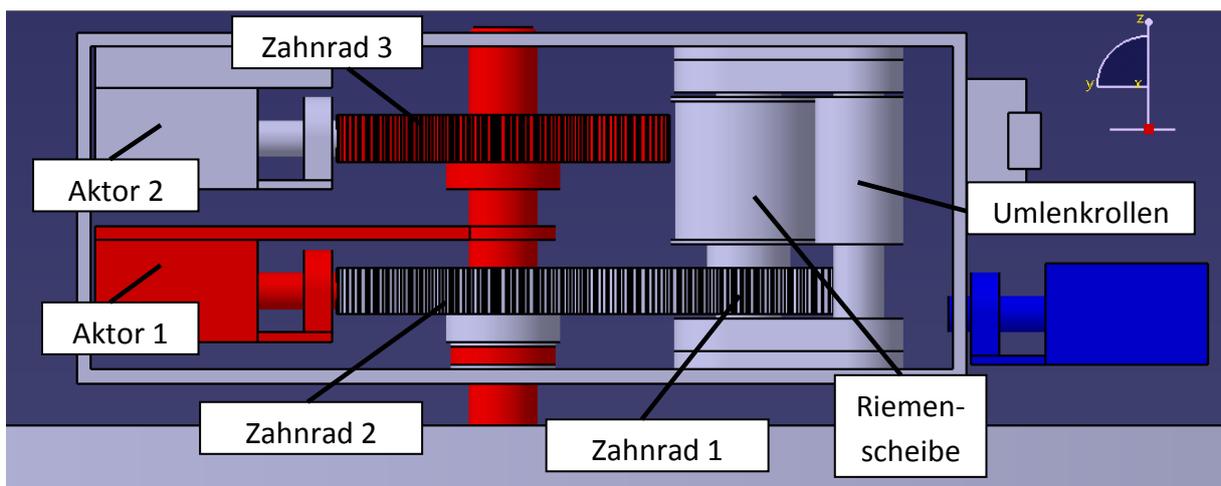


Abbildung 24: Aufriss Kupplungssystem 1

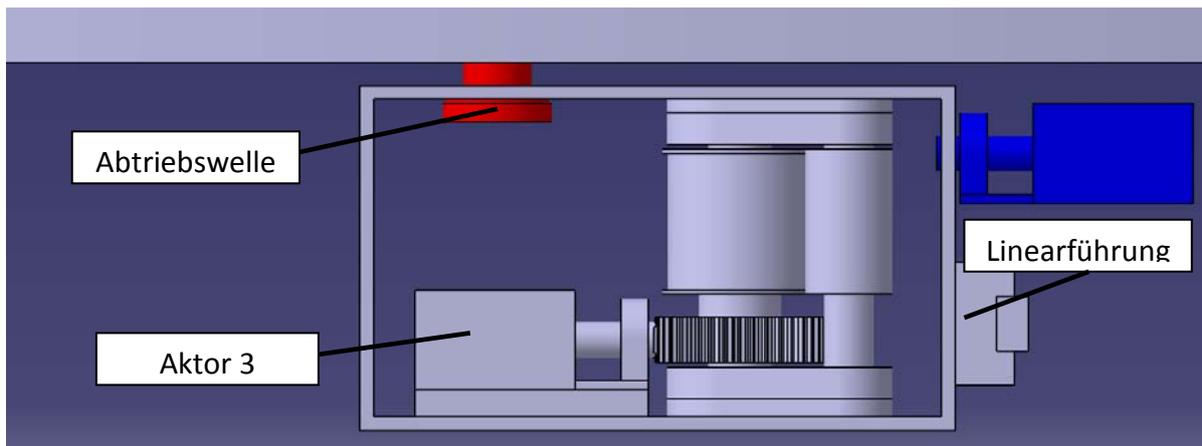


Abbildung 25: Aufriss Kupplungssystem 2

### Lamellen verfahren:

Wie schon in der Konzeptphase beschrieben, erfolgt die Kraftübertragung auf die Lamellen über einen in den obigen Abbildungen nicht dargestellten Zahnriemen. Dieser wird zwischen der Riemenscheibe und den Umlenkrollen durchgeführt, um einen genügend großen Umschlingungswinkel um die Synchronscheibe und somit eine sichere, formschlüssige Übertragung zu gewährleisten. Um die übertragenen Kräfte so gering wie möglich zu halten, sind die Durchmesser von Zahnrad 1 und 2 größer als die zulässige Breite einer Lamelle. Damit muss, um die Einhaltung der räumlichen Vorgaben in der Garage zu gewährleisten, ein zweites Kupplungssystem eingeführt werden, das bei Abwechslung der beiden Systeme den nötigen Platz bietet. Das ist möglich, da zwar ein synchrones Verfahren nötig ist, die Drehung aber durchaus nur oben oder unten ausgeführt werden kann.

Um die Lamelle zu verfahren, wird die Kraft nun über die Antriebswelle auf Zahnrad 1 geleitet, das in Zahnrad 2 eingreift. Dieses ist auf der in rot dargestellten Antriebswelle gelagert. Alle mit der Antriebswelle fix verbundenen Bauteile sind zum besseren Verständnis ebenfalls in rot dargestellt. Ist nun der Aktor 1 des Kupplungssystems 1 mit dem Zahnrad 2 in Eingriff, so wird die Kraft auf die Antriebswelle übertragen. Durch den Eingriff von Aktor 2 mit dem Zahnrad 3 wird die Drehung der Antriebswelle verhindert, da dieser mit dem Gehäuse fix verbunden ist, welches durch die Linearführung gegen Verdrehen gesichert ist. Um ein symmetrisches Verfahren der Lamelle oben sowie unten zu ermöglichen muss auch Aktor 3 in das ihm zugehörige Zahnrad des Kupplungssystems 2 eingreifen. Sind also die Aktoren 1 bis 3 geschlossen, so bewegt sich die Lamelle mit der Geschwindigkeit des Zahnriemens.

### Lamellen drehen:

Für die Rotation der Lamelle werden die Aktoren 2 und 3 geöffnet. Der mit dem Zahnrad 2 im Eingriff stehende und über den Arm mit der Abtriebswelle und damit der Lamelle verbundene Aktor 2 kann nun die Drehung des Zahnrades 2 mitmachen.

### Lamellen verriegeln:

An vorgesehenen Stellen entlang der Fensterfront sowie in der Garage sind oberhalb und unterhalb der Lamellen weitere Linearaktoren (in den Abbildungen blau dargestellt) verbaut. Diese können in das Gehäuse der jeweiligen Lamelle eingreifen und diese translatorisch fixieren. Sind die Aktoren 1 und 3 geöffnet, so kann sich die Antriebswelle ohne Kraft zu übertragen durchdrehen und die Lamellen sind dennoch durch den Eingriff von Aktor 2 im Zahnrad 3 gegen Rotation blockiert. Durch das so ermöglichte, freie Durchdrehen der Antriebswellen können die Lamellen unabhängig von einander verfahren, verdreht und verriegelt werden.

### 5.3.2 Berechnung

Wie bei der Berechnung zu Lösungsvariante 5 sind auch hier die Überlegungen zu den Verfahr- und Verdrehzeiten Ausgangspunkt der Auslegung. Beim Verfahren können alle Lamellen gleichzeitig bewegt werden. Das Verdrehen muss aufgrund der großen, durch den Winddruck auf die Lamellen wirkenden Momente bei viel Wind einzeln erfolgen. Daher können die Vorgaben der Anforderungsliste einer ersten Abschätzung nach bei 20 m/s Windgeschwindigkeit nur knapp eingehalten werden. Ohne den Zeitverlust durch Beschleunigen auf Verfahr- und Verdrehgeschwindigkeit einzuberechnen, ergibt sich eine Dauer von genau 5 Minuten bei 20 m/s Wind. Da diese Auslegung allerdings für ein sehr selten eintretendes Szenario gilt, sollte die Anlage in einem sehr hohen Prozentsatz der Fälle wesentlich schneller verfahren und verdrehen können.

Das Verfahren sowie das Verdrehen wird, wie schon erwähnt, von einem Antrieb bewerkstelligt. Die benötigte Leistung des Motors ergibt sich dementsprechend aus der rotatorischen sowie translatorischen Beschleunigung der Lamellen, den Kräften durch den Winddruck und den Reibkräften der beteiligten Lager. Um die nötige Kraft bei geringem Platzverbrauch aufbringen zu können, wird ein Schrittmotor mit Getriebe verwendet:

- Motor: EC Motion SEMC299-E6.4BE; Nema 34; Haltemoment 6,5Nm; Encoder
- Getriebe: Planetengetriebe mit Übersetzung 1:4; direkt an Motor angebaut

Aus der Maximalkraft des Motors und der nötigen Vorspannkraft ergibt sich die Auslegung des Zahnriemens. Hier wurde eine Zahnriemen mit AT5-Profil, Stahlzugträger und einer Breite von 32mm gewählt. Die Zahnriemen werden in den Kupplungssystemen ober- und unterhalb jeder Lamelle mit 2 Umlenkrollen an der Riemenscheibe gehalten. Die Berechnung der für diese Führung nötigen Lager ergab, dass Kugellager verwendet werden müssen, da bei Verwendung der wesentlich billigeren Trockenlaufgleitlager, durch die auftretende Reibung, der Motor und mit ihm auch große Teile der restlichen Mechanik stärker beziehungsweise größer ausgelegt werden müssten.

Die Lagerung der Abtriebswelle, die nur für die Drehung der Lamelle verantwortlich ist, kann jedoch mit einer Gleitlagerung ausgeführt werden, da das Verdrehen nur sehr selten und langsam stattfindet. Da es für die Eingriffe der Zahnräder nötig ist, dass die Abtriebswelle

des Kupplungssystems 1 sich nicht verformt, muss eine mögliche Verbiegung durch eine zwischengeschaltete, flexible Kupplung abgefangen werden. Im Kupplungssystem 2 können Winkeländerungen durch ein sphärisches Axialgleitlager aufgenommen werden.

Bei der Auslegung der als bistabile Hubmagnete ausgeführten Linearaktoren zeigte sich, dass diese die erwarteten Anforderungen nicht erfüllen können. Durch den Winddruck auf die Lamellen ergeben sich an den Eingriffsstellen der Aktoren hohe Kräfte. Die beim Ein- und Ausfahren entstehenden Reibkräfte können von den am Markt verfügbaren und geometrisch möglichen Hubmagneten bei den höheren Windstärken nicht überwunden werden. Man kann sich jedoch durch die sehr genau steuerbaren Schrittmotoren Abhilfe verschaffen, da diese den Eingriff zwischen Zahnrad und Aktor durch das Verfahren um ein bis zwei Schritte entlasten können. Die hier grob beschriebene Berechnung zu Lösungsvariante 7 findet sich im Anhang.

### 5.3.3 Grobe Stückliste und wirtschaftliche Bewertung

Um einen Überblick über die Anzahl der verwendeten Bauteile sowie über die Kosten zu erlangen wurde die folgende wirtschaftliche Bewertung in Tabelle 21 erstellt.

Baugruppe	Teil	Preis	Pro	Quelle	Anzahl pro Stockwerk	Insgesamt	Pro Lamelle	Stück pro Lamelle
Antriebssystem	Motor	50,00	Stück	Schätzung	1	100,00	1,79	
	Getriebe	100,00	Stück	Angebot	1	200,00	3,57	
	Leistungsteil	82,69	Stück	Angebot	1	165,38	2,95	
	Encoder	100,00	Stück	Schätzung	1	200,00	3,57	
	div.Kabel	20,00	Meter	?	1	40,00	0,71	
	Motoraufhängung	50,00	Stück	?	1	100,00	1,79	
	Antriebswelle	80,00	Stück	?	1	160,00	2,86	
	Zahnrad Abtrieb Motor	15,00	Stück	Schätzung	1	30,00	0,54	
	Zahnrad Antriebswelle	20,00	Stück	Schätzung	1	40,00	0,71	
	Synchronscheibe	10,00	Stück	Schätzung	2	40,00	0,71	
	Spannrollen Umlenkung	30,00	Stück	Schätzung	6	360,00	6,43	
Trägerelemente	Zahnriemen	110,00	Stück	mercateo	2	440,00	7,86	
	Synchronscheibe	10,00	Stück	Schätzung	56	1120,00	20,00	2
	Synchronwelle	10,00	Stück	?	56	1120,00	20,00	2
	Umlenkwellen	10,00	Stück	?	112	2240,00	40,00	4
	Kugellager Synchronwelle	4,00	Stück	Schätzung	112	896,00	16,00	4
	Kugellager Umlenkwellen	5,00	Stück	Schätzung	224	2240,00	40,00	8
	Abtriebswelle groß	10,00	Stück	?	28	560,00	10,00	1
	Abtriebswelle klein	5,00	Stück	?	28	280,00	5,00	1
	Radialgleitlager Abtriebswelle	5,00	Stück	Schätzung	84	840,00	15,00	3
	Zahnrad groß	15,00	Stück	Schätzung	56	1680,00	30,00	2
	Zahnrad klein	10,00	Stück	Schätzung	56	1120,00	20,00	2
	Linearaktor	12,50	Stück	Schätzung	168	4200,00	75,00	6
	Gehäuse Linearaktor	5,00	Stück	Schätzung	168	1680,00	30,00	6
	div. Kabel Aktoren	1,00	Stück	?	336	672,00	12,00	12
	Gleitlager	3,00	Stück	Schätzung	168	1008,00	18,00	6
	Führung Aktor	4,00	Stück	Schätzung	168	1344,00	24,00	6
	Stecker	5,00	Stück	?	56	560,00	10,00	2
Führung	Linearlager	80,00	Stück	Schätzung	28	7000,00	125,00	1
	Linearschiene	100,00	Meter	Schätzung	12	8000,00	142,86	
	Gehäuse	90,00	Stück	?	56	10080,00	180,00	2
	Wetterschutz	50,00	Meter	?	24	2400,00	42,86	
					Summe	50915,38	909,20	70

Tabelle 21: Wirtschaftliche Bewertung LV7

## 5.4 Vorläufiger Gesamtentwurf LV8

Aufbauend auf dem Konzept für Lösungsvariante 8 wurden zuerst die wichtigsten Funktionsträger identifiziert und die Konstruktion wie folgt in sinnvolle Baugruppen unterteilt.

- Antrieb Schlitten
- Schlitten
- Trägerelemente Lamellen
- Linearführung
- Tragkonstruktion

### 5.4.1 Aufbau

#### Verfahren der Lamellen:

In Abbildung 26 sind, durch die transparente Tragkonstruktion sichtbar gemacht, der für das Verfahren zuständige Schlitten sowie die über die Profilschienenführung geführte Aufhängung oberhalb der Lamelle dargestellt. Die Profilschienenführung wurde im Laufe dieser Entwicklungsphase aus Gründen der Wirtschaftlichkeit durch eine Lineargleitlagerführung ersetzt.

Der Schlitten wird von einem umlaufenden Zahnriemen angetrieben und verfügt über sieben Linearschrittmotoren, die in die Aufhängung der Lamellen eingreifen können um diese mitzunehmen. Diese Linearmotoren werden über Schleifkohlen und eine hier grün dargestellte 2-polige Stromschiene versorgt.

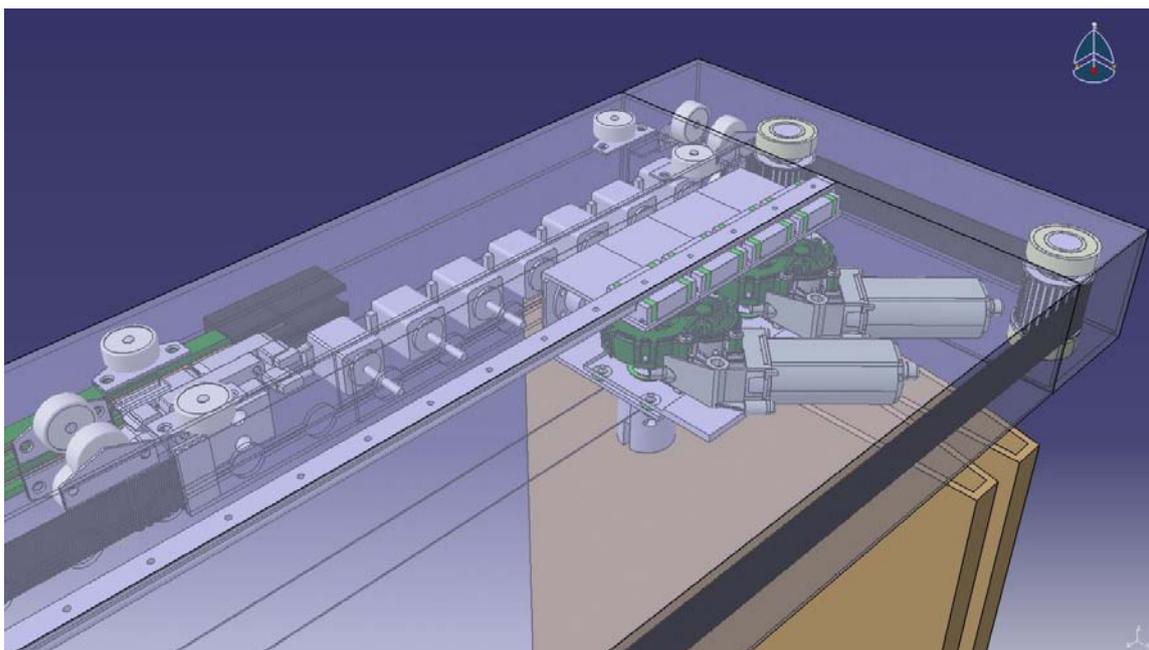
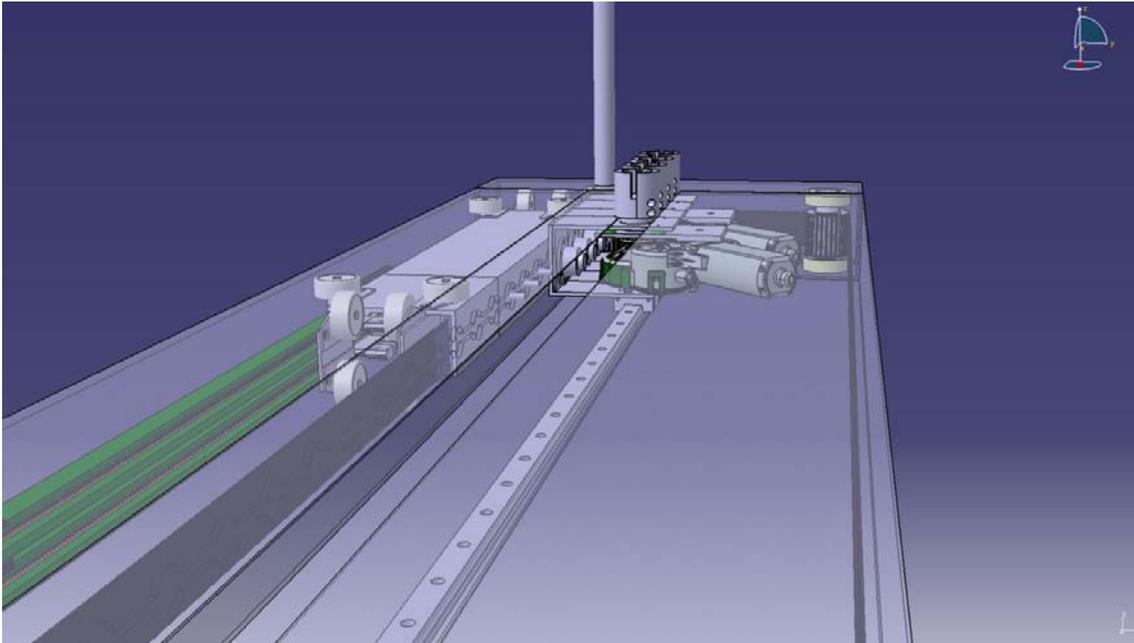


Abbildung 26: Ansicht oben LV8

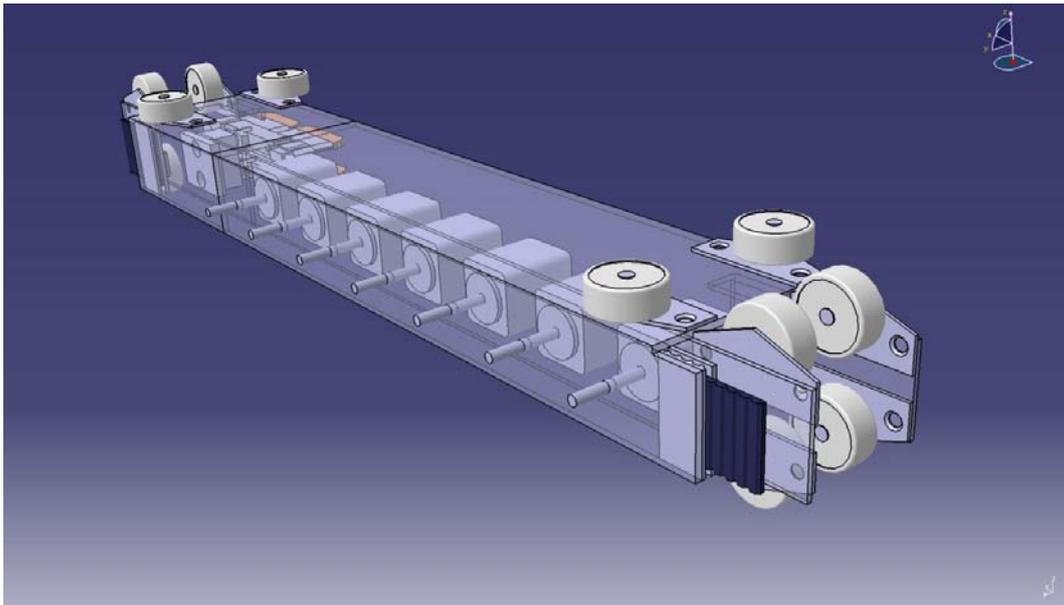
Wie in der folgenden Abbildung der Mechanik unterhalb der Lamelle (Abbildung 27) erkennbar ist, sind der Schlitten sowie der Zahnriemen in gleicher Ausführung wie oben vorgesehen, um eine eindeutige Stellung der Lamellen zu ermöglichen. Beide Schlitten werden von einem Schrittmotor über eine Transversalwelle angetrieben.

Der Schlitten ist unterhalb der Lamellen in der gleichen Lage, d.h. mit der Öffnung unten, eingebaut, um ein Abrinnen von möglichem Tauwasser zu ermöglichen sowie ein Sammeln von Schmutz und Staub in der Konstruktion zu vermeiden.



**Abbildung 27: Ansicht unten LV8**

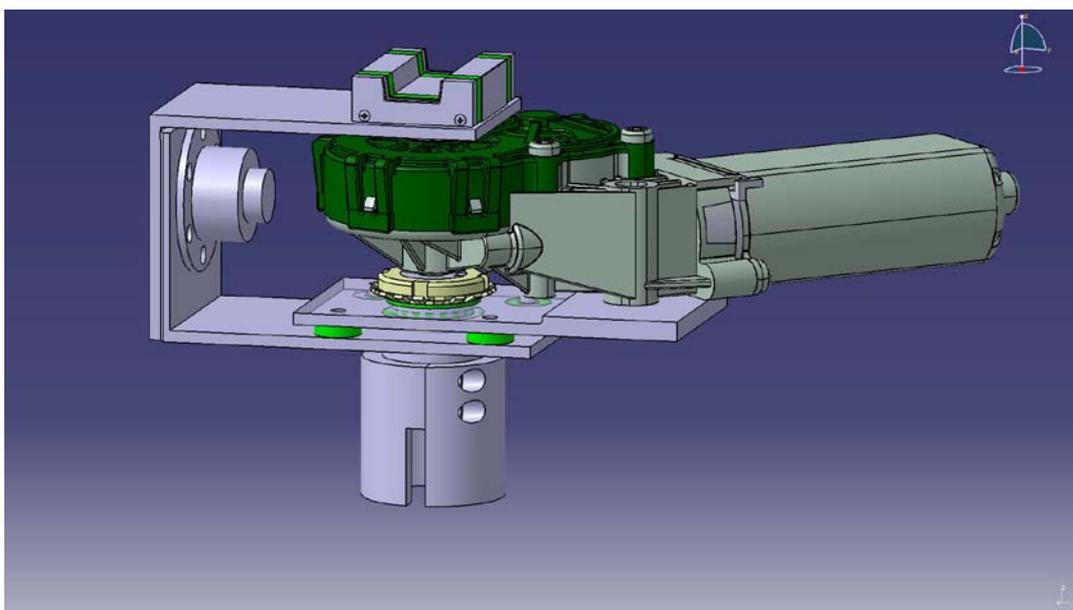
In Abbildung 28 ist der Schlitten separat dargestellt, um dessen Bauteile besser erkennbar zu machen. Der Zahnriemen ist an beiden Enden des Schlittens mit Klemmvorrichtungen eingespannt. Die Führung des Schlittens erfolgt über 12 Gummirollen, die sich im inneren der Tragkonstruktion abstützen. Um 7 Lamellen gleichzeitig aus der Garage mitnehmen zu können, sind die Linearmotoren im Abstand der Lamellen angeordnet. Ihre Achsen sind gelagert, sodass die Motoren nur sehr geringe Momente normal auf ihre Achse aufnehmen.



**Abbildung 28: Schlitten LV8**

### **Verdrehen der Lamellen:**

Abbildung 29 zeigt eine Aufhängung über der Lamelle. Die Drehung der Lamelle wird durch den hier dargestellten Gleichstrommotor mit Schneckengetriebe ausgeführt. Pro Lamelle wird nur ein solcher Motor benötigt und die Motoren können abwechselnd oben und unten eingebaut werden. Dies ist aus Platzgründen ohnehin unvermeidbar. Um die Übertragung der zum Beispiel durch Winddruck auf die Lamelle erzeugten Momente auf die Tragkonstruktion zu vermeiden, sind die Verdrehmotoren auf einem Passblech montiert, das über Gummimuffen mit der Tragkonstruktion verbunden ist.



**Abbildung 29: Aufhängung der Lamellen mit Motor LV8**

### Verriegeln der Lamellen:

Jede Lamellenaufhängung verfügt über einen gefederten Bolzen, der durch seine Feder in den unten dargestellten Verankerungen gehalten wird (siehe Abbildung 30). Soll eine Lamelle verfahren werden, so wird dieser von einem der Linearmotoren aus seiner Verankerung gedrückt. Durch den Schlitz in der Tragkonstruktion kann der wesentlich dünnere Bolzen des Motors verfahren und die Lamelle an der gewünschten Stelle wieder absetzen. Beim Einklinken stellt der Bolzen über Druckkontaktstifte die Stromversorgung für die Verdrehmotoren her.

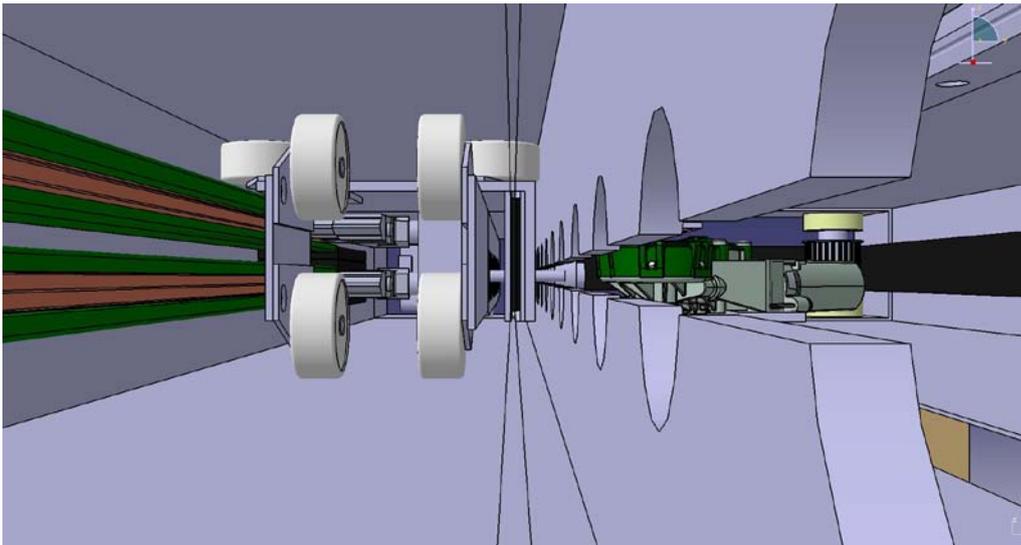


Abbildung 30: Innenansicht Tragkonstruktion LV8

### 5.4.2 Berechnung

Wie bei den vorhergehenden Berechnungen wurde auch hier zuerst die Zeit berechnet, die die Anlage benötigt, um komplett zu schließen. Mit einer Dauer von 4 Minuten und 42 Sekunden bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s wird die Anforderung von 5 Minuten übertroffen. Der limitierende Faktor für die Schließzeit ist die Verfahrszeit der Linearmotoren. Durch den geringen Platzbedarf können nur kleine Schrittmotoren eingesetzt werden. Um die Reibungskräfte beim Eingriff zu überwinden, bedarf es einer sehr geringen Steigung der Spindel. Damit ergibt sich für den gewählten Linearmotor eine Verfahrszeit von insgesamt 2 Minuten und 8 Sekunden um alle Lamellen aus der Garage an ihre Positionen bringen zu können.

Um den für das Verfahren des Schlittens zuständigen Motor auslegen zu können, wurde der Winddruck auf die Lamellen berechnet. Hier wurde von einem cw-Wert der Lamellen von 1.8 ausgegangen. Mit der Trägheit der Lamellen und der in den Linearlagern verursachten Reibung ergibt sich folgendes Antriebssystem:

- Motor: EC Motion SEMC299-E6.4BE; Nema 34; Haltemoment 6,5 Nm; Encoder
- Getriebe: Stirnradgetriebe mit Übersetzung 1:2
- Zahnriemen mit AT5-Profil, Stahlzugträger; Breite = 32 mm

Wie zuvor erwähnt, wird das Verdrehen der Lamellen vor allem wegen ihrer Selbsthemmungsfunktion durch Gleichstrommotoren mit Schneckengetrieben bewerkstelligt. Bei 20 m/s Wind und einer ungünstigen Überdeckung der Lamellen ergibt sich ein Moment von ca. 30 Nm. Da ein solcher Motor in beide Richtungen drehen kann, muss er den Winddruck allerdings nicht überwinden, sondern kann mit dem Wind drehen. Damit konnte der Schneckengetriebemotor Bosch AHC2 trotz seines geringeren Losbrechmomentes gewählt werden. Er verfügt über Hall-Sensoren zur Positionsbestimmung, um die Stellung der Lamellen genau steuern zu können und arbeitet mit einer Übersetzung von 1:217, was in einer Normdrehzahl von nur 15 U/min resultiert. Leider reicht die Schutzart dieses Motors mit IP50 für eine Außenanwendung nicht aus. Er muss also zusätzlich durch eine Hülle beziehungsweise einen Spray geschützt werden. Die Federkontaktstifte für die Stromzuführung der Getriebemotoren müssen doppelt ausgeführt werden, um den Maximalstrom von 7 A leiten und für Kontaktsicherheit sorgen zu können.

Um die Lagerung der Lamellen auslegen zu können, wurde über die Durchbiegung der Lamellen durch den Winddruck ihre Verkürzung sowie ihre Neigung berechnet. Beide fallen relativ gering aus. Dennoch wurde eine Lagerung über Gummimuffen vorgesehen, um die Momente nicht auf die restliche Aufhängung und vor allem nicht auf die Lineargleitlager zu übertragen, die bei zu hohen Momenten verklemmen können.

### 5.4.3 Grobe Stückliste und wirtschaftliche Bewertung

Wie für die beiden vorhergehenden Lösungsvarianten wurde auch hier eine wirtschaftliche Bewertung erstellt um Kosten und Stückzahlen abschätzen zu können (siehe Tabelle 22)

Baugruppe / Gesamtstatus	Teil / Gesamtstatus	Bezeichnung	Preis (€)	Pro	Anzahl pro Stockwerk	Insgesamt	Pro Lamelle	Stück pro Lamelle	
Antrieb Schlitten	Motor	SECM299-E4.5AE	286,13	Stück	1	572,26	10,22	0,04	
	Leistungsteil	ECMD288.000	336,88	Stück	1	673,76	12,03	0,04	
	Encoder		100,00	Stück	1	200,00	3,57	0,04	
	Steuerung		100,00	Stück	1	200,00	3,57	0,04	
	div.Kabel		20,00	Meter	1	40,00	0,71	0,04	
	Motoraufhängung		50,00	Stück	1	100,00	1,79	0,04	
	Motorwelle		30,00	Stück	1	60,00	1,07	0,04	
	Zahnrad Abtrieb Motor	21499040	22,12	Stück	1	44,24	0,79	0,04	
	Zahnrad Antriebswelle	21499080	53,35	Stück	1	106,70	1,91	0,04	
	Aufhängung Antrieb		20,00	Stück	1	40,00	0,71	0,04	
	Transversalwelle		40,00	Stück	2	160,00	2,86	0,07	
	Zahnriemen	AT5 B32 endlos	20,42	Meter	50	2042,00	36,46	1,79	
	Synchronscheibe		6,00	Stück	8	96,00	1,71	0,29	
	Lager Antriebswelle	W 6203-2Z	13,66	Stück	4	109,28	1,95	0,14	
	Sicherungsring	Welle d16/Nut d15.2	0,24	Stück	10	4,80	0,09	0,36	
	Distanzhülse		1,00	Stück	21	42,00	0,75	0,75	
	Passfeder	DIN6885 6x6x20mm	0,45	Stück	14	12,60	0,23	0,50	
Schlitten	Schlittengehäuse		30,00	Stück	2	120,00	2,14	0,07	
	Rollen		1,30	Stück	24	62,40	1,11	0,86	
	Klemmverbinder ZR		30,00	Stück	2	120,00	2,14	0,07	
	Einspannelement ZR		30,00	Stück	2	120,00	2,14	0,07	
	Linearmotor		150,00	Stück	14	4200,00	75,00	0,50	
	Steuerung		150,00	Stück	2	600,00	10,71	0,07	
	Schleifkohle	DSW 2/40	23,68	Stück	8	378,88	6,77	0,29	
	Anschlussleitung	AL-WFLA2,5PH1-6,3	2,47	Stück	8	39,52	0,71	0,29	
	Trafo		100,00	Stück	2	400,00	7,14	0,1	
Trägerelemente Lamellen	Motor+Schneckengetriebe	Bosch AHC2	74,00	Stück	28	4144,00	74,00	1,00	
	Verriegelungsbolzen		5,00	Stück	56	560,00	10,00	2,00	
	elektrische Druckkontakte		5,00	Stück	56	560,00	10,00	2,00	
	Gleitlager Verriegelung		0,30	Stück	56	33,60	0,60	2,00	
	Distanzgummi		1,00	Stück	168	336,00	6,00	6,00	
	Gleitlager		3,00	Stück	56	336,00	6,00	2,00	
	Ublech-Konstruktion		20,00	Stück	56	2240,00	40,00	2,00	
	Passblech		5,00	Stück	56	560,00	10,00	2,00	
	Verbindungsglied		10,00	Stück	56	1120,00	20,00	2,00	
	Wellenmutter		0,50	Stück	168	168,00	3,00	6,00	
	Sicherungsblech		1,00	Stück	56	112,00	2,00	2,00	
Linearführung	Linearschiene	igus drylin	24,00	Meter	24	1152,00	20,57	0,86	
	Linearschlitten	igus drylin	10,00	Stück	112	2240,00	40,00	4,00	
Tragkonstruktion	Aufhängung Antrieb		20,00	Stück	56	2240,00	40,00	2,00	
	Tragkonstruktion		30,00	Meter	24	1440,00	25,71	0,86	
	Schutzblech		5,00	Meter	24	240,00	4,29	0,86	
	Stromschiene	U15	10,90	Meter	46,4	1011,52	18,06	1,66	
	Verbinder	UV 15 K4	5,68	Meter	8	90,88	1,62	0,29	
	Einspeisung	UE 15 K4	5,67	Meter	4	45,36	0,81	0,14	
	Sicherungsklemme	USK 15 K4	2,52	Meter	8	40,32	0,72	0,29	
	Kompakthalter	KA 15/2	4,73	Meter	26	245,96	4,39	0,93	
	Endkappe	UK 15-L	1,16	Meter	8	18,56	0,33	0,29	
	Stromzuführung Drehmotoren		2,00	Meter	24	96,00	1,71	0,86	
	Kontaktstellen Drehmotoren		22,00	Meter	24	1056,00	18,86	0,86	
<b>Summe Mechanik</b>						<b>27786,04</b>	<b>496,18</b>	<b>43,25</b>	
Lamelle	Welle		190	Stück	28	10388	185,5	1,0	
	Blech	1x380x1740	28,76	Stück	112	6442,24	115,04	4,0	
<b>Summe Lamelle</b>						<b>16830,24</b>	<b>300,54</b>	<b>5</b>	
<b>Gesamtsumme</b>						<b>44616,28</b>	<b>796,72</b>	<b>48,25</b>	

Tabelle 22: Wirtschaftliche Bewertung LV8

## 5.5 Bewerten nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien

Bei dieser Bewertungsmethode nach VDI 2225<sup>18</sup> wird im Unterschied zur Nutzwertanalyse versucht, auf Gewichtungen weitestgehend zu verzichten. Nur im Falle starker Unterschiede werden Gewichtungsfaktoren verwendet. Um eine Lösungsvariante bewerten zu können müssen zuerst Bewertungskriterien festgelegt werden. Diese ergeben sich oft aus der Anforderungsliste, können aber auch aus allgemeinen Bedingungen abgeleitet werden. Wichtig ist hier, dass die Kriterien positiv formuliert sind, da diese so später besser zuordenbar sind. Jedem Bewertungskriterium müssen nun eine Gewichtung sowie eine Eigenschaftsgröße zugeordnet werden. Eigenschaftsgrößen können Kennwerte, aber auch konkrete Aussagen sein. Als nächster Arbeitsschritt werden Wertvorstellungen durch Vergabe von 0 bis 4 Punkten zugeordnet. Diese Wertvorstellungen werden gewichtet und auf den für das jeweilige Bewertungskriterium maximal möglichen Wert bezogen. Das Ergebnis für jede Lösungsvariante kann in einem abschließenden Schritt der ebenfalls auf einen Referenzwert bezogenen wirtschaftlichen Bewertung gegenübergestellt werden.<sup>19</sup>

Aus der Anwendung dieser Bewertungsmethode in Tabelle 23 geht eindeutig Lösungsvariante 8 als zu verfolgende Variante hervor. Sie hat weniger Einzelteile als Lösungsvariante 7, was zur Einfachheit des Systems beiträgt, hat aber den Vorteil gegenüber Lösungsvariante 5, dass die Position jeder Lamelle zu jedem Zeitpunkt eindeutig bestimmt ist. Wirtschaftlich gesehen ist sie beiden anderen Lösungsvarianten überlegen. In der nachfolgenden Darstellung der Ergebnisse der Bewertung (siehe Abbildung 31) sind die Werte für die Wirtschaftlichkeit auf den Wert von Lösungsvariante 8, multipliziert mit 0,7 bezogen.

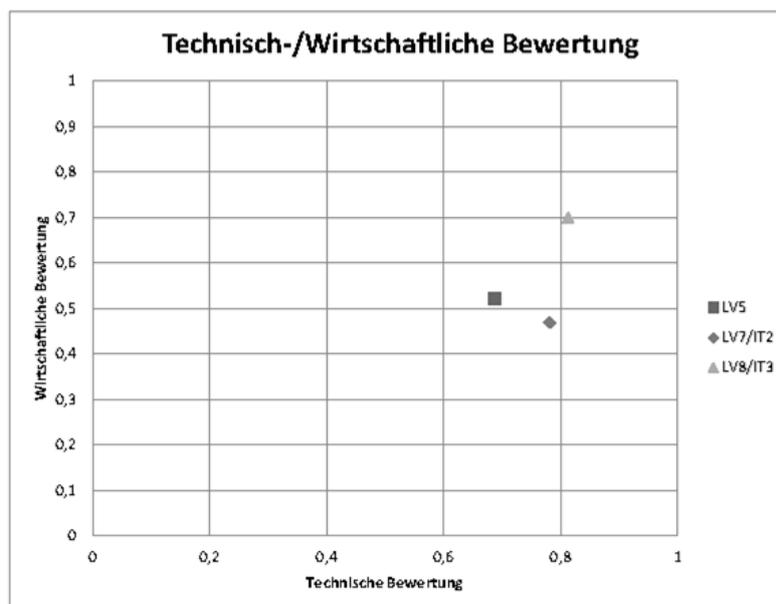


Abbildung 31: Diagramm Technisch- wirtschaftliche Bewertung

<sup>18</sup> (Verein Deutscher Ingenieure, VDI 2225 -- Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, 1964)

<sup>19</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

Technische Bewertung		Eigenschaftsgrößen				LVS			L7/I7/T2			L8/I7/T3					
Nr.	Bewertungskriterien	Gew.	Einh.	Eigensch.	Begründung	Wert	Gew. Wert	bez. Wert	Eigensch.	Wert	Gew. Wert	bez. Wert	Eigensch.	Wert	Gew. Wert	bez. Wert	
1	einfache Instandhaltung	2	-	kompiziert	Seile müssen teilweise demontiert werden	1	2	0,25	einfach	Gehäuse verschraubt, einzeln entnehmbar	3	0,75	einfach	sowohl Tragkonstruktion als auch Lamelaufhängung leicht zerlegbar	3	0,75	
2	hohe Zuverlässigkeit	2	-	gut		3	6	0,75	mittel	Antrieb formschlüssig, aber viele kleine Aktoren	2	0,5	gut	Antrieb formschlüssig, selbsthemmender Drehantrieb, Linearführung kann klemmen	2	0,5	
3	geringe Teilezahl	1	Stk.	15		4	4	1	70	ohne Garage, Schiene, Wetterschutz und Kleinteile wie Schrauben	2	0,5	50	ohne Kleinteile wie Schrauben und Teilabschnitte bei Führung und Stromschiene	2	0,5	
4	hohe Eindeutigkeit	2	-	mittel	beim Verfahren ist die Position der Lamellen undefiniert	2	4	0,5	sehr hoch	Schrittmotor mit Encoder, Formschlüssiger Antrieb	4	8	sehr hoch	Schrittmotor mit Encoder, formschlüssiger Antrieb	4	8	
5	hohe Flexibilität des Systems	1		sehr hoch		3	3	0,75	sehr hoch	Pos. u. Drehung jeder Lamelle separat steuerbar (stufig)	4	4	sehr hoch	Pos. u. Drehung jeder Lamelle separat steuerbar (kontinuierlich)	4	4	
6	kleiner Bauraum	1	cm	8		4	4	1	8	eingehalten	4	4	8	eingehalten	4	4	
7	kleiner Bauraum Garage	1	cm	155		1	1	0,25	140	eingehalten	4	4	140	eingehalten	4	4	
8	schnelle Schließzeit	1	min	2	sehr schnelle Schließ- und Verfahrenzeiten	4	4	1	5	eingehalten	2	0,5	5	eingehalten, im Normalfall unterboten	3	0,75	
9	Funktionserfüllung	3	-	2	Lamellen sind frei im Wind Endstadium	2	6	0,5	5	Aktoren	2	0,5	5	Stromzuführung der Verdrehmotoren	3	0,75	
						22	28	0,6875			25	34	0,78125		26	35	0,8125
(Annahme: 56 Lamellen Kosten 17000€)																	
Wirtschaftliche Bewertung																	
9	Preis Bezugswert (L18*0,7)	31350	€	60072		0,521877081	bezogener Wert		66835,38		0,46906597	bezogener Wert		44786,00	Wert	bezogener Wert	0,7

Tabelle 23: Technisch- wirtschaftliche Bewertung

## 5.6 Gesamtentwurf LV8

In diesem Kapitel wird die Weiterbearbeitung der ausgewählten Lösungsvariante 8 dargestellt. Ziel dieses Schrittes ist es, die Basis für eine FMEA zu bieten, die wiederum als Grundlage für die Entwicklung eines Prototyps dienen soll.

### 5.6.1 Beseitigung der beim Bewerten erkannten Schwachstellen

Nach genauer Analyse der einzelnen Baugruppen und Kontrolle auf Fehler wurden mehrere Verbesserungsmöglichkeiten in der Konstruktion erkannt. Die vorgenommenen Veränderungen werden in diesem Kapitel dargestellt.

#### Lineargleitführung

Aufgrund des beim Verfahren der Lamellen nicht zentrischen Eingriffes zwischen Schlitten und Lamelle muss die Lineargleitlagerung ein Moment von 30 Nm aufnehmen können. Wenn die Führung, so wie in der ursprünglichen Konstruktion zu weit vom Eingriffspunkt des Bolzens entfernt angebracht ist, kann diese klemmen. Aus diesem Grund wurde sie so nahe wie möglich an den Eingriffspunkt verlagert.

#### Trägerelemente

Die Trägerelemente ober- und unterhalb der Lamellen würden sich bei hohen Windstärken sowie unter dem Gewicht der Lamellen plastisch verformen, sodass der sichere Eingriff der Verriegelungsbolzen in ihre Arretierungen nicht mehr gewährleistet wäre. Um dies zu verhindern, wurden die durch das Verschieben der Lineargleitführungen mit einem L-Profil ausgeführten Tragkonstruktionen durch seitlich eingeschweißte Bleche verstärkt.

#### Lamellen

Um das Einklemmen von Fingern zwischen zwei benachbarten und sich drehenden Lamellen zu vermeiden, wurden Gummilamellen an den Kanten jeder Lamelle vorgesehen.

#### Schutzblech

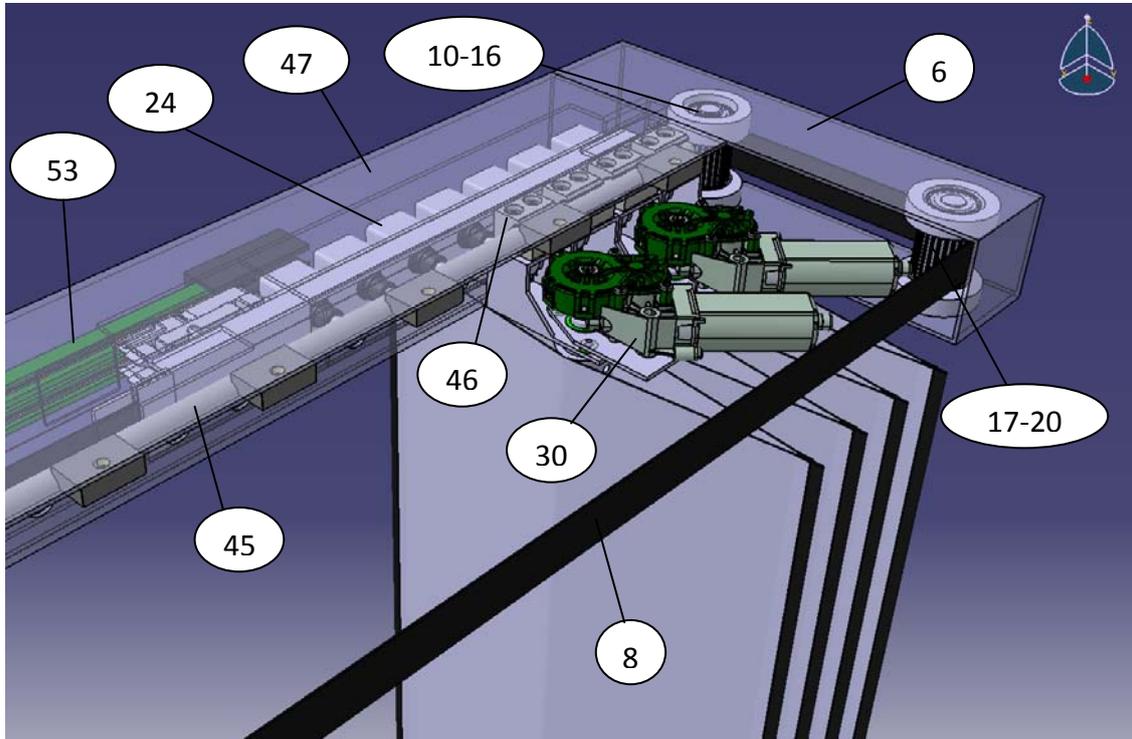
Um das Eintreten von Regenwasser in die Tragkonstruktion an der Unterseite der Lamellen und damit eine mögliche Beschädigung der Verdrehmotoren zu vermeiden, wird eine Gummidichtung bestehend aus überlappenden Lamellen über die für das Verfahren benötigte Fuge installiert. Da die Welle unterhalb der Lamelle diese Dichtung öffnet, wird an ihr zusätzlich ein kleines konisches Dach vorgesehen.

#### Schlitten

Um die Zeit für das Ein- und Ausklinken in den Lamelle, und damit die gesamte Verfahrszeit zu verringern, wurden größere Linearschrittmotoren verbaut. Diese werden mit Endsaltern versehen, um Fehlern vorzubeugen.

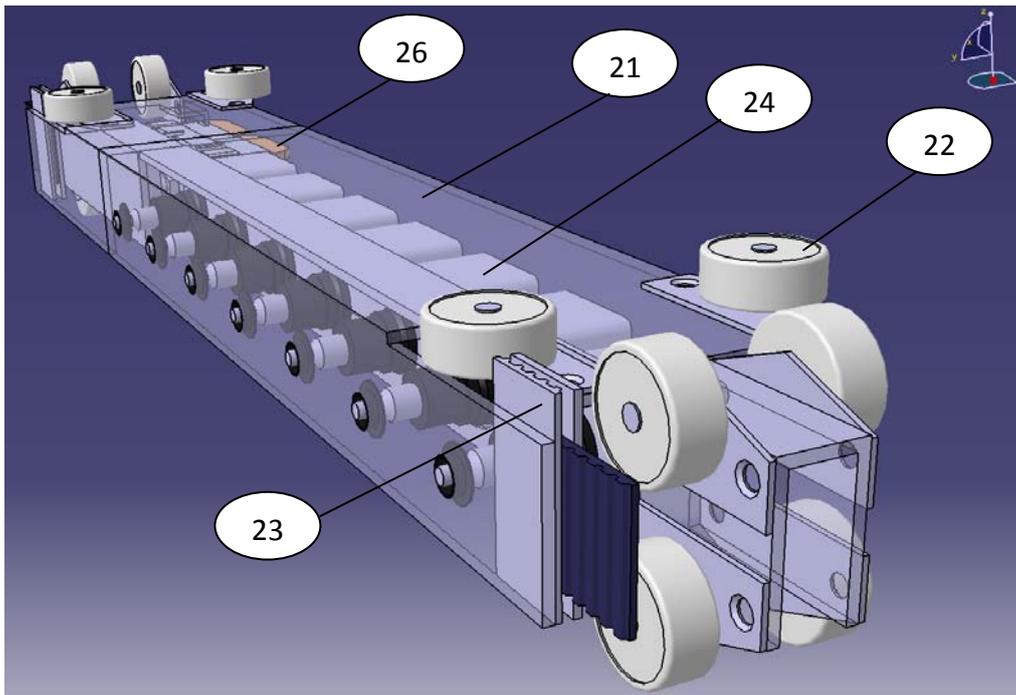
### 5.6.2 Finales Produktdesign

Mit den nun vorgenommenen Verbesserungen ergibt sich das finale Produktdesign. Abbildung 32 gibt einen Überblick über den Aufbau. In den darauffolgenden Abbildungen werden Bauteile und Lösungen im Detail dargestellt.



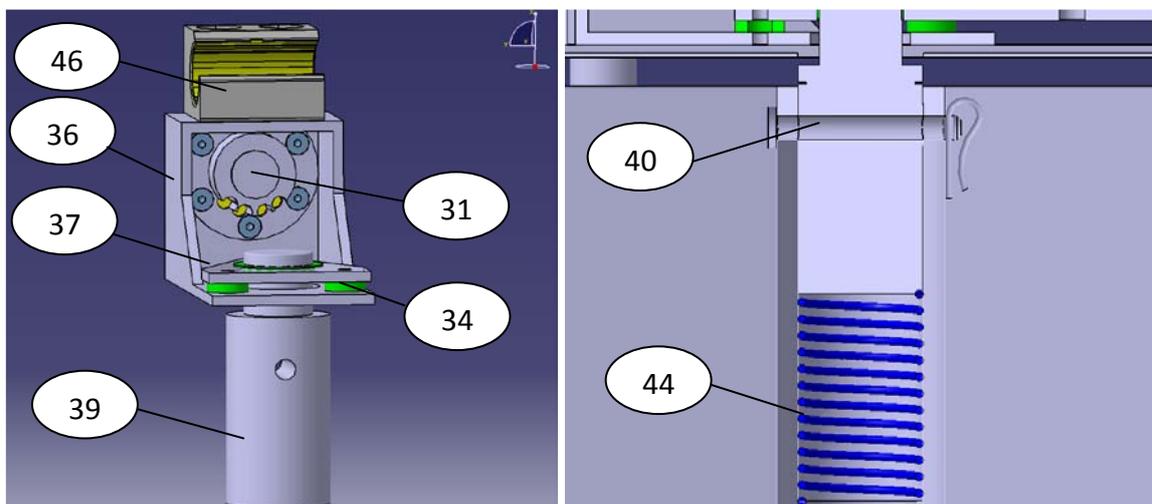
*Abbildung 32: Gesamtansicht des Aufbaus oben LV8-final*

Der Schlitten besteht, um die Fertigung zu vereinfachen, aus einer zur Vorgängerversion abgeänderten Blechkonstruktion. Die daran angebrachten Rollen führen diesen in der Tragkonstruktion und stützen ihn gegen die Federkraft des Bolzens beim Einklinken ab. An beiden Enden des Schlittens sind Klemmverbinder für den Zahnriemen angebracht. An dem in Abbildung 33 nicht transparent dargestellten L-Profil werden die Linearschrittmotoren angebracht. Ihre Hubzylinder werden durch den schwarz dargestellten Aufbau vor den Motoren verdrehgesichert und beim Eingriff an der Vorderfront des Schlittens über Gleitlager geführt. An der Hinterseite des Schlittens befinden sich die Stromabnehmer, die für die Stromzuführung der Linearschrittmotoren verantwortlich sind.



**Abbildung 33: Schlitten LV8-final**

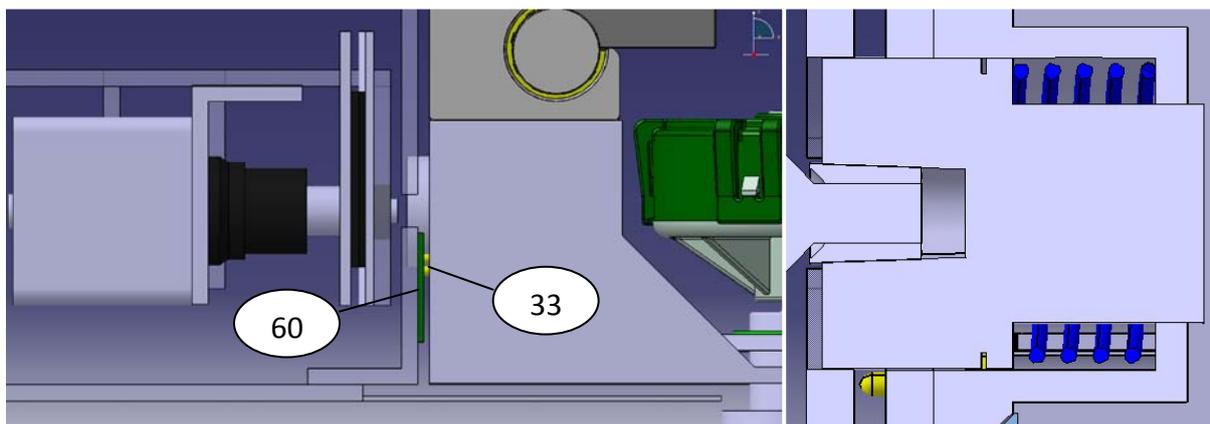
Die nun durch Seitenwände verstärkten Trägerelemente werden durch Lineargleitlager geführt. Die runde Führung macht die Anlage unempfindlicher gegen Verkanten bei Fluchtungsfehlern während des Verfahrens. Die Lagerung der Verbindungswelle (zur Lamelle) erfolgt bei der Fest- sowie bei der Loslagerung über ein separates, durch Gummimuffen gelagertes Passblech. Dadurch werden Verformungen und Momente sowie mögliche Schwingungen gedämpft und nicht direkt auf die Lagerung und die Tragkonstruktion übertragen. Wie aus Abbildung 34 rechts ersichtlich, ist die Welle mit der Lamelle durch eine Steckverbindung verbunden. Beim Einsetzen beziehungsweise beim Entnehmen der Lamelle wird die Welle gegen die Feder (44) in die Lamelle gedrückt. An der Stelle der Lagerung wird sie dann von der Feder ausgefahren und kann mit Hilfe des Bolzens gesichert werden.



**Abbildung 34: Trägerelement und Verbindung mit Lamelle LV8-final**

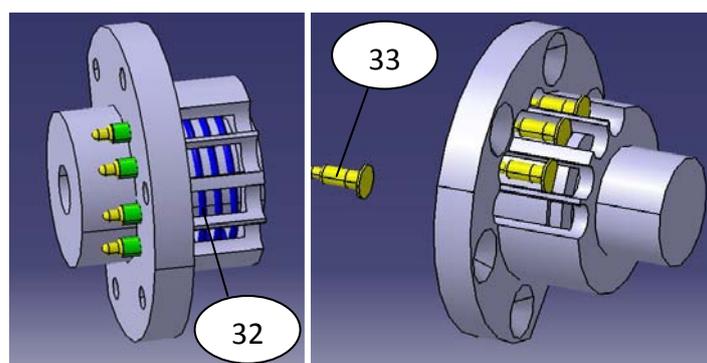
In Abbildung 34 links ist der Verriegelungsbolzen zu erkennen. Er ist mit der Trägerkonstruktion verschraubt und sowohl für das Verriegeln der Lamellen als auch für die Herstellung der Stromversorgung der Verdrehmotoren bei Stillstand der Lamelle zuständig.

Wie in Abbildung 35 ersichtlich, ist der Eingriff zwischen Bolzen und Hubzylinder des Linearmotors leicht konisch ausgeführt, um ein Spiel zwischen den beiden Bauteilen zu vermeiden. Der konische Plastikaufsatz des Linearmotors ist aufgeschraubt und kann ausgetauscht werden, sollte er sich abnutzen. Beim Einklinken des Bolzens in die Tragkonstruktion werden im Bolzen verbaute Pins an eine Platine mit Goldkontakten gedrückt, die an der Tragkonstruktion montiert ist. Beim Ausklinken wird dieser Kontakt wieder gelöst, da eine Stromversorgung während der Fahrt, sowie in der Garage nicht benötigt wird. Um die Kontakte vor Witterung und Schmutz zu schützen, sind diese nur oberhalb der Lamellen verbaut. Zur Stromversorgung der unterhalb der Lamellen liegenden Verdrehmotoren wird ein Kabel durch die Welle der Lamelle geführt. Dabei ist auf die maximale Verdrehung der Lamellen zu achten, um die Kabel nicht zu beschädigen.



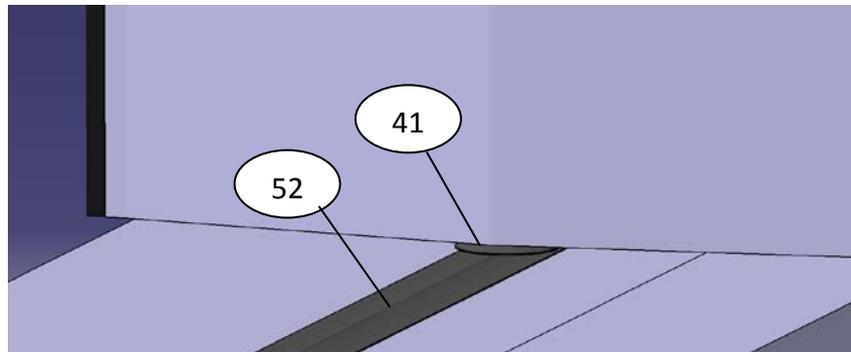
**Abbildung 35: Darstellung der Verriegelung**

Zur besseren Erklärung der Funktionsweise des Verriegelungsbolzens ist er in Abbildung 36 noch einmal im Detail gezeigt. Links sind der Bolzen im zusammengebauten und ausgefahrenen Zustand sowie vier Kontaktpins mit Isolation (grün) zu sehen. Wird die Feder vollkommen gestaucht, können die Kontaktpins in die dafür vorgesehene Nut eingelegt werden.



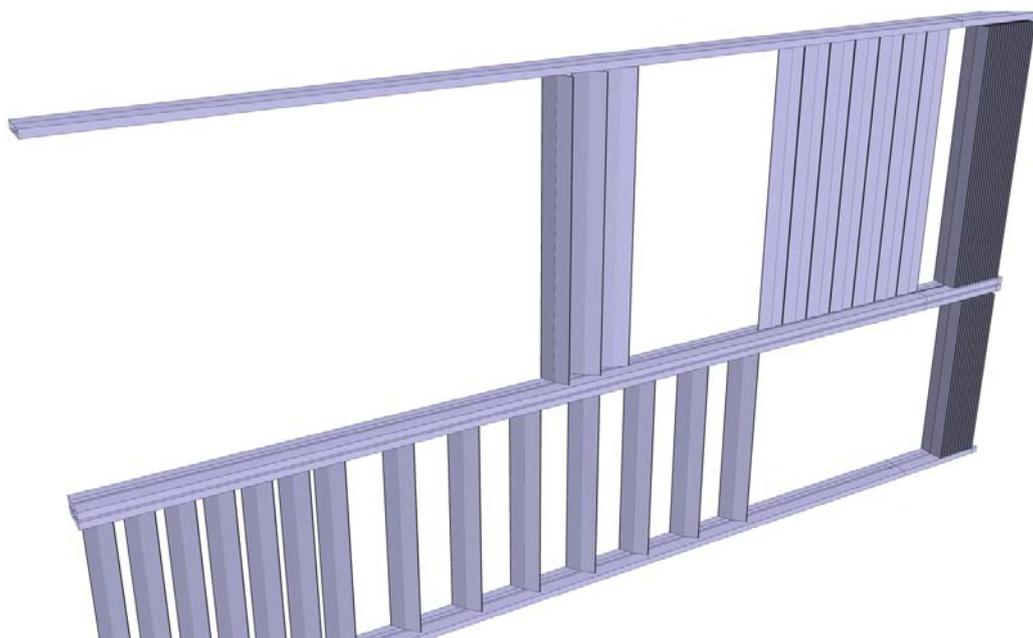
**Abbildung 36: Verriegelungsbolzen mit Feder und Kontaktpins**

Um das Eintreten von Regenwasser und Schmutz in das Innere der Tragkonstruktion unterhalb der Lamellen zu verhindern und damit vor allem die Verdrehmotoren zu schützen, werden zwei Gummilamellen (52) an der Öffnung im Schutzblech angebracht (siehe Abbildung 37). Da diese Dichtung durch die Wellen der Lamellen aufgespalten wird, wurde zusätzlich ein kleines Dach (41) an diesen angebracht.



**Abbildung 37: Regenschutz der Tragkonstruktion unten**

Mithilfe der dargestellten Detaillösungen lässt sich eine sehr flexible Beschattungsanlage realisieren. In Abbildung 38 sind die möglichen Stellungen der Lamellen dargestellt. Sie können an jeden beliebigen Ort verfahren werden, was unter anderem Anordnungen mit größeren Abständen ermöglicht. Dies ist bei einem flachen Einfallswinkel der Sonne von Nutzen, um direkte Sonneneinstrahlung zu vermeiden und dennoch bessere Lichtverhältnisse im Innenraum zu gewährleisten. Zudem ist es dadurch möglich den Ausblick aus dem Hausinneren so wenig wie möglich einzuschränken. Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der separaten Drehbarkeit der Lamellen, wodurch sanftere Übergänge der Lichtverhältnisse im Innenraum ermöglicht werden können.



**Abbildung 38: Gesamtansicht der Anlage**

### 5.6.3 Abschätzung der Gesamtkosten der Anlage

Wie in der folgenden finalen Wirtschaftsbewertung (siehe Tabelle 24 und Tabelle 25) zu erkennen ist, wurden einige Teile gegenüber der in Tabelle 22 dargestellten Bewertung verändert, hinzugefügt und konkretisiert. Die Preise ergeben sich zum Teil aus vorhandenen Angeboten von Produzenten und Großhändlern und zum Teil aus Schätzungen. Für die Fertigungs- und Montagekosten wurden 40% des Einkaufspreises für Fertigprodukte sowie Halbzeuge aufgeschlagen, um eine Abschätzung der Gesamtkosten der Anlage zu geben.

Baugruppe	Teil	Beschreibung/Bezeichnung	Preis (€)	Pro	Anzahl pro Stockwerk	Preis Insgesamt	Preis Pro Lamelle
Antrieb Schlitten	Motor/Flachgetriebe/Treiber	Oriental Motors BLH450KC-FR	424,00	Stück	1	848,00	15,14
	Steuerung		336,88	Stück	1	673,76	12,03
	Encoder	Absolutwertgeber, Multiturn	100,00	Stück	1	200,00	3,57
	div. Kabel		20,00	Meter	1	40,00	0,71
	Motoraufhängung		20,00	Stück	1	40,00	0,71
	Blechschauben Motoraufhängung	Selbstschneidend 4x6mm	0,11	Stück	10	2,20	0,04
	Aufhängung Antrieb		20,00	Stück	2	80,00	1,43
	Blechschauben Aufhängung Antrieb	Selbstschneidend 4x6mm	0,11	Stück	8	1,76	0,03
	Transversalwelle		40,00	Stück	2	160,00	2,86
	Zahnriemen	AT5 B32 24m	490,08	Stück	2	1960,32	35,01
	Spannschloss ZR		50,00	Stück	2	200,00	3,57
	Synchrone Scheibe Antrieb		6,00	Stück	2	24,00	0,43
	Lager Antrieb	W 6203-2Z	13,66	Stück	4	109,28	1,95
	Drehteil Loslagerung Antrieb		5,00	Stück	2	20,00	0,36
	Drehteil Festlagerung Antrieb		5,00	Stück	2	20,00	0,36
	Sicherungsring Antrieb	Welle d16/Nut d15.2	0,24	Stück	4	1,92	0,03
	Distanzhülse Antrieb		0,50	Stück	4	4,00	0,07
	Passfeder Antrieb	DIN6885 6x6x20mm	0,45	Stück	2	1,80	0,03
	Lager Umlenker	W 6203-2Z	13,66	Stück	12	327,84	5,85
	Drehteil Lagerung Umlenker		5,00	Stück	12	120,00	2,14
Distanzhülse Umlenker		1,00	Stück	12	24,00	0,43	
Passfeder Umlenker	DIN6885 6x6x20mm	0,45	Stück	6	5,40	0,10	
Schlitten	Schlittengehäuse		30,00	Stück	2	120,00	2,14
	Blechschauben Gehäuse	Selbstschneidend 4x6mm	0,11	Stück	20	4,40	0,08
	Rollen		1,30	Stück	24	62,40	1,11
	Blechschauben Rollen	Selbstschneidend 4x6mm	0,11	Stück	48	10,56	0,19
	Klemmverbinder ZR		30,00	Stück	4	240,00	4,29
	Sechskantschrauben	M3x10	0,03	Stück	16	0,80	0,01
	Sicherungsmutter	M3	0,01	Stück	16	0,44	0,01
	Linearmotor	Heydon 35000 Nema14	190,00	Stück	14	5320,00	95,00
	Endschalter		10,00	Stück	28	560,00	10,00
	Schleifkohle/Druckfeder/Nocken	DSW 2/40	23,68	Stück	8	378,88	6,77
	Halterung Schleifkohle	DSW 2/40	23,68	Stück	2	94,72	1,69
	Sechskantschrauben	M3x10	0,01	Stück	8	0,17	0,00
	Sicherungsmutter	M3	0,01	Stück	8	0,22	0,00
	Anschlussleitung	AL-WFLA2,5PH1-6,3	2,47	Stück	8	39,52	0,71
	Trafo		100,00	Stück	2	400,00	7,14
	Sechskantschrauben	M3x10	0,03	Stück	8	0,40	0,01
Sicherungsmutter	M3	0,01	Stück	8	0,22	0,00	
Trägerelement Lamellen	Motor-Schneckengetriebe		74,00	Stück	28	4144,00	74,00
	Sechskantschrauben	M6x40	0,01	Stück	28	0,56	0,01
	Sicherungsmutter	M6	0,01	Stück	28	0,71	0,01
	Verriegelungsbolzen		5,00	Stück	56	560,00	10,00
	Sechskantschrauben	M3x8	0,01	Stück	140	2,88	0,05
	Feder Bolzen		1,00	Stück	56	112,00	2,00
	elektrische Druckkontakte		5,00	Stück	112	1120,00	20,00
	Distanzgummi		1,00	Stück	168	336,00	6,00
	Gleitlager	Igus Iglidur J	3,00	Stück	56	336,00	6,00
	Ublech-Konstruktion		20,00	Stück	56	2240,00	40,00
	Passblech		5,00	Stück	56	560,00	10,00
	Sechskantschrauben	M3x12	0,01	Stück	168	4,20	0,08
	Sicherungsmutter	M3	0,01	Stück	168	4,57	0,08
	Verbindungsglied mit Sternaufsatz		10,00	Stück	28	560,00	10,00
	Verbindungsglied ohne Sternaufsatz		10,00	Stück	28	560,00	10,00
	Sicherungssplint Welle		4,00	Stück	56	448,00	8,00
	Regenschutz unten		2,00	Stück	28	112,00	2,00
	Wellenmutter		0,50	Stück	28	28,00	0,50
	Sicherungsblech		1,00	Stück	28	56,00	1,00
	Feder Lamelle		1,00	Stück	56	112,00	2,00

Tabelle 24: finale wirtschaftliche Bewertung LV8, Seite 1

Baugruppe	Teil	Beschreibung/Bezeichnung	Preis (€)	Pro	Anzahl pro Stockwerk	Preis insgesamt	Preis Pro Lamelle
Linearführung	Linearschiene	Igus Drylin W	24,00	Meter	24	1152,00	20,57
	Sechskantschrauben	M8x25	0,12	Stück	192	46,46	0,83
	Linearschlitten	Igus Drylin W	10,00	Stück	56	1120,00	20,00
	Sechskantschrauben	M8x25	0,12	Stück	112	27,10	0,48
Tragkonstruktion	Tragkonstruktion - Rechteck		3,35	Meter	12	80,35	1,43
	Tragkonstruktion - L1		0,31	Meter	24	15,05	0,27
	Tragkonstruktion - L2		0,31	Meter	24	15,05	0,27
	Tragkonstruktion - Blech		2,06	Meter	24	99,07	1,77
	Blechschraben	Selbstschneidend 4x6mm	0,11	Stück	480	105,60	1,89
	Schutzblech		2,78	Meter	24	133,40	2,38
	Gummilippe		3,00	Meter	24	144,00	2,57
	Stromschiene	U15	10,90	Meter	46,4	1011,52	18,06
	Verbinder Stromschiene	UV 15 K4	5,68	Stück	8	90,88	1,62
	Einspeisung Stromschiene	UE 15 K4	5,67	Stück	4	45,36	0,81
	Sicherungsklemme Stromschiene	USK 15 K4	2,52	Stück	8	40,32	0,72
	Kompakthalter Stromschiene	KA 15/2	4,73	Stück	26	245,96	4,39
	Sechskantschrauben	M5x8	0,03	Stück	24	1,58	0,03
	Endkappe Stromschiene	UK 15-L	1,16	Stück	8	18,56	0,33
	Stromzuführung Drehmotoren		2,00	Meter	12	48,00	0,86
	Kontaktstellen Drehmotoren		22,00	Stück	28	1232,00	22,00
	<b>Summe Einkauf Mechanik</b>						<b>28842,19</b>
Lamelle	Welle		50	Meter	97,44	9744,00	174,00
	Blech	1x380x1740	28,76	Stück	112	6442,24	115,04
	Gummilamellen		15	Stück	56	1680,00	30,00
<b>Summe Einkauf Lamellen</b>						<b>17866,24</b>	<b>319,04</b>
<b>Gesamtsumme Einkauf</b>						<b>46708,43</b>	<b>834,08</b>
<b>Fertigung und Montage (Einkauf*0,4)</b>						<b>18683,37</b>	<b>333,63</b>
<b>Gesamtsumme</b>						<b>65391,80</b>	<b>1167,71</b>

Tabelle 25: finale wirtschaftliche Bewertung LV8, Seite 2

### 5.6.4 Vorläufige Stückliste

In Tabelle 26 und Tabelle 27 ist die vorläufige Stückliste dargestellt. Die hier angeführten Positionsnummern werden auch in den Abbildungen zur Erklärung der Funktionsweise in Kapitel 5.6.2 verwendet.

TU Wien, E307 Institut für Konstruktionswissenschaften und technische Logistik			Vorläufige Stückliste für Beschattungsanlage LV8/IT3			Seite 1
Baugruppe	Pos	Menge	Me	Teil	Beschreibung/Bezeichnung	
Antrieb Schlitten	1	2	ST	Motor/Flachgetriebe/Treiber	Oriental Motors BLH450KC-FR	
	2	2	ST	Steuerung		
	3	2	ST	Encoder	Absolutwertgeber, Multiturn	
	4	2	M	div.Kabel		
	5	2	ST	Motoraufhängung		
	6	4	ST	Aufhängung Antrieb		
	7	4	ST	Transversalwelle		
	8	4	ST	Zahnriemen	AT5 B32 24m	
	9	4	ST	Spannschloss ZR		
	10	4	ST	Synchrone Scheibe Antrieb		
	11	8	ST	Lager Antrieb	W 6203-2Z	
	12	4	ST	Drehteil Loslagerung Antrieb		
	13	4	ST	Drehteil Festlagerung Antrieb		
	14	8	ST	Sicherungsring Antrieb	Welle d16/Nut d15.2	
	15	8	ST	Distanzhülse Antrieb		
	16	4	ST	Passfeder Antrieb	DIN6885 6x6x20mm	
	17	24	ST	Lager Umlenker	W 6203-2Z	
	18	24	ST	Drehteil Lagerung Umlenker		
	19	24	ST	Distanzhülse Umlenker		
	20	12	ST	Passfeder Umlenker	DIN6885 6x6x20mm	
Schlitten	21	4	ST	Schlittengehäuse		
	22	48	ST	Rollen		
	23	8	ST	Klemmverbinder ZR		
	24	28	ST	Linearmotor	Heydon 35000 Nema14	
	25	56	ST	Endschalter		
	26	16	ST	Schleifkohle/Druckfeder/Nocken	DSW 2/40	
	27	4	ST	Halterung Schleifkohle	DSW 2/40	
	28	16	ST	Anschlussleitung	AL-WFLA2,5PH1-6,3	
	29	4	ST	Trafo		
Trägerelement Lamellen	30	56	ST	Motor+Schneckengetriebe		
	31	112	ST	Verriegelungsbolzen		
	32	56	ST	Feder Bolzen		
	33	224	ST	elektrischer Druckkontaktpin		
	34	336	ST	Distanzgummi		
	35	112	ST	Gleitlager	Igus Iglidur J	
	36	112	ST	Ublech-Konstruktion		
	37	112	ST	Passblech		
	38	56	ST	Verbindungsglied mit Sternaufsatz		
	39	56	ST	Verbindungsglied ohne Sternaufsatz		
	40	112	ST	Sicherungssplint Welle		
	41	56	ST	Regenschutz unten		
	42	56	ST	Wellenmutter		
	43	56	ST	Sicherungsblech		
	44	56	ST	Feder Lamelle		
	Linearführung	45	48	M	Linearschiene	Igus Drylin W
46		112	ST	Linearschlitten	Igus Drylin W	

Tabelle 26: Stückliste LV8, Seite 1

TU Wien, E307 Institut für Konstruktionswissenschaften und technische Logistik			Vorläufige Stückliste für Beschattungsanlage LV8/IT3		Seite 2
Baugruppe	Pos	Menge	Me	Teil	Beschreibung/Bezeichnung
Tragkonstruktion	47	24	M	Tragkonstruktion - Rechteck	
	48	48	M	Tragkonstruktion - L1	
	49	48	M	Tragkonstruktion -L2	
	50	48	M	Tragkonstruktion -Blech	
	51	48	M	Schutzblech	
	52	48	M	Gummilippe	
	53	92,8	M	Stromschiene	U15
	54	16	ST	Verbinder Stromschiene	UV 15 K4
	55	8	ST	Einspeisung Stromschiene	UE 15 K4
	56	16	ST	Sicherungsklemme Stromschiene	USK 15 K4
	57	52	ST	Kompakthalter Stromschiene	KA 15/2
	58	16	ST	Endkappe Stromschiene	UK 15-L
	59	24	M	Stromzuführung Drehmotoren	
	60	56	ST	Kontaktstellen Drehmotoren	
Lamelle	61	194,88	M	Welle	
	62	224	ST	Blech	1x380x1740
	63	112	ST	Gummilamelle	
Kleinteile		1132	ST	Blechschraube	Selbstschneidend 4x6mm
		64	ST	Sechskantschraube	M3x10
		56	ST	Sechskantschraube	M6x40
		280	ST	Sechskantschraube	M3x8
		336	ST	Sechskantschraube	M3x12
		384	ST	Sechskantschraube	M8x25
		224	ST	Sechskantschraube	M8x25
		48	ST	Sechskantschraube	M5x8
		400	ST	Sicherungsmutter	M3
	56	ST	Sicherungsmutter	M6	

*Tabelle 27: Stückliste LV8, Seite 2*

### 5.6.5 Vorläufige Montageanweisung

Bei der Entwicklung des Gesamtentwurfs wurde die Montage genau betrachtet. Zugänglichkeit zu Schweißstellen sowie zu Verschraubungen wurde beachtet. Auch die in der Anforderungsliste geforderte Möglichkeit der Entnahme von Lamellen und der zugehörigen Mechanik zum Zweck der Wartung wurde nochmals genau betrachtet. Nachdem die Welle der Lamelle mit dieser über eine Steckverbindung verbunden ist, die gegen herausfallen und Verdrehen über einen Sicherungsbolzen gehalten wird, ist sie leicht demontierbar. Alle auf den Trägerelementen montierten Bauteile sind über Schrauben mit diesen verbunden und nach Abnahme des Schutzbleches gut entfernbar. Im Zuge seiner Bachelorarbeit erstellte Herr Glazer die nachfolgende vorläufige Montageanleitung. Sie soll als Grundlage für die in der Phase der Ausarbeitung zu erstellende Fertigungs- und Montageanleitung dienen und einen Überblick über die Abfolge der Schritte beim Zusammenbau bieten.

#### Hinweise zur Sicherheit

Für die Sicherheit von Personen ist es wichtig, die Anleitung zu befolgen und die Hinweise bei der fachgerechten Installation zu beachten. Durch Nichtbeachtung der Anleitung kann es bei Inbetriebnahme der Anlage sowohl zu Personenschäden als auch zu Schäden am Produkt

selbst kommen. Personen, welche sich in unmittelbarer Nähe befinden oder direkt an der Montage beteiligt sind, haben eine entsprechende Schutzausrüstung zu tragen.

- Anleitung sorgfältig vor dem Gebrauch durchlesen!
- Alle Warnhinweise lesen und beachten!
- Alle Sicherheits- und Einstellhinweise beachten!

### Zielgruppe

Die Anleitung richtet sich an einen qualifizierten Monteur und die Elektro-Fachkraft. Es werden die Kenntnisse über die richtige Handhabung und Installation der mechanischen als auch elektrischen Komponenten vorausgesetzt. Wird über eine dieser Qualifikationen nicht verfügt, ist es unumgänglich ein fachkundiges Montageunternehmen und/oder einen geprüften Elektriker zu beauftragen.

### Zulässige Tätigkeiten

Außerhalb der vorliegenden Anleitung zum Produkt und den beschriebenen Schritten der Installation dürfen keine Baulichen Änderungen ohne Rücksprache mit der TU Wien, Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik gemacht werden. Alle technischen Änderungen sind durch Auslegungsberechnungen zu belegen.

### Symbole

	<b>GEFAHR</b> Kennzeichnet eine unmittelbar bevorstehende Gefahr, die zum Tod oder schweren Verletzungen führen kann, wenn sie nicht vermieden wird.
	<b>WARNUNG</b> Kennzeichnet eine möglicherweise bevorstehende Gefahr, die zum Tod oder zu schweren Verletzungen führen kann, wenn sie nicht vermieden wird.
	<b>VORSICHT</b> Kennzeichnet eine möglicherweise bevorstehende Gefahr, die zu leichter Verletzung oder zu Sachschäden führen kann, wenn sie nicht vermieden wird.
	Anleitung lesen
	<b>HINWEIS</b> auf wichtige Informationen zum Vorgehen und Inhalt der vorliegenden Anleitung

- 

Voraussetzungen für die Installation der Beschattungsanlage LV8 IT3 ist eine Profilträgerkonstruktion, welche hinreichend fest an der Fassade des Hauses befestigt sein muss und dem Gewicht der Beschattungsanlage zuzüglich möglicher weiterer Belastungen standhalten muss. Die entsprechenden Installationsdetails der Profilträgerkonstruktion müssen von dem beauftragten Konstruktionsbüro gestellt werden.
- 

Nachdem die Profilträgerkonstruktion an der Fassade vollständig installiert und fixiert ist, kann mit der Montage der Beschattungsanlage begonnen werden.
- 

Die Bauelemente der Beschattungsanlage gliedern sich in mehrere kleinere Baugruppen, die teilweise bereits vor der endgültigen Zusammensetzung zusammengebaut werden können.



#### Installationsreihenfolge:

1. Anbringen des Führungsbleches der Beschattungsanlage an der Profilträgerkonstruktion, welche bereits am Haus befestigt ist. Die einzelnen Führungsbleche von einer Seite beginnend nacheinander ohne Abstände mit der Profilträgerkonstruktion verschrauben.
2. Anschrauben der zwei Stromschielen an der Innenseite des Führungsbleches.
3. Verankerungsbleche einsetzen und fest mit der Trägerkonstruktion verschrauben. Wichtig ist, dass jene Bleche mit den kleineren Verankerungslochabständen in der Garage verbaut werden. (Abbildung 39)

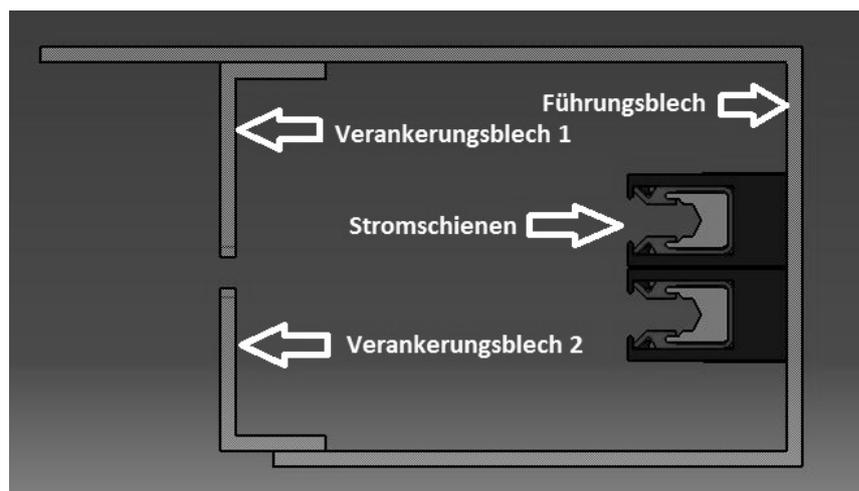


Abbildung 39: Tragkonstruktion und Verankerungsbleche

4. Zusammenbau des Transportschlittens.
5. Beide Zahnriemen in die Rollbahn des Transportschlittens einlegen und je ein freies Ende der Riemen mit dem Transportschlitten an beiden Seiten verschrauben.

6. Zusammenbau der Trägerelemente der Lamellen (U-Bleche).
7. Einsetzen der 28 Trägerelemente auf die Führungsschiene. Diese händisch bis an den entsprechenden Stellplatz in der Garage führen. In Folge den Verriegelungsbolzen vorsichtig in die eintauchende Position drücken und anschließend über der Verankerungslochposition loslassen. Das Trägerelement sollte sich jetzt nicht mehr entlang der Führungsschiene bewegen lassen.
8. Anschrauben der Kontaktplatinen auf allen Verankerungsblechen 2 (siehe Abbildung 39), die sich außerhalb der Garage befinden. Anschließend sind die Platinen mit dem elektrischen Steuerungsnetz zu verbinden.
9. Nachdem die Montageschritte 1-8 an der oberen Führung vollzogen sind, müssen dieselben Abläufe an der unteren Seite wiederholt werden.
10. Nun ist es an der Zeit die Lamellen in Position zu bringen. Als Vorbereitung müssen aber die Installationsfedern und im Anschluss die Verbindungsbolzen in die Lamellenhohlwelle eingesetzt werden. Es ist besonders darauf zu achten, dass die erste Lamelle, welche den letzten Platz in der Garage belegt, einen Verbindungsbolzen mit Sternaufsatz auf der unteren Seite bekommt und einen Verbindungsbolzen ohne Sternaufsatz an der oberen Seite. Nachdem der untere Verbindungsbolzen in das untere Trägerelement gerutscht ist, kann der obere Verbindungsbolzen mit der Hand gegen die Feder, welche in der Hohlwelle sitzt, angedrückt und zu dem oberen Trägerelement geführt werden. Beim Loslassen des Bolzens kann die Feder den Verriegelungsbolzen in das Trägerelement drücken und somit dort fixieren. Jetzt ist es noch nötig einen Sicherungssplint zwischen Hohlwelle der Lamelle und Verbindungsbolzen einzusetzen, um diese Position zu fixieren.
11. Beim Einhängen der benachbarten Lamellen ist darauf zu achten, dass es zu einem Abwechselnden einsetzen von Verbindungsbolzen mit Sternaufsatz sowohl auf der Oberseite als auch auf der Unterseite kommt. Es dürfen nie zwei Verriegelungsbolzen gleicher Bauart nebeneinander positioniert sein.
12. Nachdem alle Lamellen mit ihren Trägerelementen fest in Verbindung gebracht wurden, können nun die Stellmotoren (Bosch AHC2) auf die Verbindungsbolzen mit Sternaufsatz aufgesetzt und der Motor mit dem Trägerelement fest verschraubt werden. Im Anschluss müssen die elektrischen Verbindungen des Motors mit den Goldkontakten geschlossen werden. Eine Isolation dieser ist für einen funktionstüchtigen Gebrauch unumgänglich.  
Um die Wetterbeständigkeit der Elektromotoren zu garantieren, ist es nötig, diese mit einem Isolationspray der Firma W-Protect großzügig einzusprühen.
13. Im nächsten Schritt können die Randstücke der Tragkonstruktion mit der bisher installierten Tragkonstruktion verschraubt werden. Diese werden später die Umlenkrollen der Zahnriemen halten.
14. Einsetzen der Umlenkrollen des Zahnriemens mit deren Lagerschalen. Die Lagerschalen sind mit der Tragkonstruktion zu verschrauben. Lagerung sowie Synchronscheibe des Antriebs sind nun an der Transversalwelle anzubringen, einzusetzen und ebenso mit der Tragkonstruktion zu verschrauben.

15. Einsetzen der Ausgangshohlwelle des Synchronmotors (Oriental Motors) in eine der beiden Transversalwellen.
16. Einlegen des Zahnriemens um die Umlenkrollen und anschließend beide Enden der zwei gleichlangen Zahnriemen mit der Spannvorrichtung der Firma Breco verschrauben. Die beiden Seiten der Spannvorrichtung werden im Anschluss gegeneinander auf eine Vorspannung von 770N angezogen. Um das Durchhängen und Verdrehen des Zahnriemens über die Länge von 12m zu verhindern wird es nötig sein, diesen seitlich zu stützen. Ein genauerer Lösungsvorschlag diesbezüglich ist aber erst nach Erprobung eines Prototyps zu treffen.
17. Montage des Motors mit Flachgetriebe an dem Profilträger auf halber Höhe zwischen der oberen Führung und der unteren Führung.
18. Elektrisches Verbinden des Synchronmotors mit der Steuerungselektronik.

## 6 Prototyp

Zur Abschätzung der Notwendigkeit eines Prototyps wurde eine Fehler- Möglichkeits- und Einfluss- Analyse durchgeführt. Wie im folgenden Kapitel gezeigt, wird der Bau eines Prototyps unumgänglich sein, um bestehende Unsicherheiten zu beseitigen.

### 6.1 Fehler- Möglichkeits- und Einfluss- Analyse (FMEA)

Bei dieser Methode handelt es sich um eine formalisierte und systematische Erfassung möglicher Fehler und deren Auswirkungen. Aufgeschlüsselt nach dem Ort oder dem Merkmal des auftretenden Fehlers werden dessen Art, Auswirkung und Ursache festgehalten. Mit Hilfe einer Skala von 1 bis 10 werden nun die Wahrscheinlichkeit des Auftretens, die Auswirkungen für den Kunden sowie die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung vor Auslieferung an den Kunden bewertet. Aus der Multiplikation dieser 3 Werte ergeben sich die Risikoprioritätszahlen der einzelnen Fehler. Diese sollten um einen kritischen Zustand zu vermeiden nicht größer als 125 sein.<sup>20</sup>

Die praktische Anwendung der FMEA ist in Tabelle 28 zu finden. Ausgehend von der Baustruktur wurden alle relevanten Bauteile behandelt. Wie zu sehen ist finden sich einige Werte über 125.

---

<sup>20</sup> (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006)

	Fehler-Ort/ Merkmal	Konstruktions-FMEA							
		Glazer/Diem							
		Fehler-Art	Fehler-Auswirkung	Fehler-Ursache	derzeitiger Zustand				
Kontrollmaßnahmen	A				B	E	RPZ		
Antrieb Schlitten	Motor/Flachgetriebe/Trieber	Überhitzen des Motors	Ausfall der Anlage	Blockieren einer Lamelle / des Schlittens		1	10	10	100
	Motoraufhängung	plastische Verformung	Ausfall der Anlage	schlechte Auslegung, Materialfehler		1	10	8	80
	Aufhängung Antrieb	plastische Verformung	Ausfall der Anlage	schlechte Auslegung		2	10	8	160
	Transversalwelle	Bruch der Welle	Ausfall der Anlage	schlechte Auslegung		1	10	9	90
	Zahnriemen	Bruch des Riemens	Ausfall der Anlage	Rost, Überlast, Überalterung		1	10	9	90
	Zahnriemen	Verschleiß, Lärmbelästigung	Schleifen des Zahnriemens an der Tragkonstruktion	Durchhang des Riemens zu groß		5	9	5	225
	Spannschloss	Verbrauch, Lärmbelästigung	Lärm, Zerstörung des Schutzbleches und des Spannschlusses	Reiben an Schutzblech		2	7	9	126
	Spannschloss	Nichthalten des Zahnriemens	Ausfall der Anlage	Einspannelement zu kurz		4	10	8	320
	Synchronscheiben	Zahnbruch	Ausfall der Anlage	Fremdkörper		1	10	10	100
	Lager	Abnutzung, Ausschlagen	erhöhtes Betriebsgeräusch, Lagerspiel	Produktfehler, Feuchtigkeitseinzug		1	10	9	90
Sicherungsringe	Brechen	Lagerfixierung auf Welle nicht mehr vorhanden	Rost, Materialfehler, schlechte Auslegung		1	7	8	56	
Distanzhülsen	Ausbrechen	ungewolltes Spiel	Produktionsfehler		1	7	8	56	
Passfedern	plastische Verformung	Spiel zwischen Welle und Synchronscheibe	schlechte Auslegung		1	7	9	63	
Schlitten	Schlittengehäuse	plastische Verformung	Klemmen, Zerstörung umliegender Teile, Ausfall der Anlage	Konstruktionsfehler, Produktionsfehler, Materialfehler		4	10	9	360
	Rollen	gestörter Rundlauf	Vibrationen, Geräusche, Blockieren	Temperaturverformung, Versagen der Lager		5	6	9	270
	Klemmverbinder ZR	Nichthalten des Zahnriemens	Ausfall der Anlage	Klemmverbinder zu kurz		4	10	8	320
	Linearmotor	Steckenbleiben	vorrübergehender Stillstand	Reibung durch Windkraft zu groß		2	8	9	144
	Linearmotor	Versagen	Ausfall	Eindringen von Feuchtigkeit		4	8	9	288
	Schleifkohle	Verbrauch	kein Kontakt	Abnutzung		1	8	9	72
	Halterung Schleifkohle	Bruch	Ausfall der Anlage	Konstruktionsfehler, Produktionsfehler		1	7	9	63
	Anschlussleitung	Kabelbruch	Kontaktfehler	Montagefehler / Streifen, Knicken in Betrieb		1	8	9	72
	Trafo	Durchbrennen	Ausfall der Anlage	Feuchtigkeit / Produktionsfehler		1	8	10	80
	Trägerelement Lamellen	Motor+ Schneckengetriebe	mechanisches Versagen	Fehlstellung der Lamelle	keine dynamische Selbsthemmung		2	8	10
Verriegelungsbolzen		Verklemmen	Versagen der Verriegelung	Rost, Federbruch, falsche Auslegung		5	10	10	500
elektrischer Druckkontaktpin		Kontaktfehler	Stellmotoren werden nicht angesteuert	Verschmutzung, Klemmen der Kontaktstifte		5	7	7	245
Distanzgummi		keine Dämpfung	Geräuschentwicklung, höhere Belastung der restlichen Bauteile	Porosität durch Veralterung		4	5	10	200
Gleitlager		Blockieren	Geräusche, Stillstand einer Lamelle, Versagen des Motors	Verschleiß, Montagefehler, Passungungenauigkeit		1	7	8	56
Ublech-Konstruktion		plastische verformung	Ausfall einer Lamelle	schlechte Auslegung, Materialfehler		4	9	8	288
Passblech		plastische verformung	Ausfall einer Lamelle	schlechte Auslegung, Materialfehler		2	9	8	144
Verbindungsglied (Motor mit Lamelle)		Versagen der Klemme	Lamelle löst sich	Schrauben lockern sich, plastische Verformung, Montagefehler		1	10	8	80
Sicherungssplint		Bruch	Lamelle dreht durch	Konstruktionsfehler, Produktionsfehler		1	8	9	72
Wellenmutter		Lockern	Lamelle löst sich	Vibrationen, schlechte Auslegung		1	10	9	90
Sicherungsblech	Bruch	Lamelle löst sich	Zu hohe Kräfte, schlechte Auslegung		1	10	9	90	
Linearführung	Linearschiene + Lagerschlitten	Klemmen	stillstand der Anlage	Verkanten, Blockieren durch zu hohe Momente/Kräfte		7	9	7	441
	Tragkonstruktion	plastische Verformung	Ausfall der Anlage	Schlechte Auslegung, Spreitzung der Konstruktion		3	10	8	240
Tragkonstruktion	Schutzblech	Schwingung	Geräuschentwicklung	schlechte Auslegung		2	7	8	112
	Stromschiene, Verbinder, Einspeisung, Kompakthaler, Sicherungsklemme,	Kontaktfehler	Ausfall der Anlage	Verschmutzung, Feuchtigkeit, Montagefehler		1	10	7	70
	Stromzuführung Drehmotoren	Kabelbruch	Kontaktfehler	Montagefehler / Streifen, Knicken in Betrieb, zu viele Drehungen der Lamelle		1	8	10	80
	Kontaktstellen Drehmotoren	Kontaktfehler	kein Verdrehen an dieser Position	Verschmutzung, Feuchtigkeit, Montagefehler		5	7	10	350

Tabelle 28: FMEA

## 6.2 Ausführung

Aus den durch die FMEA gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich die unbedingt zu testenden Funktionen und Bauteile.

### **Antrieb Schlitten**

Hier sind vor allem der Zahnriemen und die zugehörige Spannvorrichtung zu testen. Neben fehlenden Erfahrungswerten bezüglich senkrecht stehender Riemen ist vor allem das Verhalten der Spannvorrichtung beim Verfahren nicht geklärt. Es ist anzunehmen, dass diese geführt werden muss, um nicht am Schutzblech zu schleifen.

### **Schlitten**

Um einen genauen und zuverlässigen Eingriff des Linearmotors in den Verriegelungsbolzen einer Lamelle gewährleisten zu können, muss die Verformung des Schlittens sowie der Gummirollen getestet werden. Bei letzteren muss auch die Geräuschentwicklung beim schnellen Verfahren des Schlittens überprüft werden. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist die Zuverlässigkeit der Linearschrittmotoren für eine Außenanwendung, da Schrittmotoren, abgesehen von den wirtschaftlichen und steuerungstechnischen Vorteilen, anfällig auf das Eindringen von Feuchtigkeit sind.

### **Trägerelement Lamelle**

Bei dieser Baugruppe ist in erster Linie der Eingriff des Bolzens mit der Verankerung zu testen. Dieser muss sehr zuverlässig erfolgen und ebenso den Kontakt für die Stromzufuhr der Verdrehmotoren ordnungsgemäß herstellen. Da die elastische Verformung der U-Blech-Konstruktion ein wichtiger Einflussfaktor auf den sicheren Eingriff des Bolzens ist, muss auch diese getestet werden.

### **Linearführung**

Aus Kostengründen wurde anstatt einer Profilschienenführung mit Kugelgelagerten Schlitten eine Lineargleitlagerführung verbaut. Diese kann die angreifenden Kräfte und Momente zwar aufnehmen, kann jedoch blockieren, da der Zylinder des Linearmotors beim Verfahren der Lamelle nicht zentrisch über dieser eingreift.

### **Tragkonstruktion**

Die Tragkonstruktion muss für das Verfahren der Lamellen eine Öffnung über ihre gesamte Länge haben. Hier liegen auch die Eingriffsstellen für die Verriegelung durch den Verriegelungsbolzen. Wird die Windlast der Lamelle über diesen auf die Tragkonstruktion übertragen, so kann es zu einer Spreizung kommen. Dies könnte zu einer Unzuverlässigkeit des Eingriffs zwischen Linearmotor und Bolzen und im schlimmsten Fall zu einer plastischen Verformung der Tragkonstruktion führen. Abgesehen von der Tragkonstruktion selbst, wird

es nötig sein, die Kontaktstellen für die Stromzufuhr der Verdrehmotoren auf ihre Zuverlässigkeit zu testen.

In Tabelle 29 ist der Vorschlag für die Mindestausführung eines Prototyps dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Ausführung mit einem Meter Verfahrensweg. Es wird nur der Aufbau unterhalb der Lamelle simuliert, da sich damit sowohl die Festlagerung als auch der Schutz gegen Regen testen lassen. Die Notwendigkeit, den Zahnriemen in seiner vollen Länge zu testen, ist zu hinterfragen. Die nötigen Werte können möglicherweise über den Hersteller Breco herausgefunden werden.

Neben der Mindestversion soll an dieser Stelle noch die Möglichkeit eines Prototyps bestehend aus Aufbau oben und unten sowie einer Welle als Verbindung angeführt werden. Dadurch wäre es möglich, die Fest- und Loslagerung zu testen. Abgesehen davon könnte die Zuverlässigkeit des symmetrischen Antriebs über die Transversalwelle getestet werden. Bei einer Verwirklichung dieser Version würde sich der Preis abgesehen von den längenabhängigen Kosten für Verbindungswelle und Transversalwelle in etwa verdoppeln.

Baugruppe / Gesamtstatus	Teil / Gesamtstatus	Beschreibung/Bezeichnung	Preis (€)	Gewicht(kg)	Pro	Anzahl pro Stockwerk	Preis Ingesamt	Gewicht Ingesamt	
Antrieb Schlitten	Schrittmotor	Nanotec Plug&Drive	100,00	1,80	Stück	1	100,00	1,80	
	div.Kabel		20,00	0,50	Meter	1	20,00	0,50	
	Aufhängung Antrieb		20,00	1,68	Stück	1	20,00	1,68	
	Blechschauben Aufhängung Antrieb	Selbstschneidend 4x6mm	0,11	0,01	Stück	4	0,44	0,04	
	Zahnriemen	AT5 B32 24m	490,08	25,20	Stück	1	490,08	25,20	
	Spannschloss ZR		50,00	1,00	Stück	1	50,00	1,00	
	Synchroneibe Antrieb		6,00	0,50	Stück	1	6,00	0,50	
	Lager Antrieb	W 6203-2Z	13,66	0,20	Stück	2	27,32	0,40	
	Drehteil Loslagerung Antrieb		5,00	0,10	Stück	1	5,00	0,10	
	Drehteil Festlagerung Antrieb		5,00	0,10	Stück	1	5,00	0,10	
	Sicherungsring Antrieb	Welle d16/Nut d15.2	0,24	0,10	Stück	2	0,48	0,20	
	Distanzhülse Antrieb		0,50	0,10	Stück	2	1,00	0,20	
	Passfeder Antrieb	DIN6885 6x6x20mm	0,45	0,20	Stück	1	0,45	0,20	
	Lager Umlenker	W 6203-2Z	13,66	0,20	Stück	6	81,96	1,20	
	Drehteil Lagerung Umlenker		5,00	0,10	Stück	6	30,00	0,60	
	Distanzhülse Umlenker		1,00	0,10	Stück	6	6,00	0,60	
	Passfeder Umlenker	DIN6885 6x6x20mm	0,45	0,20	Stück	3	1,35	0,60	
	Schlitten	Schlittengehäuse		30,00	1,97	Stück	1	30,00	1,97
		Blechschauben Gehäuse	Selbstschneidend 4x6mm	0,11	0,01	Stück	10	1,10	0,10
		Rollen		1,30	0,20	Stück	12	15,60	2,40
Blechschauben Rollen		Selbstschneidend 4x6mm	0,11	0,01	Stück	24	2,64	0,24	
Klemmverbinder ZR			30,00	0,50	Stück	2	60,00	1,00	
Sechskantschrauben		M3x10	0,03	0,01	Stück	8	0,20	0,08	
Sicherungsmutter		M3	0,01	0,01	Stück	8	0,11	0,08	
Linearmotor		Heydon 35000 Nema14	190,00	1,00	Stück	1	190,00	1,00	
Endschalter			10,00	0,10	Stück	2	20,00	0,20	
Anschlussleitung			5,00	0,20	Stück	1	5,00	0,20	
Trafo			100,00	1,00	Stück	1	100,00	1,00	
Trägerelement Lamellen		Motor+Schneckengetriebe		74,00	0,50	Stück	1	74,00	0,50
		Sechskantschrauben	M6x40	0,01	0,01	Stück	1	0,01	0,01
		Sicherungsmutter	M6	0,01	0,01	Stück	1	0,01	0,01
		Verriegelungsbolzen		5,00	0,20	Stück	1	5,00	0,20
	Sechskantschrauben	M3x8	0,01	0,01	Stück	5	0,05	0,05	
	Feder Bolzen		1,00	0,10	Stück	1	1,00	0,10	
	elektrische Druckkontakte		5,00	0,05	Stück	4	20,00	0,20	
	Distanz gummi		1,00	0,01	Stück	3	3,00	0,03	
	Gleitlager	Igus Iglidur J	3,00	0,05	Stück	1	3,00	0,05	
	Ublech-Konstruktion		20,00	0,25	Stück	1	20,00	0,25	
	Passblech		5,00	0,03	Stück	1	5,00	0,03	
	Sechskantschrauben	M3x12	0,01	0,01	Stück	3	0,04	0,03	
	Sicherungsmutter	M3	0,01	0,01	Stück	3	0,04	0,03	
	Verbindungsglied mit Sternaufsatz		10,00	0,35	Stück	1	10,00	0,35	
	Regenschutz unten		2,00	0,01	Stück	1	2,00	0,01	
	Wellenmutter		0,50	0,10	Stück	1	0,50	0,10	
	Sicherungsblech		1,00	0,10	Stück	1	1,00	0,10	
	Linearführung	Linearschiene	Igus Drylin W	24,00	2,20	Meter	1	24,00	2,20
Sechskantschrauben		M8x25	0,12	0,01	Stück	8	0,97	0,08	
Linearschlitten		Igus Drylin W	10,00	0,06	Stück	1	10,00	0,06	
Sechskantschrauben		M8x25	0,12	0,01	Stück	2	0,24	0,02	
Tragkonstruktion	Tragkonstruktion - Rechteck		3,35	10,98	Meter	0,5	1,67	5,49	
	Tragkonstruktion - L1		0,31	1,06	Meter	1	0,31	1,06	
	Tragkonstruktion - L2		0,31	1,31	Meter	1	0,31	1,31	
	Tragkonstruktion - Blech		2,06	3,14	Meter	1	2,06	3,14	
	Blechschauben	Selbstschneidend 4x6mm	0,11	0,01	Stück	20	2,20	0,20	
	Schutzblech		2,78	3,95	Meter	1	2,78	3,95	
	Gummilippe		3,00	0,10	Meter	1	3,00	0,10	
	Stromzuführung Drehmotoren		2,00	0,10	Meter	1	2,00	0,10	
	Kontaktstellen Drehmotoren		22,00	0,02	Stück	1	22,00	0,02	

Summe Einkauf Mechanik	1485,94	62,96
Fertigung und Montage (*0,4)	594,37	
Gesamtsumme	2080,31	

Tabelle 29: Stückliste und Kostenabschätzung Prototyp

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Beschattungsanlage mit senkrechten Lamellen entwickelt, die separat verfahren, gedreht und an dafür vorgesehenen Positionen verriegelt werden können. Ebenso können sie in einer Garage verstaut werden, um eine ungestörte Sicht aus dem Hausinneren zu ermöglichen.

Die Entwicklung durchlief die drei Phasen „Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung“, „Konzipieren“, und „Entwerfen“ und hat neben einer CAD-Konstruktion eine vorläufige Stückliste, eine Abschätzung der Gesamtkosten der Anlage sowie eine vorläufige Montageanleitung zum Ergebnis. Aufbauend auf diesen Daten wurde zusätzlich eine Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss- Analyse (FMEA) angefertigt, welche die Notwendigkeit eines Prototyps zeigte. Die Arbeit endet mit einem Vorschlag für den Bau eines solchen Prototyps, an dem alle in der FMEA als kritisch aufscheinenden Bauteile möglichst kostengünstig getestet werden können.

Aufgrund der vor allem geometrisch anspruchsvollen Anforderungen waren einige Iterationsschritte nötig, um zum vorliegenden Ergebnis zu gelangen. Im Laufe der Produktentwicklung wurden 8 verschiedene Lösungsvarianten entworfen und bearbeitet, von denen 3 auch in der Phase des Entwerfens noch weiter bearbeitet wurden. In einer abschließenden Bewertung wurde die Entscheidung für die weiterzuverfolgende Variante getroffen. Die vorliegende Arbeit bietet eine umfangreiche Dokumentation aller bearbeiteten Lösungsvarianten sowie ihrer Bewertungen und Ergebnisse und kann damit als Grundlage für die Weiterentwicklung der betreffenden Anlage verwendet werden.

Da dies dem Wunsch des Kunden entspricht, soll bis Jahresende 2014 ein Prototyp gebaut und getestet werden. Bei Erfolg soll die Anlage 2015 gebaut und in Betrieb genommen werden.

## 8 Literaturverzeichnis

Haberhauer, H., & Bodenstern, F. (1996). *Maschinenelemente*. Springer-Verlag.

Hoffmann, K., Krenn, E., & Stanker, G. (2005). *Fördertechnik: Bauelemente, ihre Konstruktion und Berechnung. Band 1 (Vol. 1)*. Oldenbourg Industrieverlag.

McGraw, & Hill. *Elevators, Third Generation*.

Muhs, D., Wittel, H., Jannasch, D., & Voßiek, J. (2007). *Roloff/Matek Maschinenelemente, 18. Auflage*. Vieweg.

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2006). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*.

Roth, K. (1994). *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen Band II: Kataloge*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Springer, H. (1995). *Aufgabensammlung Maschinendynamik*.

Tuttle, S. B. (1967). *Mechanisms for Engineering Design*.

Verein Deutscher Ingenieure. (1993). *VDI 2221—Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*.

Verein Deutscher Ingenieure. (1964). *VDI 2225 -- Technisch-wirtschaftliches Konstruieren*.

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Teilschritte des Konzipierens .....	6
Abbildung 2: Funktionsstruktur der Beschattungsanlage.....	9
Abbildung 3: Prinzipskizze Grundriss LV1 .....	20
Abbildung 4: Skizze Aufriss LV1 .....	20
Abbildung 5: Prinzipskizze LV2 .....	22
Abbildung 6: Prinzipskizze LV3 .....	23
Abbildung 7: Prinzipskizze LV4 .....	25
Abbildung 8: Prinzipskizze LV5 .....	27
Abbildung 9: Prinzipskizze LV6 .....	28
Abbildung 10: Skizze Grundriss LV7 .....	30
Abbildung 11: Skizze Aufriss LV7 .....	30
Abbildung 12: Skizze LV8 .....	32
Abbildung 13: Teilschritte des Entwerfens .....	36
Abbildung 14: Zuverlässigkeit und Sicherheit .....	38
Abbildung 15: Verseilung der Kopflamelle LV5 .....	41
Abbildung 16: Gleitlagerbuchse .....	41
Abbildung 17: Lamellenverbindungsseile (Führungsschiene teilweise ausgeblendet) .....	42
Abbildung 18: Lamellenverbindungsseilscheibe .....	42
Abbildung 19: Translationsseile (grün) und Rotationsseil (blau) .....	42
Abbildung 20: Seilführung (nur obere Hälfte).....	43
Abbildung 21: Verklemmung Rotationsseilscheibe .....	44
Abbildung 22: Linearaktor (zur Spannung der Lamellenverbindungsseile) .....	45
Abbildung 23: perspektivische Ansicht des Aufbaus oben LV7 .....	47
Abbildung 24: Aufriss Kupplungssystem 1 .....	47
Abbildung 25: Aufriss Kupplungssystem 2 .....	48
Abbildung 26: Ansicht oben LV8 .....	51
Abbildung 27: Ansicht unten LV8 .....	52
Abbildung 28: Schlitten LV8 .....	53
Abbildung 29: Aufhängung der Lamellen mit Motor LV8 .....	53
Abbildung 30: Innenansicht Tragkonstruktion LV8.....	54
Abbildung 31: Diagramm Technisch- wirtschaftliche Bewertung.....	57
Abbildung 32: Gesamtansicht des Aufbaus oben LV8-final .....	60
Abbildung 33: Schlitten LV8-final .....	61
Abbildung 34: Trägerelement und Verbindung mit Lamelle LV8-final .....	61
Abbildung 35: Darstellung der Verriegelung.....	62
Abbildung 36: Verriegelungsbolzen mit Feder und Kontaktpins .....	62
Abbildung 37: Regenschutz der Tragkonstruktion unten .....	63
Abbildung 38: Gesamtansicht der Anlage .....	63
Abbildung 39: Tragkonstruktion und Verankerungsbleche .....	69

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungsliste, Seite 1 .....	4
Tabelle 2: Anforderungsliste, Seite 2 .....	5
Tabelle 3: Ergebnisse Synektik .....	11
Tabelle 4: Ergebnisse Konstruktionskataloge .....	12
Tabelle 5: Literaturrecherche .....	13
Tabelle 6: Internetrecherche.....	14
Tabelle 7: detaillierter Morphologischer Kasten; Lamellen verfahren .....	15
Tabelle 8: detaillierter Morphologischer Kasten; Lamellen drehen .....	16
Tabelle 9: detaillierter Morphologischer Kasten; Lamellen verriegeln .....	17
Tabelle 10: Morphologischer Kasten; komprimiert .....	18
Tabelle 11: Wirkstruktur LV1.....	19
Tabelle 12: Wirkstruktur LV2.....	21
Tabelle 13: Wirkstruktur LV3.....	22
Tabelle 14: Wirkstruktur LV4.....	24
Tabelle 15: Wirkstruktur LV5.....	26
Tabelle 16: Wirkstruktur LV6.....	27
Tabelle 17: Wirkstruktur LV7.....	29
Tabelle 18: Wirkstruktur LV8.....	31
Tabelle 19: Auswahlliste.....	33
Tabelle 20: Wirtschaftliche Bewertung LV5 .....	46
Tabelle 21: Wirtschaftliche Bewertung LV7 .....	50
Tabelle 22: Wirtschaftliche Bewertung LV8.....	56
Tabelle 23: Technisch- wirtschaftliche Bewertung .....	58
Tabelle 24: finale wirtschaftliche Bewertung LV8, Seite 1.....	64
Tabelle 25: finale wirtschaftliche Bewertung LV8, Seite 2.....	65
Tabelle 26: Stückliste LV8, Seite 1 .....	66
Tabelle 27: Stückliste LV8, Seite 2 .....	67
Tabelle 28: FMEA.....	72
Tabelle 29: Stückliste und Kostenabschätzung Prototyp.....	75

# 11 Anhang

## 11.1 Berechnung LV5

Bachelorarbeit

WINKLER Michael 1125774

### Auslegungsrechnung LV5:

$m_{\text{Lamelle}} := 40\text{kg}$  ...Masse pro Lamelle (laut Catia-Konstruktion)

$n_{\text{Lamellenpakete}} := 4$  ...Anzahl Lamellenpakete

$n_{\text{Lamellen}} := 7$  ...Anzahl Lamellen pro Lamellenpake

$l_{\text{Fensterfläche}} := 12\text{m}$  ...Länge Fensterfläche

### Forderungen an Verfahr-(Linear-)Bewegung:

maximale Verfahrzeit insgesamt: 5 min (für 4 Lamellenpakete)

Zeit für Beschleunigung: 5 sec

$t_{\text{linear\_insgesamt}} := 5\text{min} = 300\text{s}$

$t_{\text{linear\_Lamellenpaket}} := \frac{t_{\text{linear\_insgesamt}}}{n_{\text{Lamellenpakete}}} = 75\text{s}$

...Verfahrzeit pro Lamellenpaket (wenn NICHT alle Pakete gleichzeitig verfahren werden)

$t_{\text{linear\_beschl}} := 5\text{s}$

...Beschleunigungszeit für Linearbeweg

$v_{\text{linear}} := \frac{l_{\text{Fensterfläche}}}{t_{\text{linear\_Lamellenpaket}}} = 0.16 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

...notwendige Linearbewegungsgeschwindigkeit wenn alle Lamellenpakete die gleiche Zeit benötigen

Annahme einer linearen Beschleunigungskennlinie:

$a_{\text{linear}} := \frac{v_{\text{linear}}}{t_{\text{linear\_beschl}}} = 0.032 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

### Forderungen an Dreh-(Rotations-)Bewegung:

maximale Drehzeit für 90°: 10 sec

Zeit für Beschleunigung: 1 sec

$t_{\text{rotatorisch}} := 10\text{s}$

...Drehzeit für Rotationsbewegung

$t_{\text{rotatorisch\_beschl}} := 1\text{s}$

...Beschleunigungszeit für Rotationsbewegung

Bachelorarbeit

WINKLER Michael 1125774

$$\omega_{\text{rotatorisch}} := \frac{\frac{\pi}{2}}{t_{\text{rotatorisch}}} = 0.157 \frac{1}{\text{s}}$$

$$n_{\text{rotatorisch}} := \frac{\omega_{\text{rotatorisch}}}{2 \cdot \pi} = 1.5 \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

...benötigte Drehzahl um Zeit  
einzuhaltenNotwendige Kraft zur linearen Beschleunigung einer Lamelle:

$$F_{\text{lin\_Lamelle}} := m_{\text{Lamelle}} \cdot a_{\text{linear}} = 1.28 \text{ N}$$

...notwendige Kraft zum Verschieben  
einer Lamelle (ohne Wind)

Windkraft:

$$c_{w\_Lamelle} := 1.3$$

...Annahme als Halbrohr  
(normal 1.2)

$$\rho_{\text{Luft}} := 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$A_{\text{Lamelle}} := 3.5 \text{ m} \cdot 0.38 \text{ m} = 1.33 \text{ m}^2$$

$$v_{\text{Wind}} := 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$F_{w\_Lamelle} := \frac{\rho_{\text{Luft}} \cdot c_{w\_Lamelle} \cdot A_{\text{Lamelle}} \cdot v_{\text{Wind}}^2}{2} = 414.96 \text{ N}$$

...Windkraft auf eine Lamelle

$$F_{\text{Lamelle}} := F_{\text{lin\_Lamelle}} + F_{w\_Lamelle} = 416.24 \text{ N}$$

...Gesamtkraft zur Bewegung e  
Lamelle

$$F_{\text{Lamellenpaket}} := F_{\text{Lamelle}} \cdot n_{\text{Lamellen}} = 2.914 \cdot \text{kN}$$

...Gesamtkraft zur Bewegung  
eines LamellenpaketesBemerkung:

In der Realität wird diese Kraft erheblich kleiner sein, da bei der Berechnung davon ausgegangen worden ist, dass jede Lamelle "voll" vom Wind angeströmt wird, was nicht der Fall sein wird, weil die jeweils vorhergehende Lamelle bereits einen Teil des Windes ableitet.

Berechnung der Kraftübertragung an den treibenden Seilscheiben für die Linearbewegung:

$$F_{\text{Umfang}} := F_{\text{Lamellenpaket}} = 2.914 \cdot \text{kN}$$

...Umfangskraft

Bachelorarbeit

WINKLER Michael 1125774

$$\mu_{\text{Seil}} := 0.22$$

...Rillenwerkstoff: Gummi mit Gewebe

$$\alpha := \pi$$

...Umschlingungswinkel

$$F_{\text{Umfang}} = S_2 \cdot \left( e^{\mu_{\text{Seil}} \cdot \alpha} - 1 \right)$$

$$S_2 := \frac{F_{\text{Umfang}}}{\left( e^{\mu_{\text{Seil}} \cdot \alpha} - 1 \right)} = 2.925 \cdot \text{kN}$$

...Seilkraft Leertrum

$$S_1 := F_{\text{Umfang}} + S_2 = 5.839 \cdot \text{kN}$$

...Seilkraft Lasttrum

**Anmerkung:**

**In Wirklichkeit ist für die Linearbewegung nur ein Drittel der Seilkraft notwendig, weil 3 Seile antreiben (Linearseil OBEN, Linearseil UNTEN, Rotationsseil)!**

gewähltes Seil:

Hersteller: Carl Stahl Technocables

(http://www.carlstahl-technocables.de/produkte/drahtseilmeterware.html)

Stahldrahtlitze verzinkt Konstruktion 1 x 19 - Nenndurchmesser 3mm

Mindestbruchkraft: 8370 N

Motorenauslegung:

$$P_{\text{linear}} := F_{\text{Lamellenpaket}} \cdot v_{\text{linear}} = 0.466 \cdot \text{kW}$$

...zur Translation benötigte Leistung

$$d_{\text{wirk\_Seilscheibe\_linear}} := 56 \text{mm}$$

...Wirkdurchmesser Seilscheibe

$$M_{\text{linear}} := F_{\text{Lamellenpaket}} \cdot \frac{d_{\text{wirk\_Seilscheibe\_linear}}}{2} = 81.583 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

...zur Translation benötigtes Moment

$$\omega_{\text{Seilscheibe\_linear}} := \frac{v_{\text{linear}}}{\frac{d_{\text{wirk\_Seilscheibe\_linear}}}{2}} = 5.714 \cdot \frac{1}{\text{s}}$$

$$n_{\text{Seilscheibe}} := \frac{\omega_{\text{Seilscheibe\_linear}}}{2 \cdot \pi} = 54.567 \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

...Drehzahl Seilscheibe

**Stirradgetriebemotor ZG13 TA31 V30 ER TW****Abtriebsdrehzahl: 0 - 47 1/min****Drehmoment: 95-93Nm**

Getriebe:

Fußausführung

Abtriebswelle mit Paßfeder Ø28x60

Eingangsdrehzahl:  $n_{1\text{eff}} = 1500 \text{ 1/min}$ 

Motor: Servomotor

Nennleistung 0.46kW

...verwendeter Antrieb

(sowohl für Linearbewegung als

auch für Rotation -&gt; siehe unten)

Motordrehzahl: 0 - 3000 1/min  
 Spannung/Frequenz: KEB COMBIVERT 400V  
 Drehmoment  $M_0/M_n/M_{max}$ : 1.5/1.45/4.5Nm  
 Nennstrom  $I_0/I_n/I_{max}$ : 1.10/1.06/ 3.3A  
 Resolver  
 Gewicht: ~12 kg  
 HS-Code: 85015100  
**Ausführung mit Permanentmagnetbremse:**  
**BP05, 4.5Nm, 24VDC**

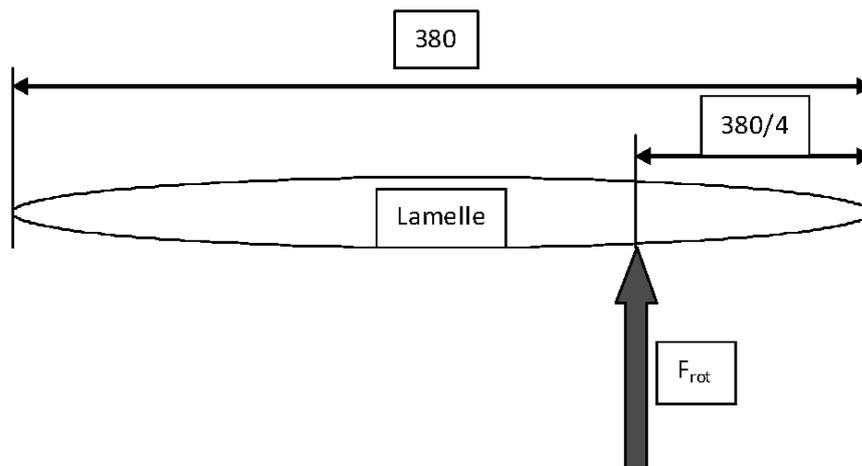
Kraft-/Momenten-/Leistungsberechnung für die Drehung eines Lamellenpaketes:

Annahme: Wind drückt nur auf eine Lamellenseite

$$F_{rot} := \frac{F_{Lamellenpaket}}{2} = 1.457 \cdot kN$$

$$M_{rot\_Lamelle} := F_{rot} \cdot 380 \frac{mm}{4} = 138.4 \cdot N \cdot m$$

...Moment das durch einseitige Windbelastung auf das gesamte Lamellenpaket hervorgerufen wird



$$d_{wirk\_Scheibe\_rot\_Lamelle} := 80mm = 80 \cdot mm$$

...Seilscheibendurchmesser auf der Lamelle

$$F_{Umfang\_rot} := \frac{M_{rot\_Lamelle}}{\frac{d_{wirk\_Scheibe\_rot\_Lamelle}}{2}} = 3.46 \cdot kN$$

$$F_{Umfang\_rot} = S_{2\_rot} \cdot \left( e^{\mu_{Seil} \cdot \alpha} - 1 \right)$$

$$S_{2\_rot} := \frac{F_{Umfang\_rot}}{\left( e^{\mu_{Seil} \cdot \alpha} - 1 \right)} = 3.474 \cdot \text{kN} \quad \dots \text{Seilkraft Leertrum}$$

$$S_{1\_rot} := F_{Umfang\_rot} + S_2 = 6.385 \cdot \text{kN} \quad \dots \text{Seilkraft Lasttrum}$$

Anmerkung:

Falls das zu wenig Sicherheit gegen die Mindestbruchsicherheit des Seiles darstellen sollte, gibt es noch die Möglichkeit, das Rotationsseil oben und auch unten auszuführen. Jedoch sei hier angemerkt, dass diese berechnete Seilkraft einen Extremfall darstellt, bei dem überprüft werden müsste, ob der überhaupt jemals erreicht wird.

$$d_{\text{wirk\_Scheibe\_rot\_Antrieb}} := 56 \text{mm} \quad \dots \text{Seilscheibendurchmesser beim Antrieb}$$

$$M_{\text{rot\_Antrieb}} := F_{Umfang\_rot} \cdot \frac{d_{\text{wirk\_Scheibe\_rot\_Antrieb}}}{2} = 96.88 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

Seilscheibenwellenrechnung:

$$d_{\text{welle}} := 25 \text{mm} \quad \dots \text{Wellendurchmesser Lamellen}$$

$$W_p := \frac{d_{\text{welle}}^3 \cdot \pi}{16} = 3.068 \cdot \text{cm}^3 \quad \dots \text{polares Widerstandsmoment Lamellenwellen}$$

$$\tau_{\text{vorh}} := \frac{M_{\text{rot\_Lamelle}}}{W_p} = 45.111 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \dots \text{resultierende Torsionsbeanspruchung in der ersten Lamellenwelle}$$

zugehörige Passfeder:

gewählt: Passfeder DIN 6885-A-8x7x12

$$b_{\text{passfeder\_an}} := 8 \text{mm}$$

$$h_{\text{passfeder\_an}} := 7 \text{mm}$$

$$t_{1\text{passfeder}} := 4 \text{mm}$$

Überprüfung des übertragbaren Drehmoments (DIN 6892 - Methode C):

$$l_{\text{tr\_passfeder}} := 12 \text{mm} \quad \text{tragende Länge}$$

$$l_{\text{tr\_passfeder}} < 1.3 \cdot d_{\text{welle}} = 1 \quad \rightarrow \text{OK}$$

Werkstoff: 18CrNiMo7-6 nach DIN EN 10 084: 1998-06

$$\sigma_{\text{S\_passfeder}} := 490 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Streckgrenze Passfeder}$$

$$\sigma_{\text{S\_Kettenrad}} := 490 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Streckgrenze Kettenrad (Werkstoff: C45)}$$

$$\sigma_{\text{S\_welle1}} := 490 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Streckgrenze Welle (Werkstoff: C45)}$$

Minimale Streckgrenze der Verbindung:

$$\sigma_{\text{S\_min\_passfeder}} := \min(\sigma_{\text{S\_passfeder}}, \sigma_{\text{S\_Kettenrad}}, \sigma_{\text{S\_welle1}}) = 490 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Zulässige Flächenpressung:

$$p_{\text{zul\_an1}} := \sigma_{\text{S\_min\_passfeder}} \cdot 0.9 = 441 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Traganteil  $\varphi$ :

$$i_{_1} := 1 \quad \varphi_{\text{an}} := 1 \quad \text{weil 1 Passfeder}$$

Zulässiges Torsionsmoment:

$$T_{\text{zul}_1} := p_{\text{zul\_an1}} \cdot (h_{\text{passfeder\_an}} - t_{1\text{passfeder}}) \cdot l_{\text{tr\_passfeder}} \cdot i_{_1} \cdot \varphi_{\text{an}} \cdot \frac{30\text{mm}}{2} = 238.14 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

zulässiges Moment

$$K_A := 1.5 \quad \dots \text{Anwendungsfaktor}$$

$$M_{\text{teq}} := K_A \cdot M_{\text{rot\_Lamelle}} = 207.6 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \quad \text{äquivalentes Moment}$$

$$M_{\text{teq}} < T_{\text{zul}_1} = 1 \quad \rightarrow \text{Passfeder OK}$$

Berechnung Trägerbalken für Lamelle auf Biegung:

$$W_b := \frac{12 \cdot 10^2}{3} \text{mm}^3 = 400 \cdot \text{mm}^3$$

...Biege­wider­stands­moment für Träger­balken  
12mm = Rest­steg der neben Bohrung für  
die Lagerung noch übrig bleibt  
10mm = Balken­höhe

$$M_b := 40 \text{kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 121 \text{mm} = 47.48 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

...resultierendes Biegemoment

$$\sigma_b := \frac{M_b}{W_b} = 118.701 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

...resultierende Biegespannung

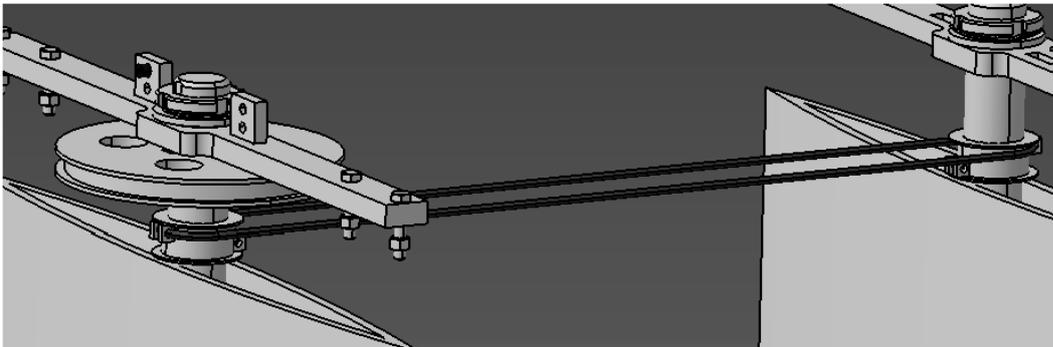
### Nachrechnen der minimal zulässigen Seilscheibendurchmesser:

Kritische Seilscheiben:

Seilscheiben, welche die Lamellen untereinander verbinden (kleinster Durchmesser)

#### Anmerkung:

Die Berechnung erfolgt nach der beschriebenen Vorgehensweise im Skript  
Förder- und Transporttechnik der TU Wien (Univ. Prof. Kartnig)



$$d_{\text{vorhanden}} := 30 \text{mm}$$

...vorhandener Seilscheibendurchmesser

$$d_{\text{Seil}} := 3 \text{mm}$$

...Seildurchmesser

Lastkollektiv:  $1E_m$  -> weil die Maximallast (hohe Windbelastung) nur sehr selten erreicht wird

$$h_1 := 11.2$$

...nicht drehungsfreie Drahtseile/Seilrolle

$$h_2 := 1$$

...weil  $w < 5$

$$D_{\text{min\_zul}} := h_1 \cdot h_2 \cdot d_{\text{Seil}} = 33.6 \cdot \text{mm}$$

...minimal zulässiger Seilscheibendurchmesser

Anmerkung:

Der Seilscheibendurchmesser ist also noch zu vergrößern. In der Konstruktion beträgt er zur Zeit noch 30mm, doch er kann ohne Probleme auf zumindest 35mm angehoben werden.

## 11.2 Berechnung LV7

### LV 7 / IT3

#### Koordinatensystem:

x Richtung = horizontal; Fahrtrichtung  
 y Richtung = horizontal; normal auf Fahrtrichtung  
 z Richtung = vertikal

#### Werte laut Anforderungsliste:

##### Geometrie der Lamelle:

$$l_l := 378.6\text{mm} \quad b_l := 46\text{mm} \quad h_l := 3.5\text{m} \quad 1.4\text{m} - (28 \cdot b_l) = 112\text{mm}$$

##### Kinematik:

Anzahl gleichzeitig zu  
 verfahrender Lamellen:

$$\text{anz}_l := 28$$

Geschwindigkeit der Lamellen:

$$v := 0.9 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Zeitverlust für abstoppen,  
 schließen des Aktors, starten:

$$t_{\text{akv}} := 2\text{s}$$

Zeit bis alle an Ihrem Ort ca.:

$$t_{v\_anz} := \frac{12\text{m}}{v} + t_{\text{akv}} \cdot \text{anz}_l = 1.733 \cdot \text{min}$$

Zeit für Beschleunigung auf v:

$$t_{\text{acc\_trans}} := 5\text{s}$$

Beschleunigung der Lamellen:

$$a := \frac{v}{t_{\text{acc\_trans}}} = 0.05 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Zeit zum schließen einer Lamelle:

$$t_d := 5\text{s}$$

Winkelgeschwindigkeit  
 Drehung:

$$\omega := \frac{\frac{\pi}{2}}{t_d} = 0.314 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad n := \frac{\omega}{2\pi} = 3 \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

Anzahl der zu drehenden Lamellen:

$$\text{anz}_{ld} := 1$$

Zeit für Drehbeschl.:

$$t_{\text{acc\_rot}} := 1\text{s}$$

Winkelbeschleunigung:

$$\alpha := \frac{\omega}{t_{\text{acc\_rot}}} = 0.314 \frac{1}{\text{s}^2}$$

Zeit bis alle zu sind:

$$t_{d\_anz} := \left( \frac{t_d}{anz_{ld}} + t_{akv} \right) \cdot 28 = 3.267 \cdot \text{min}$$

Gesamtzeit zum vollkommenen schließen:

$$t_{ges} := t_{d\_anz} + t_{v\_anz} = 5 \cdot \text{min}$$

### Werte für Lamellen nach CAD:

Masse der Lamelle ca.:  
(Aluprofil 5mm Wandstärke)

$$m_l := 40\text{kg}$$

Trägheitsmomente:

$$I_{l\_x} := 43.96\text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{l\_y} := 43.27\text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{l\_z} := 0.72\text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Moment durch Trägheit und  
Winkelbeschleunigung:

$$M_{l\_z} := I_{l\_z} \cdot \alpha = 0.226 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

### LAMELLEN VERFAHREN:

#### Synchronscheiben:

Wirkdurchmesser Synchronscheibe:

$$d_{0s\_an} := 31.83\text{mm}$$

Wirkradius Synchronscheibe:

$$r_{0s\_an} := \frac{d_{0s\_an}}{2} = 15.915 \cdot \text{mm}$$

Zähnezahl der Synchronscheibe:

$$z_{s\_an} := 20$$

Wirkdurchmesser Synchronscheibe:

$$d_{0s\_ab} := 31.83\text{mm}$$

Wirkradius Synchronscheibe:

$$r_{0s\_ab} := \frac{d_{0s\_an}}{2} = 15.915 \cdot \text{mm}$$

Zähnezahl der Synchronscheibe:

$$z_{s\_ab} := 20$$

#### gewählte Synchronscheibe für Antrieb:

Laut Breco z. min = 20  
Beco AT5

B=32 (Synchronscheibenbreite)

B.x=38 (Gesamtbreite)

z=20

d.k=30.61

d.B=36

d.v=6H7 (Vorbohrung)

d.max=18 (maximale Bohrung)

#### gewählte Synchronscheibe für Abtrieb:

Laut Breco z. min = 20

Beco AT5

B=32 (Synchronscheibenbreite)

B.x=38 (Gesamtbreite)

z=20

d.k=30.61

d.B=36

d.v=6H7 (Vorbohrung)

d.max=18 (maximale Bohrung)

**ANTRIEB**

Anzahl der Motoren für Verfahren:  $anz_{mv} := 1$

Kraft durch beschleunigung der Lamellen:  $F_a := m_l \cdot a \cdot anz_l = 56 \text{ N}$   $anz_l = 28$

Winddruck:  $p_w := 258 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$  (Wert laut Wikipedia für 20,7m/s Windgeschw.)

Einfallswinkel des Windes:  $\beta := 45^\circ$  (maximale Kraft bei  $\beta=45^\circ$ )

Kraft durch Winddruck:  $F_w := p_w \cdot [l_1 \cdot h_l \cdot \cos(\beta) + (anz_l - 1) \cdot b_l \cdot h_l \cdot \tan(\beta) \cdot \cos(\beta)] = 1.035 \cdot \text{kN}$

Kraft durch Reibung:  $F_\mu := 47 \text{ N}$

durch den Motor aufzuwendende Kraft:  $F_m := \frac{F_a + F_w + F_\mu}{anz_{mv}} = 1.138 \cdot \text{kN}$

**Getriebe Antrieb:**

Übersetzung:  $u_{an} := 4$

**Motor:**

Schrittweite Schrittmotor:  $step_m := 1.8^\circ$

Anzahl der Schritte:  $anz_{schritte\_m} := \frac{360^\circ \cdot u_{an}}{step_m} = 800$

Zähnezahl Teiler von Anzahl der Schritte:  $\frac{anz_{schritte\_m}}{z_{s\_an}} = 40$

min. Drehmoment:  $M_m := \frac{F_m \cdot r_{0s\_an}}{u_{an}} = 4.527 \text{ J}$

Winkelgeschwindigkeit:  $\omega_m := \frac{v}{r_{0s\_an}} \cdot u_{an} = 62.834 \frac{1}{\text{s}}$

Umdrehungen / Minute:  $n_m := \frac{\omega_m}{2 \cdot \pi} = 600.019 \cdot \frac{1}{\text{min}}$

Leistung des Motors:  $P_m := M_m \cdot \omega_m = 284.445 \cdot \text{W}$

**Gewählter Motor:**

Motor: EC-MotionSECM299-E6.4BE (double shaft) (I2)

Encoder...?

Leistungsteil: ?

Sicherheiten:

Maximales  
Drehmoment:

$$M_{ma} := 5.5 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$\frac{M_{ma}}{M_m} = 1.215$$

Drehzahl:  
bei 5Nm

$$n_{ma} := 600 \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

$$\frac{n_{ma}}{n_m} = 1$$

Moment im Stillstand:

$$M_{mba} := 6.9 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$\frac{M_{mba}}{M_m} = 1.524$$

$$\text{max. Kraft von Motor auf Zr: } F_{ma} := \frac{M_{mba}}{r_{0s\_an}} \cdot \frac{u_{an}}{2} = 867.107 \text{ N}$$

**Zahnriemen:**

Streckenlast:

$$q_r := 0.085 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0.834 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

zulässiger Durchhang:

$$f_r := 3 \text{ cm}$$

Trumlänge

$$L_r := 12 \text{ m}$$

Spannkraft:  
(laut Mech Skript 13.35 für Seile)

$$H_r := \frac{q_r \cdot L_r^2}{8 \cdot f_r} = 500.31 \cdot \text{N}$$

Maximale Umfangskraft:  
(Haltemoment des Motors)

$$F_{ru} := F_{ma} = 867.107 \cdot \text{N}$$

Mindestvorspannkraft:

$$F_{rv} := \frac{F_{ru}}{2} = 433.553 \text{ N} \quad \frac{H_r}{F_{rv}} = 1.154$$

Seilkraft gesamt:

$$F_r := H_r + F_{ru} = 1.367 \cdot \text{kN}$$

**gewählter Zahnriemen:**

Brecoflex AT5

Stahl-Zugträger, Meterware

b=25mm

zmin=25

dmin=60mm

Sicherheit:

Zulässige Umfangskraft:

$$F_{ra} := 2030 \text{ N}$$

$$\frac{F_{ra}}{F_r} = 1.485$$

**Lagerung Synchronwelle Abtrieb:**Statische Belastung:

Wirkradius der Synchronscheibe:

$$r_{0s\_ab} = 15.915 \cdot \text{mm}$$

Radius Zahnrades 1:

$$r_{z1} := 17.5 \text{mm}$$

halber Umschlingungswinkel Synchronscheibe Abtrieb:

$$\varphi := 10 \text{Grad}$$

Moment an der Synchronscheibe durch Motorkraft:

$$M_{sab} := F_{ma} \cdot r_{0s\_ab} = 13.8 \text{J}$$

tangente Kraft am Rad wo Aktor bzw. anderes Zahnrad eingreift:

$$F_{z1} := \frac{M_{sab}}{r_{z1}} = 788.571 \text{N}$$

Längen in z-Richtung zw. Scheiben und Lagern:

$$l_{ab1} := 30 \text{mm}$$

$$l_{ab2} := 23 \text{mm}$$

$$l_{ab3} := 10 \text{mm}$$

Belastungen Lager 1 (oben) und 2 (unten):

$$F_{kl2\_x} := \frac{F_{ma} \cdot \cos(\varphi) \cdot l_{ab1} - F_{z1} \cdot (l_{ab1} + l_{ab2})}{l_{ab1} + l_{ab2} + l_{ab3}} = -256.767 \cdot \text{N}$$

$$F_{kl2\_y} := \frac{-(F_r \cdot \sin(\varphi) \cdot 2) \cdot l_{ab1} - F_{ma} \cdot \sin(\varphi) \cdot l_{ab1}}{l_{ab1} + l_{ab2} + l_{ab3}} = -297.843 \text{N}$$

$$F_{kl1\_x} := F_{ma} \cdot \cos(\varphi) - F_{z1} - F_{kl2\_x} = 0.322 \cdot \text{kN}$$

$$F_{kl1\_y} := -F_r \cdot \sin(\varphi) \cdot 2 - F_{ma} \cdot \sin(\varphi) - F_{kl2\_y} = -327.627 \cdot \text{N}$$

$$F_{kl1} := \sqrt{F_{kl1\_x}^2 + F_{kl1\_y}^2} = 0.459 \cdot \text{kN}$$

$$F_{kl2} := \sqrt{F_{kl2\_x}^2 + F_{kl2\_y}^2} = 0.393 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Drehzahl: } \omega_{s\_ab} := \frac{v}{r_{0s\_ab}} = 15.708 \frac{1}{\text{s}} \quad n_{s\_ab} := \frac{\omega_{s\_ab}}{2 \cdot \pi} = 150.005 \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

dynamische Belastung der Lager:

$$F_{kl2\_dyn} := \frac{2 \cdot F_r \cdot \sin(\varphi) \cdot l_{ab1}}{(l_{ab1} + l_{ab2})} = 268.811 \text{N}$$

$$F_{kl1\_dyn} := -F_{kl2\_dyn} + 2 \cdot F_r \cdot \sin(\varphi) = 206.088 \cdot \text{N}$$

**Rillenkugellager 1 (oben):**

Innendurchmesser (Skf d):	$d_{kl1} := 12\text{mm}$	$r_{kl1} := \frac{d_{kl1}}{2} = 6\cdot\text{mm}$
Höhe des kugellagers (Skf B):	$B_{kl1} := 7\text{mm}$	
Stat. Tragzahl:	$C0_{kl1} := 2.16\text{kN}$	$\frac{C0_{kl1}}{F_{kl1}} = 4.701$
Dyn. Tragzahl:	$C_{kl1} := 3.64\text{kN}$	$\frac{C_{kl1}}{F_{kl1\_dyn}} = 17.662$
$n_{s\_ab} = 150.005 \cdot \frac{1}{\text{min}} > 10$		
Reibung in Lager:	$\mu_{kl1} := 0.0015$	
Reibung die Motor spürt	$F_{\mu\_kl1} := F_{kl1\_dyn} \cdot \mu_{kl1} \cdot \frac{\frac{d_{kl1}}{2}}{r_{0s\_ab}} = 0.117\text{ N}$	

**Rillenkugellager 2 (unten):**

Innendurchmesser (Skf d):	$d_{kl2} := 12\text{mm}$	$r_{kl2} := \frac{d_{kl2}}{2} = 6\cdot\text{mm}$
Höhe des kugellagers (Skf B):	$B_{kl2} := 7\text{mm}$	
Stat. Tragzahl:	$C0_{kl2} := 2.16\text{kN}$	$\frac{C0_{kl2}}{F_{kl2}} = 5.493$
Dyn. Tragzahl:	$C_{kl2} := 3.64\text{kN}$	$\frac{C_{kl2}}{F_{kl2\_dyn}} = 13.541$
$n_{s\_ab} = 150.005 \cdot \frac{1}{\text{min}} > 10$		
Reibung in Lager:	$\mu_{kl2} := 0.0015$	
Reibung die Motor spürt	$F_{\mu\_kl2} := F_{kl2\_dyn} \cdot \mu_{kl2} \cdot \frac{\frac{d_{kl2}}{2}}{r_{0s\_ab}} = 0.152\text{ N}$	

**Synchronwelle:**

$$l_{ab1} = 30 \cdot \text{mm} \quad l_{ab2} = 23 \cdot \text{mm} \quad l_{ab3} = 10 \cdot \text{mm}$$

$$z1 := 30 \text{mm} \quad z2 := 23 \text{mm} \quad z3 := 10 \text{mm}$$

Biegemomente in x-Richtung

$$M_{W\_ab1x} := F_{kl1\_y} \cdot z1 = -9.829 \text{ J}$$

$$M_{W\_ab2x} := F_{kl1\_y} \cdot z2 + (F_r \cdot \sin(\varphi) \cdot 2) \cdot (z2 - l_{ab1}) + F_m \cdot \sin(\varphi) \cdot (z2 - l_{ab1}) = -12.243 \text{ J}$$

$$M_{W\_ab3x} := F_{kl1\_y} \cdot z3 + (F_r \cdot \sin(\varphi) \cdot 2) \cdot (z3 - l_{ab1}) + F_m \cdot \sin(\varphi) \cdot (z3 - l_{ab1}) \dots = -3.918 \text{ J} \\ + F_{kl2\_y} \cdot (z3 - l_{ab1} - l_{ab2})$$

Biegemomente in y-Richtung

$$M_{W\_ab1y} := -F_{kl1\_x} \cdot z1 = -9.664 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_{W\_ab2y} := -F_{kl1\_x} \cdot z2 - F_m \cdot \cos(\varphi) \cdot (z2 - l_{ab1}) = 0.435 \text{ J}$$

$$M_{W\_ab3y} := -F_{kl1\_x} \cdot z3 - F_m \cdot \cos(\varphi) \cdot (z3 - l_{ab1}) - F_{kl2\_x} \cdot (z3 - l_{ab1} - l_{ab2}) = 8.148 \text{ J}$$

$$M_{w\_ab1} := \sqrt{M_{W\_ab1x}^2 + M_{W\_ab1y}^2} = 13.784 \text{ J}$$

$$M_{w\_ab2} := \sqrt{M_{W\_ab2x}^2 + M_{W\_ab2y}^2} = 12.25 \text{ J}$$

$$M_{w\_ab3} := \sqrt{M_{W\_ab3x}^2 + M_{W\_ab3y}^2} = 9.041 \text{ J}$$

$$M_{w\_ab\_max} := \max(|M_{w\_ab1}|, |M_{w\_ab2}|, |M_{w\_ab3}|) = 13.784 \text{ J}$$

Länge der Welle:

$$l_{w\_ab} := l_{ab1} + l_{ab2} + l_{ab3} = 63 \cdot \text{mm}$$

Torsionswiderstandsmoment der Welle:

$$W_{W\_ab\_t} := \frac{d_{kl2}^3 \cdot \pi}{16} = 339.292 \cdot \text{mm}^3$$

Moment durch Motorkraft gegen Fixierung:

$$M_{W\_ab} := M_{sab} = 13.8 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

maximale Torsionsspannung

$$\tau_{w\_ab} := \frac{M_{W\_ab}}{W_{W\_ab\_t}} = 40.673 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Biege­wider­standsmoment der Welle:

$$W_{W\_ab\_b} := \frac{d_{kl2}^3 \cdot \pi}{32} = 169.646 \cdot \text{mm}^3$$

maximale Biegespannung :

$$\sigma_{w\_b} := \frac{|M_{w\_ab\_max}|}{W_{W\_ab\_b}} = 81.251 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

**Umlenkrollen:****gewählte Umlenkrollen für Abtrieb:**

Laut Breco D.min = 50mm (AT5 E-Zugträger)

Der kleinere Durchmesser ist aufgrund des geringen Umschlingungswinkels vertretbar.

$$\text{Wirkdurchmesser: } d_{0u} := 21\text{mm} \quad r_{0u} := \frac{d_{0u}}{2} = 10.5\text{mm}$$

$$\text{Innendurchmesser Lager: } d_u := 9\text{mm}$$

$$\text{Umschlingungswinkel: } \varphi_u := 10\text{Grad}$$

**dynamische Belastung = statische Belastung:**

Lager 3 (oben) und 4 (unten):

$$\text{Kraft unten: } F_{kl4} := \frac{2 \cdot F_r \cdot \sin(\varphi_u) \cdot l_{ab1}}{(l_{ab1} + l_{ab2})} = 268.811\text{ N}$$

$$\text{Kraft oben: } F_{kl3} := -F_{kl4} + 2 \cdot F_r \cdot \sin(\varphi_u) = 206.088 \cdot \text{N}$$

$$\text{Größtes Biegemoment der Welle: } M_{w_u} := F_{kl3} \cdot l_{ab1} = 6.183\text{ J}$$

$$\text{Biege widerstandsmoment der Welle: } W_{w_u_b} := \frac{d_u^3 \cdot \pi}{32} = 71.569 \cdot \text{mm}^3$$

$$\text{Maximale Biegespannung: } \sigma_{w_u_b} := \frac{|M_{w_u}|}{W_{w_u_b}} = 86.387 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

**Rillenkugellager 3 (oben):**

$$\text{Innendurchmesser (Skf d): } d_{kl3} := 9\text{mm} \quad r_{kl3} := \frac{d_{kl3}}{2} = 4.5\text{mm}$$

$$\text{Höhe des kugellagers (Skf B): } B_{kl3} := 5\text{mm}$$

$$\text{Stat. Tragzahl: } C_{0kl3} := 0.62\text{kN} \quad \frac{C_{0kl3}}{F_{kl3}} = 3.008$$

$$\text{Dyn. Tragzahl: } C_{kl3} := 1.19\text{kN} \quad \frac{C_{kl3}}{F_{kl3}} = 5.774$$

irrelevant weil  $n < 10$ 

$$\text{Reibung in Lager: } \mu_{kl3} := 0.0015$$

$$\text{Reibung die Motor spürt } F_{\mu_{kl3}} := F_{kl3} \cdot \mu_{kl3} \cdot \frac{d_{kl3}}{r_{0u}} = 0.132\text{ N}$$

**Rillenkugellager 4 (unten):**

Innendurchmesser (Skf d):	$d_{kl4} := 9\text{mm}$	$r_{kl4} := \frac{d_{kl4}}{2} = 4.5\cdot\text{mm}$
Höhe des Kugellagers (Skf B):	$B_{kl4} := 5\text{mm}$	
Stat. Tragzahl:	$C_{0_{kl4}} := 0.62\text{kN}$	$\frac{C_{0_{kl4}}}{F_{kl4}} = 2.306$
Dyn. Tragzahl: irrelevant weil $n < 10$	$C_{kl4} := 1.19\text{kN}$	$\frac{C_{kl4}}{F_{kl4}} = 4.427$
Reibung in Lager:	$\mu_{kl4} := 0.0015$	
Reibung die Motor spürt	$F_{\mu_{kl4}} := F_{kl4} \cdot \mu_{kl4} \cdot \frac{\frac{d_{kl2}}{2}}{r_{0s\_ab}} = 0.152\text{N}$	

**Linearaktor:****Gewählter Linearaktor**

Kraft beim Ausfahren gegen Feder und Haftreibung:		ITS-LX 2218
Kraft durch Winddruck auf erste Lamelle: - maximale tangentielle Kraft am Wirkdurchmesser des Zahnrades	$F_{Z1} = 788.571\text{N}$	Rahmenmagnet bistabil eingefahren 20N ausgefahren 5N
Reibungskoeffizient: (Stahl auf Stahl)	$\mu_H := 0.08$	
Durch Aktor aufzubringende Kraft:	$F_{fa} := F_{Z1} \cdot \mu_H = 63.086\text{N}$	

Der Aktor kann durch den Schrittmotor unterstützt werden, indem dieser einen Schritt fährt um Zahnrad zu entlasten.

Weg den ein Schritt des Motors am Aktorrad verursacht:	$\frac{2 \cdot r_{z1} \cdot 360\text{Grad}}{\left(\frac{r_{0s\_ab} \cdot \text{anzschritte}_m}{r_{0s\_an}}\right)} = 0.275 \cdot \text{mm}$
Winddruck bei Sturm geschätzt: (200km/h)	$p_{ws} := 500 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$
maximale Scherkraft auf Aktor:	$F_{ak\_scher} := \frac{p_{ws} \cdot l \cdot h_l}{2} = 331.275 \cdot \text{N}$
Durchmesser der Aktorwelle:	$d_{ak} := 12\text{mm}$
Scherspannung auf Aktorwelle:	$\tau_{scher} := \frac{F_{ak\_scher}}{\left(\frac{d_{ak}^2 \cdot \pi}{4}\right)} = 2.929 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

**LAMELLEN DREHEN:**Anzahl der Motoren für Drehen:  $anz_{md} := 1$ Anzahl der zu drehenden Lamellen:  $anz_{ld} = 1$ Getriebe Abtrieb:  $u_{abd} := 4$ **Zahnräder für Abtrieb:**Wirkradius Zahnrad 2 (oben):  $r_{z2} := 35\text{mm}$ Wirkradius Zahnrad 3 (unten):  $r_{z3} := 35\text{mm}$ **Synchrone Scheibe für Antrieb:**Wirkdurchmesser Synchronrad:  $d_{0s\_and} := 31.83\text{mm}$ Wirkradius Synkronrad:  $r_{0s\_and} := \frac{d_{0s\_and}}{2} = 15.915\text{mm}$ Zähnezahl Synchronrad:  $z_{s\_and} := 20$ Kraft auf Zahnrad 2 durch beschl. d. Lamellen:  $F_{ad} := \frac{M_{l\_z} \cdot anz_{ld}}{r_{z2}} = 6.463\text{ N}$ Einfallswinkel des Windes:  $\phi := 24^\circ$ Kraft durch Winddruck auf Lamellen:  $F_l := \rho_w \cdot \frac{l_l}{2} \cdot h_l \cdot anz_{ld} = 170.938\text{ N}$ Kraft durch Winddruck auf Zugmittel:  $F_{wd} := \frac{F_l \cdot \frac{l_l}{4}}{r_{z2}} \cdot \frac{r_{z1}}{r_{0s\_ab}} = 508.303 \cdot \text{N}$ Kraft durch Reibung:  $F_{\mu d} := 128\text{N}$ durch den Motor aufzuwendende Kraft:  $F_{md} := \frac{F_{ad} + F_{wd} + F_{\mu d}}{anz_{md}} = 642.765 \cdot \text{N}$ **Getriebe:** $u_{kd} := \frac{r_{z2}}{r_{z1}} = 2$

**Motor:**

Schrittweite Schrittmotor:	$\text{step}_{\text{md}} := 1.8^\circ$	
Zähnezahl Teiler von Anzahl der Schritte:	$\frac{\text{anz}_{\text{schritte\_m}}}{z_{\text{s\_and}}} = 40$	
min. Drehmoment:	$M_{\text{md}} := \frac{F_{\text{md}} \cdot r_{0\text{s\_and}}}{u_{\text{kd}}} = 5.115 \text{ J}$	
Winkelgeschwindigkeit:	$\omega_{\text{d}} := \omega \cdot u_{\text{kd}} \cdot u_{\text{abd}} = 2.513 \frac{1}{\text{s}}$	$n_{\text{d}} := \frac{\omega_{\text{d}}}{2\pi} = 24 \cdot \frac{1}{\text{min}}$
Leistung des Motors:	$P_{\text{md}} := M_{\text{md}} \cdot \omega_{\text{d}} = 12.855 \text{ W}$	$n = 3 \cdot \frac{1}{\text{min}}$

**Gewählter Motor:**

Motor: EC-MotionSECM268-E2.3B  
 Encoder...?  
 Leistungsteil: ECMD288.000

Sicherheiten:

Maximales Drehmoment:	$M_{\text{mda}} := 5.5 \text{ N} \cdot \text{m}$	$\frac{M_{\text{mda}}}{M_{\text{md}}} = 1.075$
Drehzahl: bei 5Nm	$n_{\text{mda}} := 600 \cdot \frac{1}{\text{min}}$	$\frac{n_{\text{mda}}}{n_{\text{d}}} = 25$
Moment im Stillstand:	$M_{\text{mdba}} := 6.9 \text{ N} \cdot \text{m}$	$\frac{M_{\text{mdba}}}{M_{\text{md}}} = 1.349$

Es kann also der für das Verfahren verwendete Motor auch für das Verdrehen verwendet werden

**Lagerung für Drehwelle:**

Wirkradius Zahnrad 2 (gelagert)

$$r_{z2} = 35 \cdot \text{mm}$$

Wirkradius Zahnrad 3 (Fix auf Welle)

$$r_{z3} = 35 \cdot \text{mm}$$

$$F_{z2} := F_{ma} \cdot \frac{r_{0s\_ab}}{r_{z1}} = 0.789 \cdot \text{kN}$$

$$F_{z3} := F_{z2} \cdot \frac{r_{z2}}{r_{z3}} = 0.789 \cdot \text{kN}$$

Längen in z-Richtung zw. Scheiben und Lagern:

$$l_{abd1} := 15 \text{mm} \quad l_{abd2} := 12 \text{mm} \quad l_{abd3} := 15 \text{mm} \quad l_{abd4} := 12 \text{mm}$$

stat. Belastung Szenario1: Wenn Lamelle parallel zu y-Achse:

$$F_{gl2d\_x1} := \frac{F_{z2} \cdot (l_{abd1} + l_{abd2}) - F_{z3} \cdot (l_{abd1} + l_{abd2} + l_{abd3})}{l_{abd1} + l_{abd2} + l_{abd3} + l_{abd4}} = -219.048 \cdot \text{N}$$

$$F_{gl1d\_x1} := F_{z2} - F_{z3} - F_{gl2d\_x1} = 219.048 \cdot \text{N}$$

stat. Belastung Szenario2: Wenn Lamelle Parallel zu x-Achse (geschlossen):

$$F_{gl2d\_x2} := \frac{F_{z2} \cdot l_{abd1} - F_{z3} \cdot (l_{abd1} + l_{abd2} + l_{abd3})}{l_{abd1} + l_{abd2} + l_{abd3} + l_{abd4}} = -0.394 \cdot \text{kN}$$

$$F_{gl1d\_x2} := F_{z2} - F_{z3} - F_{gl2d\_x2} = 394.286 \cdot \text{N}$$

$$F_{gl2d\_y2} := \frac{F_{z2} \cdot (l_{abd1} + l_{abd2})}{l_{abd1} + l_{abd2} + l_{abd3} + l_{abd4}} = 394.286 \cdot \text{N}$$

$$F_{gl1d\_y2} := F_{z2} - F_{gl2d\_y2} = 394.286 \cdot \text{N}$$

$$F_{gl1d2} := \sqrt{F_{gl1d\_x2}^2 + F_{gl1d\_y2}^2} = 0.558 \cdot \text{kN}$$

$$F_{gl2d2} := \sqrt{F_{gl2d\_x2}^2 + F_{gl2d\_y2}^2} = 0.558 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Drehzahl:} \quad \omega_{s\_abd} := \omega = 0.314 \frac{1}{\text{s}} \quad n_{s\_abd} := \frac{\omega_{s\_abd}}{2 \cdot \pi} = 3 \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

dynamische Belastung:

$$F_{gl2d\_dyn} := \frac{F_{z2} \cdot l_{abd1}}{l_{abd1} + l_{abd2} + l_{abd3}} = 281.633 \cdot \text{N}$$

$$F_{gl1d\_dyn} := F_{z2} - F_{gl2d\_dyn} = 0.507 \cdot \text{kN}$$

**Gleitlager 1 (oben):**Innendurchmesser (Igu<sub>s</sub> d1):

$$d_{1\_gl1} := 15\text{mm} \quad r_{1\_gl1} := \frac{d_{1\_gl1}}{2} = 7.5\cdot\text{mm}$$

Höhe des Gleitlagers (Igu<sub>s</sub> b1):

$$b_{1\_gl1} := 4\text{mm}$$

Geschwindigkeit der Welle im Lager:

$$v_{gl1} := \omega_d \cdot r_{1\_gl1} = 0.019 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Fläche eines Halbzylinders:

$$A_{gl1} := d_{1\_gl1} \cdot b_{1\_gl1} = 60 \cdot \text{mm}^2$$

Flächenpressung statisch:

$$p_{gl1} := \frac{F_{gl1d2}}{A_{gl1}} = 9.293 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Flächenpressung dynamisch:

$$p_{gl1\_dyn} := \frac{|F_{gl1d\_dyn}|}{A_{gl1}} = 8.449 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Reibung in Lager:

$$\mu_{gl1} := 0.2$$

Reibung die Motor spürt

$$F_{\mu\_gl1} := F_{gl1d\_dyn} \cdot \mu_{gl1} \cdot \frac{\frac{d_{1\_gl1}}{2}}{r_{z2} \cdot u_{abd}} \cdot \frac{r_{z1}}{r_{0s\_ab}} = 5.97$$

**Gleitlager 2 (unten):**Innendurchmesser (Igu<sub>s</sub> d1):

$$d_{1\_gl2} := 18\text{mm} \quad r_{1\_gl2} := \frac{d_{1\_gl2}}{2} = 9\cdot\text{mm}$$

Höhe des Gleitlagers (Igu<sub>s</sub> b1):

$$b_{1\_gl2} := 4\text{mm}$$

Geschwindigkeit der Welle im Lager:

$$v_{gl2} := \omega_d \cdot r_{1\_gl2} = 0.023 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Fläche eines Halbzylinders:

$$A_{gl2} := d_{1\_gl2} \cdot b_{1\_gl2} = 72 \cdot \text{mm}^2$$

Flächenpressung  
statisch:

$$p_{gl2} := \frac{F_{gl2d2}}{A_{gl2}} = 7.745 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Flächenpressung dynamisch:

$$p_{gl2\_dyn} := \frac{|F_{gl2d\_dyn}|}{A_{gl2}} = 3.912 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Reibung in Lager:

$$\mu_{gl2} := 0.2$$

Reibung die Motor spürt:

$$F_{\mu\_gl2} := F_{gl2d\_dyn} \cdot \mu_{gl2} \cdot \frac{\frac{d_{1\_gl1}}{2}}{r_{z2} \cdot u_{abd}} \cdot \frac{r_{z1}}{r_{0s\_ab}} = 3.31$$

Außenradius des Bundes:

$$d_{3\_gl1} := 23\text{mm}$$

Fläche des Bundes:

$$A_{bund} := \frac{d_{3\_gl1}^2 \cdot \pi}{4} - \frac{d_{1\_gl1}^2 \cdot \pi}{4} = 238.761 \cdot \text{mm}^2$$

Flächenpressung am Bund:

$$p_{gl1\_bund} := \frac{m_1 \cdot g}{A_{bund}} = 1.643 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

**Welle Abtrieb Drehung:**

$$l_{abd1} = 15 \cdot \text{mm} \quad l_{abd2} = 12 \cdot \text{mm} \quad l_{abd3} = 15 \cdot \text{mm} \quad l_{abd4} = 12 \cdot \text{mm}$$

$$z1d := 15 \text{mm} \quad z2d := 27 \text{mm} \quad z3d := 42 \text{mm} \quad z4d := 42 \text{mm}$$

Berechnung für Szenario 2:

Biegemomente in x\_Richtung

$$M_{W\_abd1x} := -F_{gl1d\_y2} \cdot z1d = -5.914 \text{ J}$$

$$M_{W\_abd2x} := -F_{gl1d\_y2} \cdot z2d = -10.646 \text{ J}$$

$$M_{W\_abd3x} := -F_{gl1d\_y2} \cdot z4d + F_{z2} \cdot (z4d - l_{abd1} - l_{abd2}) = -4.731 \text{ J}$$

Biegemomente in y-Richtung

$$M_{W\_abd1y} := F_{gl1d\_x2} \cdot z1d = 5.914 \text{ J}$$

$$M_{W\_abd2y} := F_{gl1d\_x2} \cdot z3d - F_{z2} \cdot (z3d - l_{abd1}) = -4.731 \text{ J}$$

$$M_{W\_abd3y} := F_{gl1d\_x2} \cdot z4d - F_{z2} \cdot (z4d - l_{abd1}) \dots = -4.731 \text{ J}$$

$$+ F_{z3} \cdot (z4d - l_{abd1} - l_{abd2} - l_{abd3})$$

$$M_{w\_abd1} := \sqrt{M_{W\_abd1x}^2 + M_{W\_abd1y}^2} = 8.364 \text{ J}$$

$$M_{w\_abd2} := \sqrt{M_{W\_abd2x}^2 + M_{W\_abd2y}^2} = 11.65 \text{ J}$$

$$M_{w\_abd3} := \sqrt{M_{W\_abd3x}^2 + M_{W\_abd3y}^2} = 6.691 \text{ J}$$

$$M_{W\_abd\_max} := \max(|M_{w\_ab1}|, |M_{w\_ab2}|, |M_{w\_ab3}|) = 13.784 \text{ J}$$

Länge der Welle der Lamelle:

$$l_{w\_abd} := l_{abd1} + l_{abd2} + l_{abd3} = 42 \cdot \text{mm}$$

Torsionswiderstandsmoment der Welle:

$$W_{W\_abd\_t} := \frac{d_1 \cdot gl_2^3 \cdot \pi}{16} = 1.145 \times 10^3 \cdot \text{mm}^3$$

Moment durch Motorkraft gegen Fixierung:

$$M_{W\_abd} := F_{z3} \cdot r_{z3} = 27.6 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

maximale Torsionsspannung

$$\tau_{w\_abd} := \frac{M_{W\_abd}}{W_{W\_abd\_t}} = 24.102 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Biege­wider­standsmoment der Welle:

$$W_{W\_abd\_b} := \frac{d_1 \cdot gl_2^3 \cdot \pi}{32} = 572.555 \cdot \text{mm}^3$$

maximale Biegespannung durch  
Winddruck bei steifer Lamelle:

$$\sigma_{w\_abd\_b} := \frac{|M_{W\_abd\_max}|}{W_{W\_abd\_b}} = 24.074 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

**mitdrehender Linearaktor (1):**

Reibungskoeffizient:  
(Stahl auf Stahl)

$$\mu_{Hd1} := 0.08$$

Durch Aktor aufzubringende Kraft  
gegen Motor:

$$F_{akd1\_rm} := F_{z2} \cdot \mu_{Hd1} = 63.086 \text{ N}$$

gegen Wind:

$$F_{akd1\_rw} := \frac{F_l \cdot \frac{l_l}{4}}{r_{z2} \cdot anz_{ld}} \cdot \mu_{Hd1} = 36.981 \text{ N}$$

Weg den ein Schritt des Motors  
am Aktorrad verursacht:

$$\frac{2 \cdot r_{z1} \cdot 360 \text{ Grad}}{\left( \frac{r_{0s\_ab} \cdot anz_{schritte\_m}}{r_{0s\_an}} \right)} = 0.275 \cdot \text{mm}$$

Durchmesser der Aktorwelle:

$$d_{akd1} := 12 \text{ mm}$$

Scherkraft auf Aktorwelle bei Sturm:

$$F_{akd\_scher} := \frac{p_{ws} \cdot \frac{l_l}{2} \cdot h_l \cdot \frac{l_l}{4}}{r_{z2}} = 895.862 \text{ N}$$

Scherspannung auf Aktorwelle:

$$\tau_{scherd1} := \frac{F_{akd\_scher}}{\left( \frac{d_{akd1}^2 \cdot \pi}{4} \right)} = 7.921 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Abmaße des Rechteckes am Ende der  
Aktorwelle, das in Zahnrad eingreift:

$$h_{wak1d} := 10 \text{ mm} \quad b_{wak1d} := 3 \text{ mm}$$

Abstand zw. Eingriffspunkt und Führung:

$$l_{wak1d\_e} := 3 \text{ mm}$$

Biegebewiderstandsmoment:

$$W_{wak1d\_b} := \frac{h_{wak1d} \cdot b_{wak1d}^2}{6} = 15 \cdot \text{mm}^3$$

Maximale Biegespannung:

$$\sigma_{wakd1\_b} := \frac{F_{akd1\_rm} \cdot l_{wak1d\_e}}{W_{wak1d\_b}} = 12.617 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Längster Duty cycle:

$$v = 0.25 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \frac{28 \cdot b_l + 20 \text{ mm}}{v} = 5.232 \text{ s}$$

**Gewählter Linearaktor:**

ITS-LX 2218  
Rahmenmagnet  
bistabil  
eingefahren 20N  
ausgefahren 5N

**stehender Linearaktor (2):**

Kraft beim einfahren:

Kraft durch Winddruck auf erste Lamelle:  
(maximale tangentielle Kraft auf Arm)

Reibungskoeffizient:  
(stahl auf Stahl)

Durch Aktor aufzubringende Kraft:

Kraft zu groß: Lösung ist eine genaue Steuerung des Motors und ein leichtes Spiel so dass keine Reibung entsteht bzw.  $F_{akd2\_t}$  zum Teil aufgehoben wird.

Weg den ein Schritt des Motors am Aktorrad verursacht:

Winddruck bei Sturm geschätzt (200km/h)

maximale Scherkraft auf Aktor:

Durchmesser der Aktorwelle:

Scherspannung auf Aktorwelle:

Abmaße des Rechteckes am Ende der Aktorwelle, das in Zahnrad eingreift:

Abstand zw. Eingriffspunkt und Führung:

Biegebewiderstandsmoment:

Maximale Biegespannung:

Längster Duty cycle:  
(Zeit für 90°-Drehung)

$$F_{akd2\_t} := F_{wd} \cdot \frac{r_{0s\_ab}}{r_{z1}} = 462.265 \text{ N}$$

$$\mu_{Hd2} := 0.08$$

$$F_{akd2\_r} := (F_{akd2\_t} \cdot \mu_{Hd2}) = 36.981 \text{ N}$$

$$F_{akd2\_r\_gew} := 4 \text{ N}$$

$$\frac{2 \cdot r_{z1} \cdot 360 \text{ Grad}}{\left( \frac{r_{0s\_ab} \cdot \text{anzschritte\_m}}{r_{0s\_an}} \right)} = 274.889 \cdot \mu\text{m}$$

$$p_{ws} = 500 \text{ Pa}$$

$$F_{akd2\_scher} := p_{ws} \cdot \frac{l_1}{2} \cdot h_1 \cdot \frac{l_1}{r_{z3}} = 895.862 \cdot \text{N}$$

$$d_{akd2} := 12 \text{ mm}$$

$$\tau_{akd2} := \frac{F_{akd2\_scher}}{\left( \frac{d_{akd2}^2 \cdot \pi}{4} \right)} = 7.921 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$h_{wak2d} := 10 \text{ mm} \quad b_{wak2d} := 3 \text{ mm}$$

$$l_{wak2d\_e} := 3 \text{ mm}$$

$$W_{wak2d\_b} := \frac{h_{wak2d} \cdot b_{wak2d}^2}{6} = 15 \cdot \text{mm}^3$$

$$\sigma_{wak2d\_b} := \frac{F_{akd2\_t} \cdot l_{wak2d\_e}}{W_{wak2d\_b}} = 92.453 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$t_d = 5 \text{ s}$$

**Gewählter Linearaktor:**

ITS-LX 2218  
Rahmenmagnet  
bistabil  
eingefahren 20N  
ausgefahren 5N

**Lagerung der Lamelle:**

Berechnung für den Fall, dass die Antriebswelle bricht oder ein Zahnriemen bricht. In diesem Fall würde die Kraft in x-Richtung schlussendlich durch das Lager in z-Richtung aufgenommen werden:

Von Lagern max. zugelassener Kippwinkel:  $\gamma := 3^\circ$   
(Pendelkugellager lässt 2-3° zu)

damit nötiges Spiel im Lager:  $\frac{h_l}{\cos(\gamma)} - h_l = 4.803 \cdot \text{mm}$

sich ergebende Auslenkung:  $\tan(\gamma) \cdot h_l = 183.427 \cdot \text{mm}$

Normalbelastung in z-Richtung:  $F_{l\_z\text{norm}} := m_l \cdot g = 392.266 \text{ N}$

Maximale Kraft in z-Richtung:  
(Gewichtskraft + einseitig ausfallende Motoren)  $F_{l\_z} := \frac{F_{ma}}{\sin(\gamma)} + m_l \cdot g = 16.96 \cdot \text{kN}$

Dieser Fall hat aufgrund der verwendeten Transversalwelle eine extrem geringe Eintrittswahrscheinlichkeit. Daher sollte nur darauf geachtet werden, dass sich die Lamelle nicht lösen kann. Die Lagerung muss nach dem Eintritt dieses Falles nicht mehr funktionstüchtig sein.

maximale Kraft auf Lager:  
(Anfahren + Wind)  $F_{l\_x} := \frac{m_l \cdot a + p_w \cdot (l_l \cdot h_l \cdot \cos(\beta))}{2} = 121.871 \text{ N}$

Winddruck bei Sturm geschätzt (200km/h)  $p_{ws} = 500 \text{ Pa}$

Max. stat. Nennbelastung in y-Richtung:  $F_{l\_sy} := p_{ws} \cdot l_l \cdot h_l = 662.55 \cdot \text{N}$

maximale Kraft y-Richtung  
(Winddruck geschlossen)  $F_{l\_y} := F_{l\_sy} = 662.55 \text{ N}$

**gewähltes Lager:**

Sphärisches Axiallager Igus SAM-08

d 12.5mm (d.wl)

D 30mm

H 8mm

OO kurz 8kN

OO lang 4kN

Reibung in Lager:  $\mu_l := 0.1$

Wirkradius Lager:  $r_{0l} := \frac{(30\text{mm} - 12.5\text{mm})}{2} = 8.75 \cdot \text{mm}$

Reibung die Motor spürt  $F_{\mu\_l} := F_{l\_z\text{norm}} \cdot \mu_l \cdot \frac{r_{0s\_ab}}{r_{0l}} = 71.348 \text{ N}$

**Linearlager:**

Dyn. Nennbelastung in z-Richtung:	$F_{ld} := m_l \cdot g = 392.266 \text{ N}$
Stat. Kippmoment:	$F_{l_x} \cdot \frac{30\text{mm}}{2} = 1.828 \text{ J}$
Stat. Giernoment:	vernachlässigbar weil durch Gelenklager ausgeglic
Stat. Rollmoment:	$\frac{F_{l_y}}{2} \cdot 20\text{mm} = 6.626 \text{ J}$

**gewähltes Linearlager:**

Thompson TSR15ZMUU	
Dyn. Nennbelastung in z-Richtung:	3.5kN
Max. Stat. Nennbelastung in z-Richtung:	6.57kN
Stat. Kippmoment:	16.5Nm
Stat. Giernoment:	17.9Nm
Stat. Rollmoment:	30.2Nm

**Gesamtreibung die Motoren überwinden müssen:**

$$F_{\mu\_verf} := (F_{\mu\_kl1} + F_{\mu\_kl2}) \cdot 2 \cdot 28 + (F_{\mu\_kl3} + F_{\mu\_kl4}) \cdot 4 \cdot 28 = 46.903 \text{ N}$$

$$F_{\mu\_dreh} := (F_{\mu\_kl1} + F_{\mu\_kl2}) \cdot 2 \cdot 28 + (F_{\mu\_kl3} + F_{\mu\_kl4}) \cdot 4 \cdot 28 \dots = 127.541 \text{ N}$$

$$+ F_{\mu\_gl1} + F_{\mu\_gl2} + F_{\mu\_l}$$

beide Werte müssen bei der Motorkraft berücksichtigt werden (Iteration)

**Welle der Lamelle:**

Länge der Welle der Lamelle:	$l_{wl} := 20\text{mm}$
Durchmesser der Welle:	$d_{wl} := 12.5\text{mm}$
Torsionswiderstandsmoment der Welle:	$W_{wl\_t} := \frac{d_{wl}^3 \cdot \pi}{16} = 383.495 \cdot \text{mm}^3$
Moment durch Winddruck auf die verdrehfixierte Welle:	$M_{wl} := p_{ws} \cdot \frac{l_l}{2} \cdot h_l \cdot \frac{l_l}{4} = 31.355 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$
maximale Torsionsspannung	$\tau_{wl} := \frac{M_{wl}}{W_{wl\_t}} = 81.762 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
maximale Zugspannung bei einseitigem Klemmen:	$\sigma_{wl\_zug} := \frac{F_{l_z}}{\frac{d_{wl}^2 \cdot \pi}{4}} = 138.205 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Biege­wider­standsmoment der Welle:	$W_{wl\_b} := \frac{d_{wl}^3 \cdot \pi}{32} = 191.748 \cdot \text{mm}^3$
maximale Biegespannung durch Winddruck bei steifer Lamelle:	$\sigma_{wl\_b} := \frac{\frac{p_{ws} \cdot l_l \cdot h_l}{2} \cdot l_{wl}}{W_{wl\_b}} = 34.553 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

## 11.3 Berechnung LV8

# LV 8 / IT3

### Koordinatensystem:

x Richtung = horizontal; Fahrerrichtung  
 y Richtung = horizontal; normal auf Fahrerrichtung  
 z Richtung = vertikal

### Werte laut Anforderungsliste:

#### Geometrie:

Länge der Garage:  $l_g := 1.4\text{m}$   
 Gesamtlänge der Fensterfläche:  $l_f := 12\text{m} - l_g = 10.6\text{m}$   
 Länge einer Lamelle:  
 (und Abstand zwischen den Lamellen)  $l_l := \frac{l_f}{28} = 378.57143\text{mm}$   
 Breite der Lamelle:  $b_l := 47\text{mm}$   
 Platz in Garage für Motor:  $l_g - (28 \cdot b_l) = 84\text{mm}$   
 Höhe der Lamelle:  $h_l := 3.32\text{m}$

#### Kinematik:

Anzahl gleichzeitig zu  
 verfahrens Lamellen:  $\text{anz}_l := 7$   
 Geschwindigkeit der Lamellen:  $v := 1.4 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 0.38889 \frac{\text{m}}{\text{s}}$   
 Geschwindigkeit des leeren Schlittens  $v_s := 2 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 0.55556 \frac{\text{m}}{\text{s}}$   
 Zeitverlust für Ein- bzw. Ausklinken:  
 (Wert von Linearmotoren)  $t_{\text{st}} := 1\text{s}$   
 Zeit zum schließen einer Lamelle:  
 (Verdrehen von 0 auf 90 Grad)  $t_d := 5\text{s}$   
 Zeit für Beschleunigung auf v:  
 (bzw. Abbremsen von v)  $t_{\text{acc\_trans}} := 1\text{s}$   
 Beschleunigung der Lamellen:  $a := \frac{v}{t_{\text{acc\_trans}}} = 0.38889 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

### Zeit bis alle Lamellen an Ihrem Ort sind:

Zeitverlust für Verfahren  
 von einer Position zur Nächsten:  $t_{\text{acc\_pos}} := 2 \cdot \sqrt{\frac{l_l}{a}} = 1.97329\text{s}$

Zeiten für das Verfahren der einzelnen Pakete:

$$t_{\text{trans1}} := 2 \cdot (t_{\text{st}} + t_{\text{acc\_trans}}) + \frac{6.5 \cdot b_l + 21.5 \cdot l_l - \frac{v}{2} \cdot t_{\text{acc\_trans}}}{v} \dots = 62.4287 \text{ s}$$

$$+ 6 \cdot (t_{\text{acc\_pos}} + t_{\text{st}}) + \frac{27.5 \cdot l_l + 7.5 \cdot b_l}{v_s}$$

$$t_{\text{trans2}} := 2 \cdot (t_{\text{st}} + t_{\text{acc\_trans}}) + \frac{13.5 \cdot b_l + 14.5 \cdot l_l - \frac{v}{2} \cdot t_{\text{acc\_trans}}}{v} \dots = 52.28261 \text{ s}$$

$$+ 6 \cdot (t_{\text{acc\_pos}} + t_{\text{st}}) + \frac{20.5 \cdot l_l + 14.5 \cdot b_l}{v_s}$$

$$t_{\text{trans3}} := 2 \cdot (t_{\text{st}} + t_{\text{acc\_trans}}) + \frac{20.5 \cdot b_l + 7.5 \cdot l_l - \frac{v}{2} \cdot t_{\text{acc\_trans}}}{v} \dots = 42.73335 \text{ s}$$

$$+ 6 \cdot (t_{\text{acc\_pos}} + t_{\text{st}}) + \frac{14.5 \cdot l_l + 20.5 \cdot b_l}{v_s}$$

$$t_{\text{trans4}} := 2 \cdot (t_{\text{st}} + t_{\text{acc\_trans}}) + \frac{27.5 \cdot b_l + 0.5 \cdot l_l - \frac{v}{2} \cdot t_{\text{acc\_trans}}}{v} \dots = 25.15005 \text{ s}$$

$$+ 6 \cdot (t_{\text{acc\_pos}} + t_{\text{st}})$$

Gesamtzeit für Verfahren:  
(aller Lamellen)  $t_{v\_anz} := t_{\text{trans1}} + t_{\text{trans2}} + t_{\text{trans3}} + t_{\text{trans4}} = 3.04325 \cdot \text{min}$

Winkelgeschwindigkeit  
Drehung:  $\omega := \frac{\pi}{2} = 0.31416 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}}$   $n := \frac{\omega}{2\pi} = 3 \cdot \frac{1}{\text{min}}$

Anzahl der zu drehenden Lamellen:  $\text{anz}_{\text{ld}} := 1$

Zeit für Drehbeschl.:  $t_{\text{acc\_rot}} := 1 \text{ s}$

Winkelbeschleunigung:  $\alpha := \frac{\omega}{t_{\text{acc\_rot}}} = 0.31416 \frac{1}{\text{s}^2}$

Zeit bis alle zu sind:  $t_{\text{d\_anz}} := t_{\text{d}} = 5 \cdot \text{s}$

Gesamtzeit zum vollkommenen schließen:  $t_{\text{ges}} := t_{\text{d\_anz}} + t_{v\_anz} = 3.12658 \cdot \text{min}$

#### **Werte für Lamellen nach CAD:**

Masse der Lamelle ca.:  $m_l := 38.4 \text{ kg}$

Massenträgheitsmomente:  $I_{l\_x} := 37.338 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

$$I_{l\_y} := 37.585 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{l\_z} := 0.266 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

**Flächenträgheitsmoment:**

Lamelle\_LV8\_V2:  
(Werte laut CATIA)

$$I_y := 1.909 \cdot 10^{-7} \text{m}^4 = 190900 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_x := 7.94 \cdot 10^{-6} \text{m}^4 = 7940000 \cdot \text{mm}^4$$

Überprüfung:  
(Rechecksprofil)

$$I_{y\_ber} := \frac{I_1 \cdot b_1^3 - (I_1 - 1\text{mm}) \cdot (b_1 - 1\text{mm})^3}{12} = 212760.7381 \cdot \text{mm}^4$$

**weitere wichtige Werte:**

Moment durch Trägheit und Winkelbeschleunigung:

$$M_{I\_z} := I_{I\_z} \cdot \alpha = 0.08357 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

E-Modul Stahl:

$$E_I := 210 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \quad E_{I\_zink} := 96\text{GPa}$$

Strömungswiderstandskoeffizient:  
(lange Rechteckplatte (Wikipedia)  
-0.2 für Abrundungen)

$$c_w := 1.8$$

Luftdichte (-20°C (Wikipedia)):

$$\rho := 1.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Windgeschwindigkeit verfahren:

$$v_{wv} := 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad p_{wv} := \frac{\rho \cdot c_w \cdot v_{wv}^2}{2} = 504 \text{ Pa}$$

Windgeschwindigkeit Sturm:

$$v_{ws} := 30 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad p_{ws} := \frac{\rho \cdot c_w \cdot v_{ws}^2}{2} = 1134 \text{ Pa}$$

**LAMELLEN VERFAHREN:****ANTRIEB SCHLITTEN:****Synchronscheiben:****gewählte Synchronscheibe für Antrieb:**

Laut Breco z.min = 20 für E-zuträger

Beco AT5

B=32 (Synchronscheibenbreite)

B.x=40 (Gesamtbreite ohne Nabe)

z=25

d.k=38.57

d.B=43

d.v=8H7 (Vorbohrung)

d.max=25 (maximale Bohrung)

Wirkdurchmesser Synchronscheibe:  $d_{0s\_an} := 39.79\text{mm}$ Wirkradius Synchronscheibe:  $r_{0s\_an} := \frac{d_{0s\_an}}{2} = 19.895\text{mm}$ Zähnezahl der Synchronscheibe:  $z_{s\_an} := 20$ **Motor und Getriebe:**Anzahl der Motoren für Verfahren:  $anz_{mv} := 1$ Kraft durch Beschleunigung  
der Lamellen:  $F_a := m_l \cdot a \cdot anz_l = 104.53333\text{N}$   $anz_l = 7$ Einfallswinkel des Windes auf die Fassade:  $\beta := 45^\circ$  (maximale Kraft bei  $\beta=45^\circ$ )

Kraft durch Winddruck auf 7 im Paket verfahrende Lamellen:

$$F_w := \rho_{wv} \cdot [l_l \cdot h_l \cdot \cos(\beta) + (anz_l - 1) \cdot b_l \cdot h_l \cdot \tan(\beta) \cdot \cos(\beta)] = 781.57995 \cdot \text{N}$$

Vergleichsrechnung der Kraft bei einem Einfallswinkel normal auf eine Lamelle:

$$F_{w1} := \frac{\rho \cdot c_w \cdot h_l \cdot l_l \cdot v_{wv}^2}{2} = 633.456\text{N}$$

Kraft durch Reibung:  $F_\mu := 40\text{N}$  (ohne Verwinkeln der Linearlager)durch den Antrieb aufzuwendende Kraft:  $F_m := \frac{F_a + F_w + F_\mu}{anz_{mv}} = 926.11328 \cdot \text{N}$

**Drehgeber:**

Schritte:  $s_d := 500$

Weg pro Messpunkt:  $\frac{d_{0s\_an} \cdot \pi}{2 \cdot s_d} = 0.125 \cdot \text{mm}$

**Motor für Verfahren des Schlittens:**

min. Drehmoment:  $M_m := F_m \cdot r_{0s\_an} = 18.42502 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$

Winkelgeschwindigkeit:  
(Fahrt mit Lamellen)  $\omega_m := \frac{v}{r_{0s\_an}} = 19.54707 \frac{1}{\text{s}}$

Umdrehungen / Minute:  $n_m := \frac{\omega_m}{2 \cdot \pi} = 186.66074 \cdot \frac{1}{\text{min}}$

geschätztes Drehmoment:  
(durch Reibung des Schlittens  
bem alleinigen Verfahren)  $M_{ms} := 2 \text{N} \cdot \text{m}$

Winkelgeschwindigkeit:  
(Fahrt ohne Lamellen)  $\omega_{ms} := \frac{v_s}{r_{0s\_an}} = 27.92438 \frac{1}{\text{s}}$

Umdrehungen / Minute:  $n_{ms} := \frac{\omega_{ms}}{2 \cdot \pi} = 266.65819 \cdot \frac{1}{\text{min}}$

Leistung des Motors:  $P_m := M_m \cdot \omega_m = 360.15516 \cdot \text{W}$

**Gewählter Motor:**

Motor: Oriental Motors BLH450KC-100FR

Sicherheiten:

Maximales Drehmoment:  
(bei Verfahren mit Lamellen  
250 1/min)  $M_{ma} := 20 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$

$$\frac{M_{ma}}{M_m} = 1.08548$$

Maximales Drehmoment:  
(bei Verfahren des Schlittens  
=300 1/min)  $M_{msa} := 10 \text{N} \cdot \text{m}$

$$\frac{M_{msa}}{M_{ms}} = 5$$

Maximalmoment des Motors:  $M_{mba} := 24 \text{N} \cdot \text{m}$ 

max. Kraft von Motor auf Zr:  $F_{ma} := \frac{M_{mba}}{r_{0s\_an}^2} = 603.16662 \text{ N}$

Fahrt mit Lamellen:

Drehzahl:  
bei 20Nm  $n_{ma} := 250 \cdot \frac{1}{\text{min}}$

$$\frac{n_{ma}}{n_m} = 1.33933$$

Fahrt ohne Lamellen:

Drehzahl:  
bei 10 Nm  $n_{mas} := 300 \cdot \frac{1}{\text{min}}$

$$\frac{n_{mas}}{n_{ms}} = 1.12504$$

**Zahnriemen:**

Streckenlast	$q_r := 0.105 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1.03005 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$
Durchhang	$f_r := 3 \text{ cm}$
Trumlänge	$L_r := 13.4 \text{ m}$
Spannkraft laut Mech Skript 13.35:	$H_r := \frac{q_r \cdot L_r^2}{8 \cdot f_r} = 770.64907 \cdot \text{N}$
Maximale Umfangskraft: (Haltemoment des Motors/Radius der Rolle)	$F_{ru} := F_{ma} = 603.16662 \cdot \text{N}$
Mindestvorspannkraft:	$F_{rv} := \frac{F_{ru}}{2} = 301.58331 \text{ N} \quad \frac{H_r}{F_{rv}} = 2.55534$
Seilkraft gesamt:	$F_r := H_r + F_{ru} = 1373.8157 \cdot \text{N}$

**gewählter Zahnriemen:**  
Brecoflex AT5  
Stahl-Zugträger, Meterware

b=32mm  
zmin=15  
dmin=25mm

Sicherheit:

Zulässige Umfangskraft:	$F_{ra} := 2660 \text{ N}$	$\frac{F_{ra}}{F_r} = 1.93621$
-------------------------	----------------------------	--------------------------------

Länge des Schlittens:  $L_s := 400 \text{ mm}$

Länge des Zahnriemens:  $L_{ar} := (12 \text{ m} - 2 \cdot 43 \text{ mm}) \cdot 2 + 210 \text{ mm} \cdot 2 + d_{0s\_an} \cdot \pi - L_s = 23.973 \text{ m}$

Gewicht des Zahnriemens:  $L_{ar} \cdot 1.05 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 25.17165 \text{ kg}$

Dehnung des Zahnriemens bei dieser Länge und Kraft:  
(Bezugswerte aus Dr.Arbeit v. Prof. Kartnig: 3.16mm Dehnung auf 800mm bei 5kN Kraft für AT10 B32)

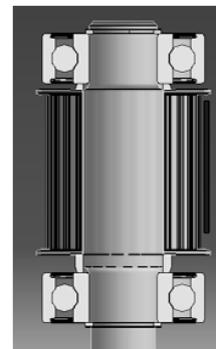
$$\Delta l_r := \left( \frac{3.16 \text{ mm}}{800 \text{ mm}} \right) \cdot L_{ar} \cdot \frac{F_r}{5 \text{ kN}} = 26.01825 \cdot \text{mm}$$

**Antriebswelle:**

$l_{w1} := 30 \text{ mm}$  (Riemenmitte - Lager unten)

$l_{w2} := 28 \text{ mm}$  (Riemenmitte - Lager oben)

$l_{w3} := \frac{h_l}{2} = 1.66 \text{ m}$  (Länge der Transversalwelle  
von Lager unten bis Antriebsmotor)



$d_{wkl} := 14\text{mm}$  (Transversalwelle)

$d_{wl} := 17\text{mm}$  (Lagerung)

$d_{wgr} := 20\text{mm}$  (Riemenscheibe)

Kraft von ZR auf Riemenscheibe:  $F_{wr} := 2F_{ra} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = 3761.80808\text{ N}$

Kraft auf Lager 2:  $F_{l2} := F_{wr} \cdot \frac{l_{w1}}{l_{w1} + l_{w2}} = 1945.7628\text{ N}$

Kraft auf Lager 1:  $F_{l1} := F_{wr} \cdot \left(1 - \frac{l_{w1}}{l_{w1} + l_{w2}}\right) = 1816.04528\text{ N}$

Biege widerstandsmoment der Welle:  $W_{w\_b} := \frac{d_{wgr}^3 \cdot \pi}{32} = 785.39816 \cdot \text{mm}^3$

Maximales Biegemoment:  $M_{wb} := F_{l2} \cdot l_{w2} = 54.48136\text{ J}$

maximale Biegespannung:  $\sigma_{wb} := \frac{|M_{wb}|}{W_{w\_b}} = 69.36782 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Torsionswiderstandsmoment der Welle:  $W_{w\_t} := \frac{d_{wkl}^3 \cdot \pi}{16} = 538.78314 \cdot \text{mm}^3$

Moment durch Motorkraft gegen Fixierung:  $M_w := M_{ma} = 20 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$

maximale Torsionsspannung  $\tau_{w\_l} := \frac{M_w}{W_{w\_t}} = 37.12069 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

### Lagerung der Synchronscheiben:

Dichte der Transversalwelle:  $\delta_w := 7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$   
(Stahl legiert laut Wikipedia)

Gewicht der Transversalwelle:  $m_w := \left[ \frac{d_{wkl}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{h_l}{2} + \frac{d_{wgr}^2 \cdot \pi}{4} \cdot (l_{w1} + l_{w2}) \right] \cdot \delta_w = 2.16269\text{ kg}$

Axialkraft auf Festlager:  $F_{lz} := m_w \cdot g = 21.20876\text{ N}$

### **Gewähltes Lager:**

SKF Rillenkugellager,  
einreihig, Edelstahl

Sicherheit:

dynamische Tragzahl:  $C_l := 8.06\text{kN}$   $\frac{C_l}{\max(F_{l1}, F_{l2})} = 4.14233$

statische Tragzahl:  $C_{0l} := 4.65\text{kN}$   $\frac{C_{0l}}{\max(F_{l1}, F_{l2})} = 2.38981$

**Passfedern Synchronscheiben/Zahnräder:** (laut Roloff/Matek Maschinenelemente)

Federbreite:	$b_{pf} := 6\text{mm}$
Federhöhe:	$h_{pf} := 6\text{mm}$
Wellennutbreite:	$b_{wn} := 6\text{mm}$
Wellennuttiefe:	$t_{1wn} := 3.5\text{mm}$
Nabennutbreite:	$b_{nn} := 6\text{mm}$
Nabennuttiefe:	$t_{2nn} := 2.8\text{mm}$
Passfederlänge:	$l_{pf} := 20\text{mm}$
tragende Passfederlänge:	$l_{pf\_strich} := l_{pf} - b_{pf} = 14\cdot\text{mm}$
maximale tragende Passfederlänge:	$l_{pf\_strichmax} := 1.3 \cdot d_{wgr} = 26\cdot\text{mm}$
Wert für Tab 12-2c:	$\frac{l_{pf\_strich}}{d_{wgr}} = 0.7$
Lastverteilungsfaktor laut Tab 12-2c:	$K_{pf\_λ} := 1.15$
tragende Passfederhöhe:	$h_{pf\_strich} := 0.45 \cdot h_{pf} = 2.7\cdot\text{mm}$
Flächenpressung:	$p_{pf\_m} := \frac{2 \cdot 2M_{ma} \cdot K_{pf\_λ}}{d_{wgr} \cdot h_{pf\_strich} \cdot l_{pf\_strich}} = 121.69312 \cdot \text{MPa}$
Streckgrenze Welle: (nichtrostender Stahl laut Wikipedia)	$R_{e\_w} := 340\text{MPa}$
Sicherheitsfaktor Fugenpressung:	$S_{F\_w} := 1.5$
zulässige Fugenpressung:	$p_{pf\_zul} := \frac{R_{e\_w}}{S_{F\_w}} = 226.66667 \cdot \text{MPa}$
Sicherheit:	$\frac{p_{pf\_zul}}{p_{pf\_m}} = 1.86261$
Mindestlänge der Nabe:	$l_{n\_min} := b_{pf} + l_{pf} = 26\cdot\text{mm}$

**Motoren auf Schlitten:**

Haftreibungszahl Bolzen:	$\mu_s := 0.1$
Federkraft Bolzen:	$F_{fb} := 20\text{N}$
Nötige Stellkraft des Aktuators:	$F_{ms} := \frac{F_w}{2} \cdot 2 \cdot \mu_s + F_{fb} = 98.15799\text{N}$

**Gewählter Linearmotor:**

Heydon (Stepper) Nema 14;  
 Captive (Spindel gegen Verdrehen gesichert um ausschließlich  
 translatorische Bewegung auszuführen)

Vorhandene Stellkraft (C):	$F_{msa} := 27\text{lb}\cdot\text{g} = 120.10198\cdot\text{N}$
Sicherheit:	$\frac{F_{msa}}{F_{ms}} = 1.22356$
Vortrieb geschätzt Version A:	$v_{msA} := 12.7 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$
Nötiger Hub des Aktors:	$s_{\text{hub}} := 12.5\text{mm}$
Gesamtlänge des Aktuators: (Eingefahren)	$34.36 + 20.8 + 16.5 - 6.73 + 1 = 65.93$
Dauer für Ein- oder Ausklinken: (für Berechnung der Verfahrdauer benötigt)	$t_{\text{hub}} := \frac{s_{\text{hub}}}{v_{msA}} = 0.98425\text{ s}$
Stromzufuhr:	$P_{ms} := 3.2\text{W}$ $I_{ms} := 1\text{A}$ $U_{ms} := 3.2\text{V}$
Leistung pro Schlitten und damit Stromschiene:	$P_{ms\_ges} := P_{ms} \cdot 7 = 22.4\text{W}$
Stromstärke pro Schlitten und damit Stromschiene:	$I_{ms\_ges} := \frac{P_{ms\_ges}}{U_{ms}} = 7\text{A}$
maximale Scherkraft auf Aktor:	$F_{ak\_scher} := \frac{p_{ws} \cdot l_1 \cdot h_l}{2} = 712.638\cdot\text{N}$
Durchmesser der Aktorwelle:	$d_{ak} := 4\text{mm}$
Scherspannung auf Aktorwelle:	$\tau_{scher} := \frac{F_{ak\_scher}}{\left(\frac{d_{ak}^2 \cdot \pi}{4}\right)} = 56.70993 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

**LAMELLEN DREHEN:**

Anzahl der Motoren für Drehen:	$\text{anz}_{md} := 1$
Anzahl der zu drehenden Lamellen:	$\text{anz}_{ld} = 1$
Durchmesser der Welle:	$d_{wl} = 0.017\text{ m}$

**Motor:**

Moment durch Lagerreibung: (Aus Berechnung des Gleitlagers unten)	$M_{l\_μ} := 1\text{N}\cdot\text{m}$
min. Drehmoment:	$M_{md} := p_{wv} \cdot h_l \cdot \frac{l_1}{2} \cdot \frac{l_1}{4} + M_{l\_μ} = 30.97604\text{ J}$
Winkelgeschwindigkeit:	$\omega = 0.31416 \frac{1}{\text{s}} \quad n = 3 \cdot \frac{1}{\text{min}}$
Leistung des Motors:	$P_{md} := M_{md} \cdot \omega = 9.73141\text{ W}$

**Gewählter Motor:**

Motor: Bosch Getriebemotor AHC2 mit Hall- Sensoren

Sicherheiten:

Maximales Drehmoment:  
bei 1 1/min

$$M_{mda} := 22 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$\frac{M_{mda}}{M_{md}} = 0.71023$$

Maximale Drehzahl:  
bei 90% des  
Maximalmomentes

$$n_{mda} := 10 \cdot \frac{1}{\text{min}}$$

$$\frac{n_{mda}}{n} = 3.33333$$

Moment im Stillstand:

SELBSTHEMMEND

Motor kann, wenn Drehung in eine Richtung durch den Winddruck nicht möglich ist, in die andere drehen.

**Abschätzung Stromzuführung:**

Leistung für alle Verdrehmotoren:

Maximale Leistungsaufnahme eines Motors:  $P_{mda\_max} := 12 \text{ W}$ Betriebsspannung:  $U_{mda} := 24 \text{ V}$ Maximale Stromstärke:  $I_{mda\_max} := 7 \text{ A}$ **gewählte Federkontaktstifte:**

N&amp;H Technology PS4

redundante Anordnung (doppelte Ausführung pro Kontakt) um Stromstärke pro Kontakt zu verringern und Kontaktsicherheit zu erhöhen

**Welle der Lamelle:**

Maximalkraft in x-Richtung:

$$F_{Iax} := \frac{p_{ws} \cdot h_l \cdot l_l}{2} = 712.638 \text{ N}$$

Maximalkraft in y-Richtung

$$F_{Iay} := 0 \text{ N}$$

Spiel des Loslagers in z-Richtung:

$$s_{lz} := 20 \text{ mm}$$

Maximalkraft in z-Richtung:  
(Für den Fall, dass nur ein Schlitten  
angetrieben wird (z.B. Bruch eines  
Zahnriemens).

$$F_{Iaz} := \frac{F_m}{\tan\left(\arccos\left(\frac{h_l - s_{lz}}{h_l}\right)\right)} = 8.39913 \cdot \text{kN}$$

Torsionswiderstandsmoment der Welle:

$$W_{W\_l\_t} := \frac{d_{wl}^3 \cdot \pi}{16} = 964.66529 \cdot \text{mm}^3$$

Moment durch Motorkraft gegen Fixierung:

$$M_{W\_l} := M_{md} = 30.97604 \cdot \text{N}\cdot\text{m}$$

maximale Torsionsspannung

$$\tau_{W\_l} := \frac{M_{W\_l}}{W_{W\_l\_t}} = 32.11066 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Biege widerstandsmoment der Welle:

$$W_{W\_l\_b} := \frac{d_{wl}^3 \cdot \pi}{32} = 482.33265 \cdot \text{mm}^3$$

Maximales Biegemoment:  
(19mm = Abstand von  
Lamellenoberkante zu Gleitlager)

$$M_{wl\_b} := \frac{F_{lax}}{2} \cdot 19\text{mm} = 6.77006 \text{ J}$$

maximale Biegespannung :

$$\sigma_{wl\_b} := \frac{|M_{wl\_b}|}{W_{W\_l\_b}} = 14.03608 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Maximale Zugspannung:

$$\sigma_{wl\_z} := \frac{F_{lax}}{\left(\frac{d_{wl}^2 \cdot \pi}{4}\right)} = 37.0038 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

**Lamelle aus Stahl:**

Neigung bei x=0 bzw. h.l:

$$w_{\text{strich}} := \frac{F_{lax} \cdot h_l^2}{24 \cdot E_l \cdot I_y} = 0.46777 \cdot \text{Grad}$$

Maximale Durchbiegung:

$$w := \frac{5F_{lax} \cdot h_l^3}{384 \cdot E_l \cdot I_y} = 8.47026 \cdot \text{mm}$$

Länge in z-Richtung bei Biegung:

$$s_l := \sqrt{(h_l)^2 - (w)^2} = 3319.98919 \cdot \text{mm}$$

Verkürzung:

$$h_l - s_l = 0.01081 \cdot \text{mm}$$

thermische Ausdehnung von -20° auf +50°:

$$\Delta l_{\text{therm}} := l_l \cdot 11 \cdot 10^{-6} \cdot 70 = 0.2915 \cdot \text{mm}$$

**Lamelle aus Zink:**

Neigung bei x=0 bzw. h.l:

$$w_{\text{strich\_zink}} := \frac{F_{lax} \cdot h_l^2}{24 \cdot E_{l\_zink} \cdot I_y} = 1.02324 \cdot \text{Grad}$$

Maximale Durchbiegung:

$$w_{\text{zink}} := \frac{5F_{lax} \cdot h_l^3}{384 \cdot E_{l\_zink} \cdot I_y} = 18.5287 \cdot \text{mm}$$

thermische Ausdehnung von -20° auf +50°:

$$\Delta l_{\text{therm\_zink}} := l_l \cdot 30 \cdot 10^{-6} \cdot 70 = 0.795 \cdot \text{mm}$$

**Scherspannung an Sicherungssplint der Lamelle-Welle Verbindung:**

maximale Scherkraft auf Splint:

$$F_{\text{sp\_scher}} := \frac{M_{W\_l}}{27\text{mm}} = 1147.26085 \cdot \text{N}$$

Durchmesser Splints:

$$d_{\text{sp}} := 6\text{mm}$$

Scherspannung auf Splint:

$$\tau_{\text{scher\_sp}} := \frac{F_{\text{sp\_scher}}}{\left(\frac{d_{\text{sp}}^2 \cdot \pi}{4}\right)} = 40.57605 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

**Gleitlager der Lamellen-Welle:**

Iglidur G GFM-2023-07

Fläche des Lagerbundes:  $A_{l\_ax} := (13\text{mm})^2 \cdot \pi - (10\text{mm})^2 \cdot \pi = 216.76989 \cdot \text{mm}^2$

Flächenpressung am Lagerbund:  $\frac{F_{laz}}{A_{l\_ax}} = 38.74673 \cdot \text{MPa}$        $\frac{m_l \cdot g}{A_{l\_ax}} = 1.73721 \cdot \text{MPa}$

Fläche des Lagerzylinders:  $A_{l\_rad} := d_{wl} \pi \cdot 3.5\text{mm} = 186.92476 \cdot \text{mm}^2$

Flächenpressung am Lagerzylinders:  $\frac{F_{lax}}{A_{l\_rad}} = 3.81243 \cdot \text{MPa}$

Geschwindigkeit an Wellenumfang:  $v_l := \omega \cdot \frac{d_{wl}}{2} = 0.00267 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Reibungskoeffizient:  $\mu_l := 0.1$

Moment, das Motor überwinden muss:  $M_{\mu} := F_{lax} \cdot \mu_l \cdot \frac{d_{wl}}{2} + m_l \cdot g \cdot \mu_l \cdot \frac{d_{wl}}{2} = 0.92583 \text{ J}$

**Linearlager:**

Dyn. Nennbelastung in z-Richtung:  $F_{lf\_dyn} := m_l \cdot g = 376.57536 \text{ N}$

Stat. Nennbelastung in z-Richtung:  $F_{lf\_stat} := F_{laz} = 8399.12528 \text{ N}$

Moment roll geschätzt:  
(Moment durch Gummimuffen abgefangen)  $M_{lfR0} := 10\text{N} \cdot \text{m}$

Moment pitch geschätzt:  
(Moment durch Gummimuffen abgefangen)  $M_{lfP0} := 10\text{N} \cdot \text{m}$

Moment yaw:  $M_{lfY0\_w} := p_{wv} \cdot h_l \cdot \frac{l_l}{2} \cdot \frac{l_l}{4} = 29.97604 \text{ J}$

Abstand Bolzen zu Lagermitte:  $a_l := 20\text{mm}$

Motorkraft gegen blockiertes Lager:  $M_{lfY0\_m} := F_m \cdot a_l = 18.52227 \text{ J}$

Trägheit der Lamelle beim losfahren:  $M_{lfY0\_t} := m_l \cdot a \cdot a_l = 0.29867 \text{ J}$

Verfahren gegen Wind:  $M_{lfY0\_vw} := p_{wv} \cdot h_l \cdot l_l \cdot a_l = 12.66912 \text{ J}$

**Gewählt:**

Iigus Lineargleitlager Drylin W; d16; Edelstahl

$F_{lf\_stat\_a} := 6900\text{N}$       Sicherheit:  $\frac{F_{lf\_stat\_a}}{F_{laz}} = 0.82151$

Bei diesem seltenen Fall geht es nur darum, dass das Lager nicht bricht. Es muss danach nicht mehr funktionsfähig sein.

$M_{lfY0\_a} := 30\text{N} \cdot \text{m}$       Sicherheit:  $\frac{M_{lfY0\_a}}{M_{lfY0\_w}} = 1.0008$

Laut Hersteller kann dieses Lager 30Nm aufnehmen, die Wahrscheinlichkeit des Klemmens der Lagerung ist allerdings hoch und muss getestet werden.

Reibung pro Lamellenpaket:  $F_{ll\_mu} := F_{lf\_dyn} \cdot \mu_l = 37.65754 \text{ N}$