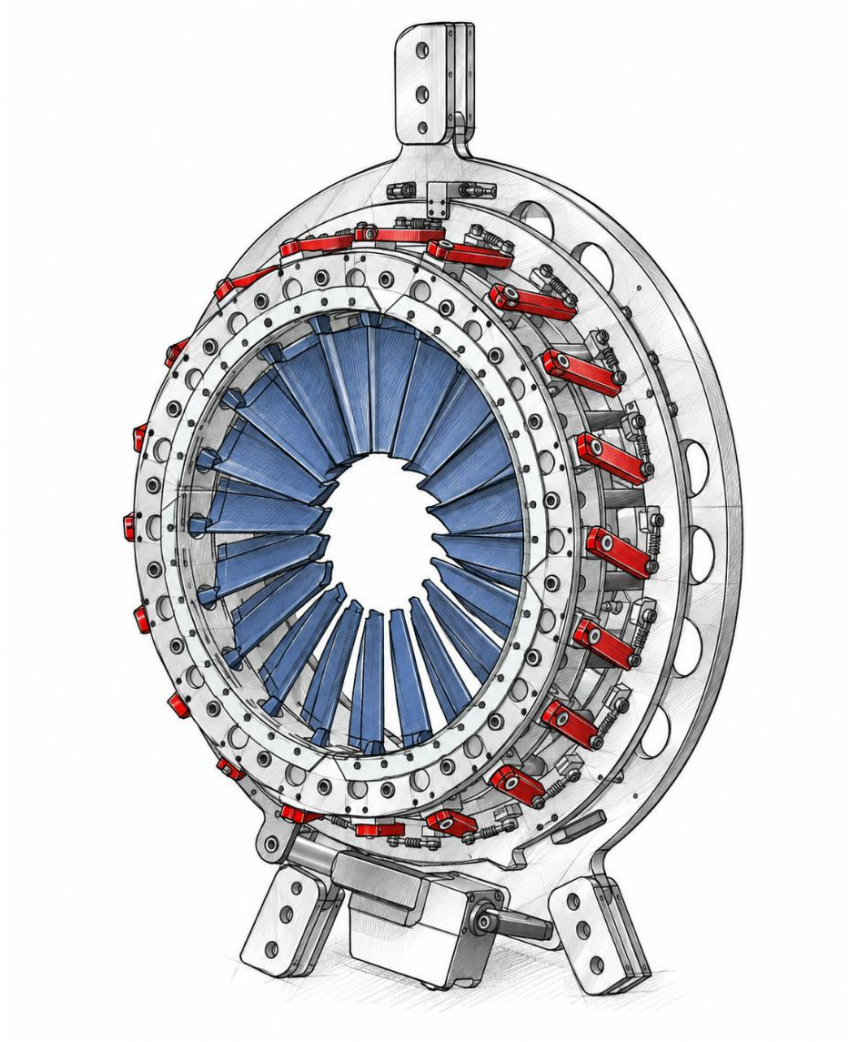
TEKO Schweizerische Fachschule

VentoStream

Optimierung
Leitschaufelkranz



Diplomarbeit 2026

Maschinenbautechniker HF

TEKO Olten

Diplomand:	Julian Blum
Diplomlehrer:	Patrick Baumann
Auftraggeber:	VentoStream AG
Fachexperte:	Stefan Haberthür

Inhaltsverzeichnis

Management Summary 4
1 Vorwort 6
1.1 Einleitung 6
1.2 Hinweise zur Arbeit 6
1.3 Einsatz von künstlicher Intelligenz 6
2 Kurzer beruflicher Lebenslauf 7
3 Qualifikationsprofil 8
4 Projektinitialisierung 9
4.1 Pflichtenheft 9
4.2 Woraus ist die Idee für das Thema Diplomarbeit entstanden? 15
4.3 Marktanalyse 15
4.4 Zielscheibe 17
4.5 Stakeholder-Analyse 18
5 Projektplanung 20
5.1 Projekttyp 20
5.2 Vorgehensmodell 20
5.3 Projektstrukturplanung 21
5.4 Projektablaufplanung 22
5.5 Ressourcenplan 23
5.6 Kommunikationsplanung / Projektüberwachung 23
5.7 Risikoanalyse 24
6 Projektrealisierung 27
6.1 Beschreibung des Vorgehens / Realisierungsplan 27
6.2 Analyse der bestehenden LSK-Konstruktion 28
6.3 Informationssammlung 36
6.4 Kreativitätsmethode / Ideenfindung 39
6.5 Ideenskizzen 40
6.6 Priorisierungsmethode 45
6.7 Variantenbildung 47
6.8 Evaluation der geeignetsten Variante 51
7 Ausarbeitung der Variante 61
7.1 Phasenplan zur Umsetzung der Variante 61
7.2 Finales CAD-Modell 62
7.3 Umsetzung Variante Drehring 65
7.3.1 Mechanischer Prototyp 65

7.3.2 Linearaktuator 68
7.3.3 Grundplatte 73
7.3.4 Aufhängungsplatten 74
7.3.5 Lagerkranz 74
7.3.6 Distanzwellen 78
7.3.7 Anlenkhebel und Leitschaufeln 82
7.3.8 Koppelstangen 83
7.3.9 Drehring und Konsolen 85
7.3.10 Anbindung Linearaktuator 86
7.3.11 Lagerung Drehring 89
7.3.12 Positionsüberwachung (Sensoren) 93
7.3.13 Abdeckblech 93
7.3.14 Materialwahl 94
7.4 Fertigungstauglichkeit 95
7.5 Montagetauglichkeit 96
7.6 Komponentenreduktion 97
7.7 Gewichtsreduktion 98
7.8 Kostenreduktion 99
7.9 SWOT-Analyse 100
7.10 Risiko-Analyse Umsetzungsvariante 102
7.11 Phasenplan Umsetzung Konzept in Realität 104
7.12 Kosten-Nutzen-Analyse 105
7.13 Expertenbericht 106
8 Projektabschluss 107
8.1 Projektüberwachung 107
8.2 Evaluation der Zielerreichung 110
8.3 Reflexion Weg zum Ziel 112
8.4 Lessons learnt / Reflexion 112
8.5 Ausblicke 113
8.6 Schluss 114
8.7 Persönliches Schlusswort 115
8.8 Danksagungen 115
9 Eigenständigkeitserklärung 116
10 Verzeichnisse 117
10.1 Abkürzungsverzeichnis 117
10.2 Abbildungsverzeichnis 117
10.3 Diagrammverzeichnis 119

10.4 Literatur und Quellenverzeichnis 120
11 Anhang 121
11.1 Projektstatusberichte 121
11.2 Projektbeschrieb 129
11.3 Pflichtenheft 133
11.4 Projektablaufplan IST-Werte 141
11.5 Präferenzmatrix 142
11.6 Handrechnungen 143
11.7 CAD-Messungen 157
11.8 Berechnung Distanzwellen KI 161
11.9 Stückliste 168
11.10 Richtpreisofferten 169
11.11 Diverses 182

Management Summary

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der konstruktiven Optimierung des Leitschaufelkranzes einer neuartigen Windkraftturbine der VentoStream AG für die geplante Serienfertigung. Entstanden ist ein vollständig ausgearbeitetes 3D-CAD-Konzept, das die Herstellkosten halbiert, die Baugruppe deutlich leichter und einfacher macht und die Montagezeit stark verkürzt.

Ausgangslage

Die VentoStream AG entwickelt eine kompakte Windkraftturbine, die nach erfolgreichen Tests des Prototypen serientauglich gemacht werden soll. Beim bestehenden Leitschaufelkranz werden die 20 Leitschaufeln über vier Segmente verstellt. Jedes Segment hat einen eigenen Servomotor, Planetengetriebe und Spindelhubgetriebe. Die Baugruppe ist komplex aufgebaut, wiegt 320 kg und kostet inklusive Montage rund 50'000 CHF.

Als Ergebnis dieser Arbeit sollte ein vollständiges 3D-CAD-Lösungskonzept in SolidWorks vorliegen. Die Mindest-Zielwerte im Pflichtenheft lagen bei max. 20'000 CHF Herstellkosten, 150 Komponenten, 2 Antrieben, 120 kg Gewicht und 60 h Montagezeit. Funktion, Schnittstellen zur Turbine und Einbauraum durften nicht verändert werden. Die zentrale Hypothese lautete, dass die vier Antriebe durch einen einzigen Antrieb ersetzt werden können.

Vorgehen

Die Arbeit folgte dem 4-Phasen-Modell des Projektmanagements. Zuerst wurde die bestehende Konstruktion real am Turbinen-Prototyp und im CAD analysiert. Mit Mindmap und morphologischem Kasten entstanden fünf Ideenskizzen, die mit einer Grobbewertung nach VDI 2225 auf zwei Varianten eingegrenzt wurden: die Variante Drehring und die Variante Schubstangen.

In der Nutzwertanalyse mit 15 gewichteten Kriterien lag die Variante Schubstangen vorne (4,70 zu 3,72 Punkte). Die anschliessende Prüfung der mechanischen Machbarkeit im CAD zeigte jedoch, dass sich bei ihr die Winkelfehler auf 7,7° aufsummieren würden, zulässig sind maximal 1°. Deshalb wurde die Variante Drehring gewählt. Sie wurde über einen mechanischen Prototyp im CAD zum finalen Baugruppenmodell ausgearbeitet und anschliessend umfassend analysiert.

Ergebnisse

Ein einzelner Linearaktuator (Thomson Electrak XD) verdreht einen Aluminium-Drehring, der auf vier THK HCR25 Bogenführungen gelagert ist. Über 20 Koppelstangen mit Kugelköpfen werden alle Leitschaufeln synchron von 0° bis 45° verstellt. Die maximal benötigte Antriebskraft beträgt 8,36 kN. Ein voller Verstellweg bei voller Geschwindigkeit des Aktuators dauert rund 4,6 s (zulässig sind 90 s). Linearaktuator, Gleitlager, Distanzwellen, Kugelköpfe und die Lagerung des Drehrings sind rechnerisch ausgelegt. Schnittstellen und Einbauraum bleiben unverändert. Die Hypothese ist damit bestätigt.

Eigenschaft	Bestehender LSK	Neuer LSK	Reduktion
Einzelteile der Antriebe	12 (4 Antriebe)	1 (1 Antrieb)	91,7%
Einzelteile ohne Normteile	750	353	52,9%
Gewicht	320 kg	199,72 kg	37,6%
Herstellkosten inkl. Montage	50'000 CHF	24'583.90 CHF	50,8%
Montageaufwand (geschätzt)	160 h	25 h	84,4%

Analysiert wurde das Konzept auf seine Fertigungs- und Montagetauglichkeit, die Komponenten- und Gewichtsreduktion und seine Kostenreduktion. Zudem wurden eine SWOT-Analyse, eine Risiko-Analyse und eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt.

Die Kosten-Nutzen-Analyse zeigt den deutlichen Mehrwert für die VentoStream AG auf. Bereits der erste Leitschaufelkranz ist trotz einmaliger Initialkosten von 13'600 CHF um 11'816.10 CHF günstiger als der bestehende. Bei 20 Turbinen pro Jahr spart sie mit Mengenrabatten für die Serienfertigung geschätzt rund 600'000 CHF. Der kürzere Montageaufwand macht dabei jährlich 2'700 Stunden Montagekapazität frei.

Der Erfüllungsgrad der Ziele liegt bei 87,5%. Erreicht wurden unter anderem die Zielwerte für Antriebe und Montage sowie Stellzeit, Verstellbereich und Synchronität. Nicht ganz erreicht wurden die Mindestwerte für Kosten, Teilezahl und Gewicht. Der Fachexperte hatte bei der Übergabe der Zielvorgaben jedoch angemerkt, dass diese sehr ambitioniert seien und als persönliche Challenge gesehen werden sollten.

Ein Dokumentationsziel ist nur halb erfüllt, weil die Sensitivitätsanalyse durch eine technische Machbarkeitsprüfung ersetzt wurde.

Ausblick

Eine Realisierung des Konzepts lohnt sich. Der neue LSK kann direkt am bestehenden Turbinen-Prototyp oder an einer zweiten Turbine aufgebaut und nach Hallen- und Feldtest in die Serie übernommen werden. Vorher sind die technischen Zeichnungen zu erstellen, die Anbindung des CANopen-Aktuators an die Turbinensteuerung zu klären, die Anbindungsmasse mit den Zeichnungen des bestehenden LSK abzugleichen sowie verbindliche Preise und Lieferzeiten für Teile auszuhandeln.

Zu berücksichtigen ist, dass alle Ergebnisse nur im CAD und rechnerisch nachgewiesen sind und die Kosten auf Richtpreisofferten beruhen. Geklärt werden sollte zudem, ob die Windlast immer in die gleiche Richtung wirkt, da sonst das Spiel des Aktuators die Positioniergenauigkeit beeinflusst. Im Feldtest des Turbinen-Prototypen sollten die real auftretenden Lasten gemessen werden, fallen sie tiefer aus, lässt sich der Leitschaufelkranz noch leichter und günstiger auslegen.

1 Vorwort

1.1 Einleitung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird eine bestehende Baugruppe eines Windkraft-Turbinen-Prototyps auf ihr Optimierungspotential hinsichtlich ihrer konstruktiven Komplexität, Herstellungskosten, Antriebskonzepts sowie Gewichts analysiert.

Auf Basis dieser Analyse wird anschliessend ein mögliches Lösungskonzept entwickelt und als 3D-CAD-Modell ausgearbeitet.

Das erarbeitete Lösungskonzept wird darauffolgend beurteilt auf seine Fertigungs- und Montagetauglichkeit, sowie auf die Kosten- und Gewichtsreduktion zur bestehenden Baugruppe.

Die Diplomarbeit findet im Zeitraum vom 14.09.2026 bis zum 09.11.2026 statt und wird im Auftrag der VentoStream AG durchgeführt. Die Dokumentation der Arbeit folgt dem 4-Phasen-Modell des Projektmanagements.

1.2 Hinweise zur Arbeit

Schaufelstellung: 0° = Leitschaufeln geschlossen, 45° = offen. Bei 22,5° steht der Anlenkhebel senkrecht

Abbildungen ohne Quellenangaben: Eigene Bilder (CAD-Screenshots, Skizzen)

Verweise: Verweise auf Kapitel in dieser Arbeit und den Anhang sind anklickbar und führen zum entsprechenden Inhalt

1.3 Einsatz von künstlicher Intelligenz

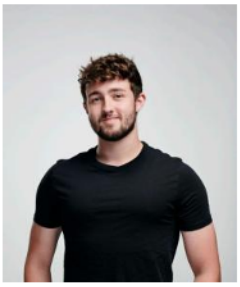
Chat GPT, Free-Version

- KI-generiertes Titelbild im Skizzen-Stil aus CAD-Screenshot LSK

Anthropic Claude, Opus 5.5

- *Bild 46* und *Bild 80*, bei Bildunterschrift gekennzeichnet
- Anhang *11.8* Ausführliche Berechnung Distanzwellen
- Digitalisierung der Handrechnungen für die Dokumentation, Formeln in Word und zugehörige Skizzen
- Projektüberwachungs-Dashboard
- *Diagramm 4* und *Diagramm 6*
- Grafische Darstellung Phasenpläne *6.1, 7.1, 7.11*
- Umwandlung Morphologischer Kasten mit Pfaden als Bild

2 Kurzer beruflicher Lebenslauf



Julian Blum

Polymechaniker EFZ
angehender Maschinenbautechniker HF

Adresse
[redacted]
E-Mail
[redacted]
Telefon
[redacted]
Geburtsdatum
[redacted]

Beruflicher Werdegang

12.2021 – heute	**Polymechaniker · Asytec AG, Reiden** Fertigung, Montage, Elektromontage, Konstruktion, Entwicklung, Projektleitung
09.08.2021	**Abschluss Polymechaniker EFZ, Fachrichtung Montage**
2019 – 2021	**Schwerpunktausbildung Polymechaniker · Hunkeler AG, Wikon** Montage, Elektromontage und Inbetriebnahme
2017 – 2019	**Grundausbildung Polymechaniker · Hunkeler Fertigung AG, Wikon** Fertigung konventionell und CNC

Aus- und Weiterbildungen

10.2024 – heute	**Maschinenbautechniker HF · TEKO Olten**
07.2021 – 11.2021	**Panzersappeur · Rekrutenschule Thun**
2017 – 2021	**Polymechaniker EFZ · Hunkeler AG Wikon, BBZW Emmen**

Private Interessen

Oldtimer	Restauration und Umbau von Mofas, Motorrädern und Autos. Aktuell Komplettrestauration eines VW Golf 2 GTI 16V.
Sport	Krafttraining im Fitnessstudio, Wandern und Skifahren im Winter

3 Qualifikationsprofil

A 1 **Unternehmens- und Führungsprozesse gestalten und verantworten**	• Projektleiterfunktionen in Schule und Betrieb übernommen, Aufgaben kompetenz- und motivationsgerecht im Team verteilt, Prozesse mittels Lean Management analysiert und Optimierungsvorschläge unterbreitet, Qualität durch systematisches Change-Management gesichert und fachliches mit betriebswirtschaftlichem Wissen bei Beschaffungsentscheidungen verbunden.
A 2 **Kommunikation situationsangepasst und wirkungsvoll gestalten**	• Mündlich und schriftlich adressatengerecht kommuniziert, Ideenskizzen im Projektteam präsentiert, Lieferantenprobleme per Telefon/Mail gelöst, Aufgaben aus Projektbesprechungen im Teams-Kanal verbindlich zugewiesen und nachvollziehbare Dokumentationen nach dem 4-Phasen-Modell erstellt.
A 3 **Die persönliche Entwicklung reflektieren und vorantreiben**	• Digitale Kompetenzen durch Weiterbildungen in SolidWorks und 3DExperience PLM gezielt erweitert und nach jedem Projekt eine kritische Selbstreflexion mit Massnahmen für die Folgearbeit durchgeführt.
B 4 **Entwicklungsmethoden zur Problemlösung und Innovationsentwicklung im Maschinenbau zielführend einsetzen**	• Entwicklungs- und Entscheidungsmethoden (SCAMPER, Nutzwertanalyse, Präferenzmatrix, Sensitivitätsanalyse) angewandt, Antriebe mit ineinandergreifenden Einflussgrössen ausgelegt, FDM-3D-Druck für Rapid Prototyping gezielt eingesetzt und Informationen aus KI-Tools kritisch mit unabhängigen Quellen abgeglichen.
B 5 **Projekte des Maschinenbaus planen, leiten, ausführen und evaluieren**	• Komplexe Maschinenbau-Projekte (Etikettieranlage, CNC-Feeder, Glasfaser-Umspulanlage) eigenständig von der Initialisierung bis zum Abschluss geplant und geleitet, Kosten und Ressourcen via ERP überwacht sowie Stakeholder- und Risikoanalysen durchgeführt.
B 6 **Innovative Produkte entwickeln**	• Innovative Produkte von der Anforderungsdefinition (Lasten-/Pflichtenheft) bis zur marktgerechten Lösung entwickelt (Etikettieranlage, SLM-Ansaugstutzen) und Sicherheit sowie Zuverlässigkeit mittels systematischer Risikobeurteilung dokumentiert.
B 7 **Baugruppen und Maschinen konstruieren**	• Komplexe Baugruppen mit SolidWorks konstruiert, Systemrandbedingungen vorgängig geklärt, einfache FEM-Simulationen durchgeführt, Lösungen mittels Bewertungsverfahren gewählt und mit dem Auftraggeber validiert sowie die technische Dokumentation erstellt.
B 8 **Produktion planen und optimieren**	• ERP-System lückenlos für Planung, Umsetzung und Überwachung aller Projekte eingesetzt, Fertigungsaufträge vergeben und termingerechte Materialverfügbarkeit vor Montagebeginn sichergestellt.
B 9 **Anlagen montieren, in Betrieb nehmen, betreiben und unterhalten**	• Montagen und Inbetriebnahmen geplant und koordiniert, Maschinentransporte organisiert, Kunden bei Wiederinbetriebnahme unterstützt, Anlagenstörungen systematisch analysiert und jährliche Wartung inklusive Aufgabenverteilung koordiniert.
B 10 **Neue Technologien der Digitalisierung anwenden**	• Projektbezogene Daten (Arbeitsstunden, Kosten, Lieferstatus) via ERP gesammelt und systematisch ausgewertet, um zukünftige Projekte präziser vorzukalkulieren und den Unternehmenserfolg zu verbessern.
B 11 **Nachhaltiges Handeln**	• Nachhaltigkeit der Brauerei Locher AG analysiert (Energieversorgung, Produktion, Transport), Verbesserungspotenziale identifiziert und konkrete Massnahmen zur Steigerung von Energieeffizienz und Kreislaufwirtschaft formuliert.

4 Projektinitialisierung

4.1 Pflichtenheft

Das Pflichtenheft dient dazu, die Anforderungen und Ziele aus dem Projektauftrag des Auftraggebers zu konkretisieren und messbar zu machen. Es dient als vertragliche und organisatorische Basis zwischen dem Auftraggeber, der TEKO und dem Diplomanden.

Kurzvorstellung der Firma

Die VentoStream AG ist ein Windkraftanlagenbauer mit Sitz in Niederdorf, Kanton Basel-Landschaft. Die Firma wurde 2023 als kleines Start-Up aus einer Familienidee gegründet. Aktuell sind mit dem Management zusammen 10 Personen im Unternehmen tätig.

Das Ziel des Unternehmens ist die Entwicklung einer neuartigen, kompakten und hocheffizienten Windturbine zur Stromerzeugung, welche ohne die Nachteile einer herkömmlichen Windkraftanlage funktioniert.

Nach erfolgreichen Tests im Windkanal und dem anstehenden Feldtest der ersten Turbine, soll diese nun tauglich für die Serienfertigung gemacht werden.

Ausgangslage und Entstehung des Themas

Im Zuge der bisherigen Entwicklung der Turbine, lag der Fokus auf Funktion und Leistungsfähigkeit. Im Hinblick auf die geplante Serienfertigung sollen nun die einzelnen Baugruppen konstruktiv vereinfacht und hinsichtlich Herstellungskosten, Gewicht, Montage und Anzahl der benötigten Komponenten optimiert werden.

Zu diesen Baugruppen gehört auch der Leitschaufelkranz (LSK). Die bestehende Konstruktion ist komplex aufgebaut und bringt ein hohes Gewicht mit sich. Aktuell kommen für die Schaufelverstellung vier Servomotoren zum Einsatz, welche mit jeweils zwei Sensoren zur Endlagenüberwachung ausgestattet sind. Dies führt zu einer grossen Anzahl Komponenten und einem dementsprechenden Aufwand bei Beschaffung, Fertigung, Montage und Inbetriebnahme.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll deshalb der bestehende Leitschaufelkranz konstruktiv überarbeitet und auf konzeptioneller Basis für die Serienfertigung optimiert werden. Im Vordergrund steht dabei die Reduktion der Herstell- und Komponentenkosten sowie eine Senkung des Gewichts und eine deutliche Vereinfachung der Konstruktion.

Fachexperte und Projektbeteiligte

Vorname, Name	Stefan Haberthür
Beruf / Funktion	Lead Mechanical Engineer
Rolle	Fachexperte
Firma / Adresse	VentoStream AG / Lampenbergstrasse 12, 4435 Niederdorf
E-Mail	[redacted]
Telefon	

Vorname, Name	Julian Blum
Beruf / Funktion	Polymechaniker
Rolle	Projektleiter
Firma / Adresse	Asytec AG / Kreuzmatte 1b, 6260 Reiden
E-Mail	[redacted]
Telefon	

Vorname, Name	Patrick Baumann
Rolle	Diplomlehrer
E-Mail	[redacted]

Richtziel (Projektziel)

Das Hauptziel der Diplomarbeit ist die konstruktive Optimierung des bestehenden Leitschaufelkranzes mit Fokus auf eine deutliche Reduktion der Herstell- und Komponentenkosten. Die bestehende Konstruktion soll grundsätzlich hinterfragt und vereinfacht werden. Es soll untersucht werden, ob die vier bestehenden Servomotoren durch eine zentralen Antrieb ersetzt werden können. Als Endergebnis soll ein vollständiges 3D-CAD-Konzept der entwickelten Lösung vorliegen.

Aufgabenstellung

Zu Beginn ist die bestehende Konstruktion des LSK zu analysieren. Dabei sollen die konstruktive Komplexität, der bestehende Antriebsmechanismus sowie mögliche Kostentreiber betrachtet werden.

Auf Basis dieser Analyse sind verschiedene Lösungsansätze für die vereinfachte Konstruktion zu entwickeln.

Die erarbeiteten Varianten sollen mit geeigneten Kriterien miteinander verglichen und bewertet werden. Mögliche Bewertungskriterien sind unter anderem Herstellkosten, Anzahl Komponenten, Gewicht, Fertigbarkeit, Montageaufwand, technische Komplexität, Wartbarkeit und Serientauglichkeit.

Aus diesen Varianten soll die ideale ausgewählt und konstruktiv weiterentwickelt werden.

Die Lösungsvariante ist in SolidWorks als 3D-CAD-Modell auszuarbeiten. Das Modell soll so weit detailliert werden, dass die technische Machbarkeit, die Funktion sowie die wesentlichen Fertigungs- und Montageaspekte beurteilt werden können.

Relevante Bauteile und Mechanismen sind durch geeignete technische Berechnungen auszulegen bzw. zu überprüfen. Der Umfang der Berechnungen ist abhängig von der gewählten Variante und den dabei entstehenden Belastungen.

Anforderungen und Erfolgskriterien

Ist-Zustand der Baugruppe

Grösse	Ist-Wert	Quelle
Anzahl Komponenten (Einzelteile total)	*Ca. 250 Einzelteile, ohne Normteile*	Stückliste, gem. Stefan
Anzahl Kaufteile	*Ca. 70 Kaufteile*	Stückliste, gem. Stefan
Anzahl Fertigungsteile	*Ca. 180 Fertigungsteile*	Stückliste, gem. Stefan
Anzahl Motoren	*4 Servomotoren*	Stückliste
Herstellkosten Baugruppe	*Ca. 40'000 CHF, ohne Arbeitsstunden (nur Beschaffung)*	Rechnungen, gem. Stefan
Gewicht Baugruppe	*320 kg*	Wiegung
Montagezeit	*Keine genauen Angaben vorhanden, Schätzung 160 h*	Schätzung Stefan

Optimierungsziele

Nr.	Zielgrösse	Ist	Zielwert	Mindestwert
Z1	**Herstellkosten pro Kranz**	*Ca. 50'000 CHF, (Stundensatz VentoStream intern 85.-)*	*15'000 CHF*	*20'000 CHF*
Z2	**Anzahl Komponenten**	*250*	*120*	*150*
Z3	**Anzahl Antriebe**	*4 Stück*	*1 zentraler Antrieb*	*2 Antriebe*
Z4	**Gewicht**	*320 kg*	*100 kg*	*120 kg*
Z5	**Montageaufwand**	*160 h*	*40 h*	*60 h*

Zu erhaltende Funktionen

Eigenschaft	Anforderung	Muss / Kann
Verstellbereich der Schaufeln	*0 - 45°*	Muss
Synchronität der Schaufeln	*Winkelabweichung Schaufel-Schaufel: 1°*	Muss
Verstell-/Wiederholgenauigkeit	*1°*	Muss
Stell- und Haltemoment	*55 Nm pro Schaufel bei maximaler Windkraft*	Muss
Stellzeit	*90 s (0 - 45°)*	Muss
Fail-Save-Stellung	*Stellung Schaufeln bei Energieausfall: Aktuell nicht vorhanden, idealerweise geschlossen (0°)*	Kann
Montageschnittstellen	*Sind unverändert zu übernehmen*	Muss
Steuerungsanbindung	*Ansteuerung über bestehende Steuerung*	Kann
Geometrie Leitschaufeln	*Anbindung und Lagerung darf geändert werden, Schaufelprofil selbst nicht*	Muss

Konstruktive Randbedingungen

Eigenschaft	Anforderung	Muss / Kann
Bauraum	*Einbauraum in Turbine unverändert*	Muss
Umgebungsbedingungen	*Temperaturbeständigkeit von -30°C bis +80°C*	Muss
Normteile	*Normteile sind gegenüber Sonderteilen zu bevorzugen*	Muss
Herstellbarkeit	*Bauteile sollen mit herkömmlichen, serientauglichen Fertigungsverfahren hergestellt werden können.*	Kann
Detaillierungsgrad Modell	*Komplettes Baugruppenmodell ohne fertigungsreife Einzelbauteilzeichnungen*	Muss

Lieferumfang / Erwartete Ergebnisse

Eigenschaft	Anforderung	Muss / Kann
Analyse und Beurteilung der bestehenden LSK-Konstruktion	*Umfang mindestens eine A4 Seite.*	Muss
Definition der relevanten Anforderungen und Randbedingungen	*Im Pflichtenheft definiert, vom Auftraggeber unterschrieben.*	Muss
Technische Berechnungen	*Mindestens zwei Berechnungen.*	Muss
Lösungsvarianten	*Mindestens zwei Varianten.*	Muss
Nachvollziehbarer Variantenvergleich	*Mindestens 10 Bewertungskriterien.*	Muss
Auswahl und Begründung einer geeigneten Variante	*Begründung auf mindestens einer halben A4 Seite dokumentiert.*	Muss
Vollständiges 3D Modell im CAD ausarbeiten	*Vollständig ausgearbeitetes Modell, alle Geometrien definiert.*	Muss
Betrachtung Fertigungs- und Montagetauglichkeit	*Fertigungs- und Montagetauglichkeit vom Fachexperten schriftlich bestätigt.*	Muss
Beurteilung Gewichts- und Kostenreduktion	*Vergleich der Ist- und Soll-Werte der Baugruppe, schriftlich vom Fachexperten bestätigt. Kostenreduktion abgeschätzte Werte.*	Muss
Grober Kostenvergleich zur bestehenden Konstruktion	*Grober Kostenvergleich via Offerten von Lieferanten-/Fertigungsportalen.*	Kann
Vollständige Dokumentation der Arbeit	*Eine vollständige Dokumentation der Diplomarbeit nach TEKO-Vorgaben liegt am Ende des Diplomarbeitszeitraums physisch und digital vor.*	Muss

Abgrenzung (Nicht-Ziele)

- Keine fertigungsreifen Einzelteilzeichnungen / keine vollständige Zeichnungsableitung aus dem CAD-Modell
- Kein Bau eines Prototyps, keine Erprobung am realen Teil
- Keine Arbeit an der Steuerung und/oder Software. Keine Auslegung der Regelung des Antriebs.
- Keine detaillierte Kostenkalkulation
- Keine Lieferantenwahl oder Beschaffung von Teilen
- Keine Arbeit an anderen Baugruppen / Bauteilen der Turbine

Rahmenbedingungen

Rahmenbedingung	Angabe
Zeitrahmen	*14.09.2026 bis 09.11.2026 (8 Wochen) / 240 Std. gemäss Vorgaben Studiengang*
CAD-System	*SolidWorks*
Ausgangsbasis	*STEP-Modell bestehende LSK-Konstruktion, Zeichnungen, Angaben zum Ist-Zustand der Baugruppe*
Bauraum	*Einbauraum unverändert zu übernehmen*
Betriebsbedingungen	*Atmosphärische Luft / Temperatur -30°C bis +80°C / ein Jahr Einsatzdauer je Wartung*
Verfügbare Unterlagen	*Firmen-Projektbeschrieb / Unterlagen Diplomarbeit TEKO (Termine, Bewertung, Rahmenbedingungen)*

Meilensteine und Termine

Meilenstein	Termin
Start Diplomarbeit	*14. September 2026*
1. Vorzeigetermin	*KW40 (28.09.2026-04.10.2026), gemäss Diplomlehrer*
2. Vorzeigetermin	*KW42 (12.10.2026-18.10.2026), gemäss Diplomlehrer*
Abgabe Diplomarbeit	*09. November 2026, 18:00 Uhr*
Onlinepublikation freigeben	*19. November 2026, 18:00 Uhr*
Präsentation	*20./21. November 2026, gemäss Abteilungsvorstand TEKO*

Verwendete Grundlagen und firmenspezifische Vorlagen

- 20260810_Projektbeschrieb_Optimierung LSK_Julian Blum / VentoStream AG

Das genehmigte und von allen Parteien unterschriebene ***Pflichtenheft*** sowie der ***Projektbeschrieb*** ist dem Anhang beigefügt.

4.2 Woraus ist die Idee für das Thema Diplomarbeit entstanden?

Auf der Suche nach einem Thema für die Diplomarbeit bin ich durch einen privaten Kontakt mit der Firma VentoStream in Berührung gekommen. Der Gedanke die Diplomarbeit für ein innovatives Start-Up im Bereich der erneuerbaren Energien durchführen zu dürfen und meinen Beitrag für eine marktreife Lösung ihrer Windkraftturbine zu leisten, begeisterte mich natürlich sofort. Nach einer ersten Kontaktaufnahme konnte mir die Firma rasch drei mögliche Themen liefern, die ich im Rahmen der Diplomarbeit behandeln könnte. Dass für mich die Wahl auf die Optimierung des Leitschaufelkranzes fiel, hatte mehrere Gründe:

- Grosses Optimierungspotential der bestehenden Konstruktion
- Starke Reduktion der Komplexität, Herstellungskosten, sowie Montagetauglichkeit möglich
- Chance zur Umsetzung in der Realität von allen drei Themen am höchsten
- Bringt der Firma echten Mehrwert, durch die Lösung eines zeit- und kostenintensiven Problems hinsichtlich der Serienfertigung
- Die Erarbeitung von optimierten, konstruktiven Lösungen motiviert mich.

Die beiden anderen Themen wären die Überprüfung der Möglichkeit zum Metall-3D-Druck der Turbinenschaufeln, sowie die Herstellung der Verschalung der Turbine gewesen.

4.3 Marktanalyse

Ein Leitschaufelkranz ist ein Bauteil in Turbinen, Verdichtern oder Pumpen, dass das durchströmende Medium im optimalen Winkel auf das nachfolgende Schaufelrad leitet. Durch die optimierte Anströmung wird der Wirkungsgrad der Maschine stark verbessert.

In modernen Gas- und Wasserkraftwerken, sowie Abgasturboladern sind die Leitschaufeln verstellbar ausgeführt. Dadurch kann der Anströmwinkel je nach Gegebenheit dynamisch verändert werden. Wenn z.B. weniger Gas oder Wasser verfügbar ist, verengen die verstellbaren Schaufeln den Querschnitt und beschleunigen das Medium so, dass es weiterhin im optimalen Winkel auf das nachfolgende Schaufelrad trifft. Auch dient der Kranz zur Leistungsregelung, indem er die Menge des durchfliessenden Mediums regulieren kann. Bei Abgasturboladern dienen die verstellbaren Leitschaufeln (VTG) zur künstlichen Erhöhung der Abgasgeschwindigkeit in unteren Drehzahlen und damit der Eliminierung des sogenannten Turbolochs.

Auch die neuartige Windkraftturbine der VentoStream AG nutzt verstellbare Leitschaufeln zur optimalen Anströmung des darauffolgenden Schaufelrads, je nach Windgeschwindigkeit.

Bei bestehenden Turbinenkonzepten erfolgt die Verstellung der Leitschaufeln meist über einen einzelnen Aktuator, der eine lineare Bewegung, durch einen damit verbundenen Drehring, in eine Drehbewegung umwandelt. Mit diesem Drehring wiederum sind die Leitschaufelhebel mittels Koppelstangen verbunden. Diese Hebel wiederum sitzen direkt auf der Achse der Leitschaufeln und verstellen diese bei einer Drehung des Drehrings im Winkel.

Bei der aktuellen Konstruktion von VentoStream erfolgt die Verstellung durch vier einzelne Platten, welche mit vier einzelnen Motoren axial nach vorne geschoben werden und dann mittels angebrachter Hebel die Linearbewegung der Platten in eine Drehbewegung zur Verstellung des Winkels der Leitschaufeln umwandeln.

Durch diesen Mechanismus werden deutlich mehr Bauteile benötigt als bei einer Verstellung mittels Drehbewegung wie bei einer Wasser- oder Gasturbine. Für die Ausarbeitung einer neuen Lösung ist sicherlich auf solch eine Ansteuerung per Drehbewegung, statt Linearbewegung zu setzen.



Bild 2: Verstellmechanismus Flusskraftwerk Matte, Quelle: www.ewb.ch

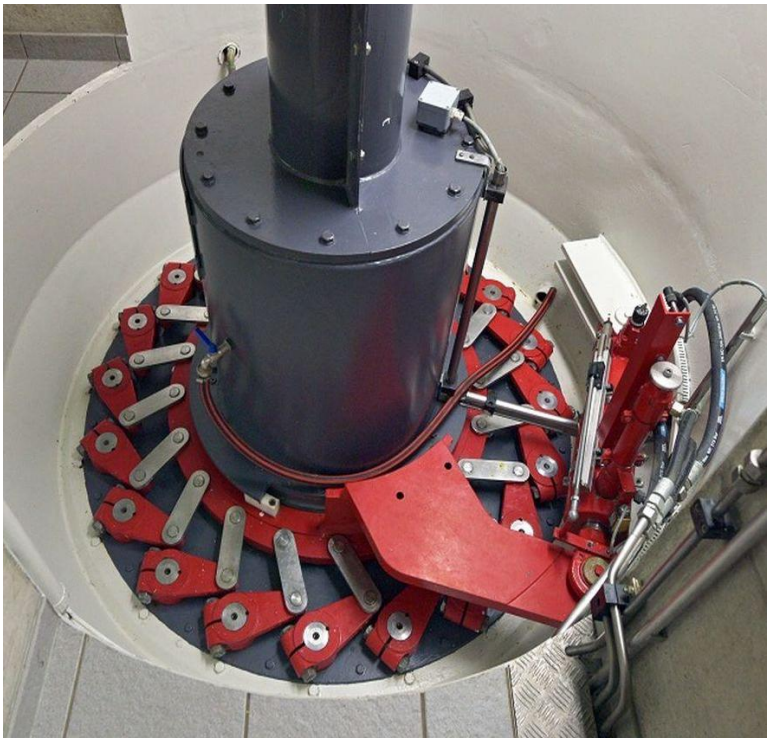


Bild 1: Verstellmechanismus Kraftwerk Sylvenstein I, Quelle: www.landeskraftwerke.bayern

4.4 Zielscheibe

Die Zielscheibe dient dazu, die Ziele der Diplomarbeit visuell so darzustellen, dass sie auf einen Blick erfasst werden können. Sie ist ein hilfreiches Werkzeug, um sich einen schnellen Überblick über die Ziele des Projekts zu schaffen.

Zielscheibe LSK

Richtziel: Eine vollständiges 3D-CAD-Lösungskonzept zur Optimierung des Leitschaufelkranzes liegt bis zum 09.11.2026 um 18:00 Uhr vor und ist gemäss den Richtlinien der TEKO vollständig dokumentiert.

Endergebnisse

1. **Optimiertes, serientaugliches 3D-CAD-Lösungskonzept des bestehenden Leitschaufelkranzes mit folgenden Eigenschaften:**
   1. Zentraler Antrieb statt vier Einzelne
   2. Reduzierte Anzahl Komponenten
   3. Reduziertem Gesamtgewicht
   4. Geringeren Herstellungskosten
2. **Eine schriftliche Projektdokumentation, gebunden im A4-Format sowie als PDF, über die Optimierung des Leitschaufelkranzes mit folgenden Inhalten:**
   1. Management Summary
   2. Kurzer beruflicher Lebenslauf
   3. Qualifikationsprofil
   4. Projektinitialisierung
   5. Projektplanung
   6. Projektrealisierung
   7. Ausarbeitung der Variante
   8. Projektabschluss
   9. Eigenständigkeitserklärung
   10. Verzeichnisse
   11. Anhang

Kunde

- **Auftraggeber:** Patrick Baumann (Diplomlehrer, TEKO Olten)
- **Fachexperte:** Stefan Haberthür (Lead Mechanical Engineer, VentoStream AG)
- **Endkunde:** VentoStream AG

Sinn und Zweck

Eine bestehende Baugruppe (Leitschaufelkranz) soll kostengünstiger, leichter, mit weniger Komponenten sowie serientauglicher gestaltet werden.

Der Nutzen für den Endkunden: geringere Herstell- und Montagekosten bei gleichbleibender Funktion der Baugruppe.

Erfolgskriterien

1. **Das Lösungskonzept erfüllt die Optimierungsziele und hält die konstruktiven Randbedingungen und zu erhaltenden Funktionen ein:**
   - 1.1. Herstellkosten maximal 20'000 CHF
   - 1.2. Maximal 150 Komponenten
   - 1.3. Maximal zwei einzelne Antriebe
   - 1.4. Gewicht der Baugruppe höchstens 120 kg
   - 1.5. Montageaufwand maximal 60 Stunden
   - 1.6. Verstellbereich Schaufeln 0-45 Grad
   - 1.7. Winkelabweichung und Wiederholgenauigkeit von 1 Grad
   - 1.8. Stell- und Haltemoment mindestens 55 Nm pro Schaufel
   - 1.9. Stellzeit 0-45 Grad maximal 90 Sekunden
   - 1.10. Montageschnittstellen unverändert übernehmen
   - 1.11. Schaufelprofil unverändert übernehmen
   - 1.12. Einbauraum in Turbine ist unverändert
   - 1.13. Temperaturbeständigkeit Komponenten -30°C bis +80°C
   - 1.14. Normteile sind zu bevorzugen
   - 1.15. Komplettes Baugruppenmodell ohne fertigungsreife Einzelzeichnungen
2. **Die Dokumentation entspricht den geforderten Richtlinien und ist ohne zeitlichen Verzug dem Verantwortlichen abgegeben.**
   - 2.1. Dokumentation enthält mindestens zwei Lösungsvarianten
   - 2.2. Dokumentation enthält Evaluation der geeignetsten Variante mittels Präferenzmatrix, Nutzwertanalyse und Sensitivitätsanalyse
   - 2.3. Dokumentation begründet auf mindestens einer halben A4 Seite die Wahl der favorisierten Variante
   - 2.4. Dokumentation beschreibt die Ausarbeitung der favorisierten Variante
   - 2.5. Dokumentation beinhaltet die Beurteilung der favorisierten Variante mittels SWOT-Analyse, Risiko-Analyse, Kosten-Nutzen-Analyse und einem Expertenbericht.

4.5 Stakeholder-Analyse

Die Stakeholder-Analyse dient dazu, herauszufinden, welche Personen und Interessensgruppen das Projekt beeinflussen können oder direkt vom davon betroffen sind. Es wird analysiert, wer die Stakeholder sind, was ihre Rolle / Funktion beim Projekt ist, wie sie vom Projekt betroffen sind, ob ihre Einstellung gegenüber dem Projekt positiv oder negativ ist, wie hoch ihr Einfluss auf das Projekt ist, welche Argumente es für eine Unterstützung des Projekts für sie gibt und welche Massnahme nötig sind, um sie für das Projekt zu gewinnen.

Stakeholder	Rolle/Funktion	Betroffenheit	Positiv/ Negativ	Einfluss	Argumente	Massnahmen
Stefan Haberthür	Lead Mechanical Engineer, VentoStream AG Fachexperte für die Diplomarbeit	• Betreut Diplomand auf der Seite des Endkunden während der Diplomarbeit • Liefert Projektauftrag und für die Ausführung nötige Dateien und Informationen • Bewertet die erarbeitete Lösung aus Sicht der VentoStream AG • Muss Zeit aufwenden für Betreuung des Diplomanden	Positiv	Hoch, gibt Inhalt der Diplomarbeit vor, hat hohen Einfluss auf die Note durch seine Bewertung am Schluss der Diplomarbeit	• Zeitersparnis durch ausgelagerte, externe Optimierung einer bestehenden Baugruppe • Kann sich anderen offenen Punkten bei der Entwicklung der Turbine widmen	• Regelmässige Projektstatusberichte, um über die getroffenen Entscheidungen und Lösungsideen zu informieren
VentoStream AG	Endkunde	• Das Lösungskonzept wird für ihre Windkraftturbine entwickelt • Stellt personelle Ressourcen zur Verfügung (Stefan Haberthür)	Positiv	Hoch, sind interessiert an einer guten Lösung, da sie personelle Ressourcen und Zeit auf ihrer Seite in das Projekt investieren	• Kosten- und Ressourcenersparnis durch unentgeltliche Entwicklung einer serientauglichen Baugruppenlösung für ihre Turbine	• Information über mögliche Lösungsideen erfolgt via Stefan H. • Vorstellung des erarbeiteten Lösungskonzepts
Patrick Baumann	Diplomlehrer	• Betreut Diplomanden auf schulischer Seite während der Diplomarbeit • Gibt die Rahmenbedingungen basierend auf den Richtlinen der TEKO für die Diplomarbeit vor	Positiv	Hoch, Verfügbarkeit bei Fragen ist sehr wichtig für die Diplomarbeit, hat hohen Einfluss auf die Note durch seine Bewertung	• Betreuter Diplomand kommt zu einem erfolgreichen Abschluss der HF • Bei gutem Lösungskonzept gute Publicity für die TEKO Olten	• Wöchentliche Projektstatusberichte • Gut vorbereitete Vorzeigetermin-Sitzungen • Rechtzeitig melden bei allfällig auftauchenden Problemen

		• Pflicht-Vorzeigetermine über Stand der Arbeit finden mit ihm statt • Liefert offizielle Aufgabenstellung auf Seite der TEKO für die Diplomarbeit				
Ruedi Haller	Prüfungsexperte	• Bewertet die Diplomarbeit abschliessend an der Präsentation • Entscheidet auf Seite der Schule, ob die Arbeit als bestanden gilt oder nicht	neutral	Hoch, hat hohen Einfluss auf die Note und das Bestehen der Diplomarbeit	• Eine gute, nachvollziehbare Arbeit erleichtert die faire Beurteilung • Einblick in ein praxisnahes, innovatives Entwicklungsprojekt im Bereich der erneuerbaren Energien	• Gut vorbereitete Präsentation • Anschauungsmaterial an der Präsentation, evtl. 3D-Druck Prototyp
Asytec AG	Arbeitgeber Diplomand	• Stellt Zeit zur Verfügung für die Diplomarbeit • Stellt Softwarelizenz für SolidWorks zur Verfügung	Eher positiv	Mittel, stellt Ressourcen zur Verfügung, welche die Diplomarbeit erleichtern	• Ich kann die HF, die sie zum Teil bezahlt haben, erfolgreich abschliessen • Mein Abschluss bringt der Firma einen Mitarbeiter mit höherer Qualifikation • Bei gutem Lösungskonzept evtl. weitere, monetarisierte Zusammenarbeit mit VentoStream AG möglich (ausgearbeitete Fertigungszeichnungen)	• Gelegentliches informieren über den aktuellen Stand der Diplomarbeit • Zur Verfügung gestellte Zeit optimal nutzen, um früh wieder verfügbar zu sein für Projekte der Asytec AG

5 Projektplanung

5.1 Projekttyp

Bei dem Projekt handelt es sich am ehesten um ein Potenzialprojekt.

Potenzialprojekte sind neuartige Projekte bei gleichzeitig überschaubarer Komplexität. Typisch dafür ist genau ein solches Optimierungsprojekt wie diese Diplomarbeit, welches das Potential einer Sache prüfen soll und woraus dann ein Konzept zum Aufzeigen einer möglichen Lösung entstehen soll. Folgende Gründe treffen spezifisch auf die Arbeit zu:

- **Offene Lösungsfragen:** Ob vier einzelne Antriebe durch einen zentralen Antrieb ersetzt werden können und ob die Anzahl Komponenten, das Gewicht, die Herstellungskosten, sowie die Montagezeit so drastisch gesenkt werden können, sind Annahmen, die im Rahmen dieser Diplomarbeit erst noch geprüft werden müssen.
- **Konzept statt Realisierung:** Das Endergebnis ist ein 3D-CAD-Konzept, das dem Endkunden eine mögliche Lösung für sein Problem aufzeigt. Die Umsetzung dieser Lösung liegt in seiner Hand und findet nicht im Rahmen dieser Diplomarbeit statt.
- **Begrenzte Komplexität:** Der Grossteil der Arbeit findet allein statt mit je einer Ansprechperson auf Seite des Endkunden und der TEKO. Die Stakeholder begrenzen sich auf fünf betroffene Parteien.

5.2 Vorgehensmodell

Die Projektplanung richtet sich bei dieser Diplomarbeit nach dem 4-Phasen-Modell (Wasserfall mit Meilensteinen). Grund dafür ist, dass die Termine fix vorgegeben sind (Zeitraum der Diplomarbeit), ich die Arbeit allein ausführe und die einzelnen Schritte alle aufeinander aufbauen. Als Beispiel: Ohne Ist-Analyse keine Lösungsvarianten, ohne Lösungsvarianten kein CAD-konzept.

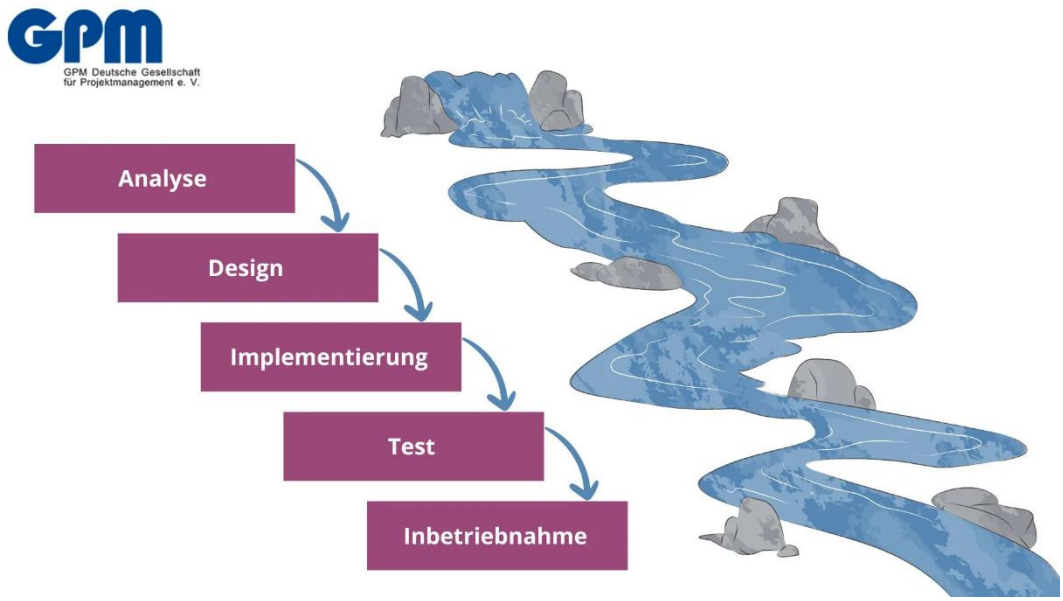


Bild 3: Visualisierung Wasserfall-Modell, Quelle: www.gpm-ipma.de

5.3 Projektstrukturplanung

Bei der Projektstrukturplanung wird das Projekt in einzelne, kleinere Arbeitspakete aufgeteilt und visuell dargestellt. Der nachfolgende Strukturbaum ist im 4-Phasen-Modell aufgebaut, ist aber zusätzlich zur besseren Visualisierung bei der Projektrealisierung in zwei Stränge aufgeteilt.

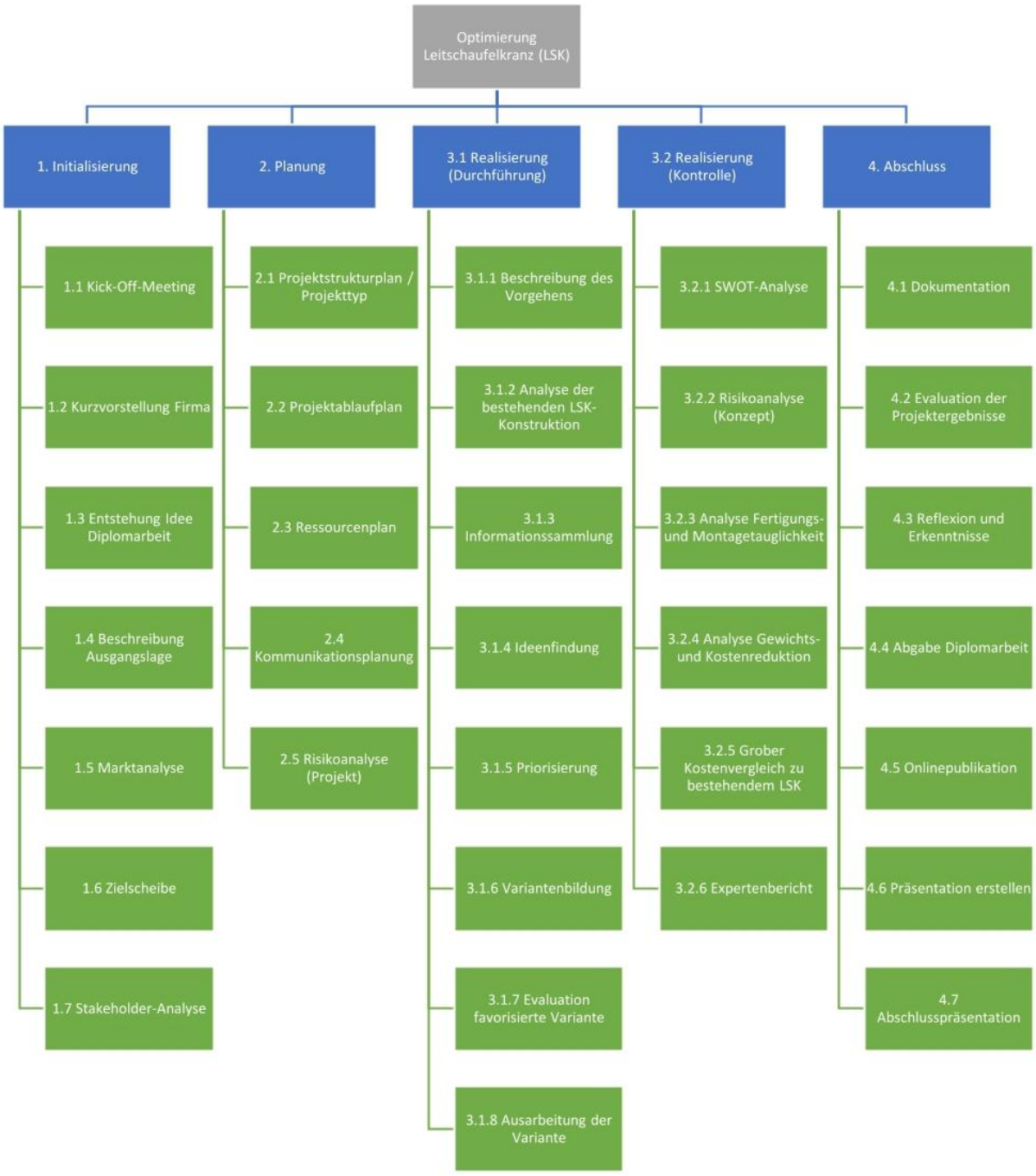
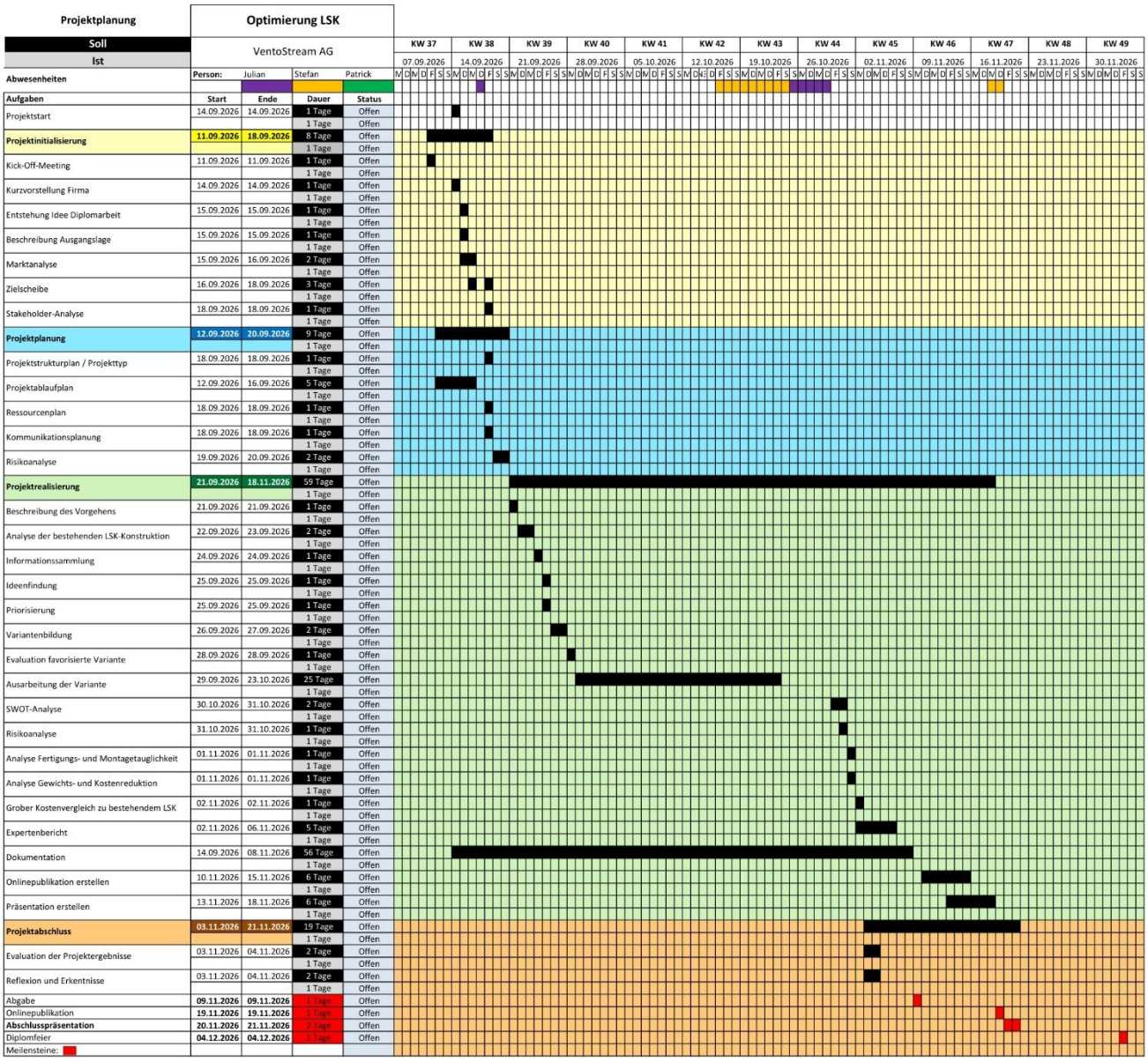


Diagramm 1: Projektstrukturplan

5.4 Projektablaufplanung

Der Projektablaufplan basiert auf den einzelnen Arbeitspaketen des Projektstrukturplans vom vorangehenden Kapitel. Zu den einzelnen Arbeitspaketen wird nun ungefähr der zeitliche Aufwand abgeschätzt. Visuell dargestellt wird das Ganze in Form eines Gantt-Diagramms. Das Diagramm enthält die einzelnen Arbeitspakete, die Abwesenheiten der beteiligten Personen, den Status des Arbeitspakets, eine integrierte Soll-Ist-Planung zu jedem Arbeitspaket, sowie die wichtigsten Meilensteine.



Projektplanung	Optimierung LSK			
Soll / Ist	VentoStream AG			
Abwesenheiten	Person:	Julian	Stefan	Patrick
Aufgaben	Start	Ende	Dauer	Status
Projektstart	14.09.2026	14.09.2026	1 Tage	Offen
Projektinitialisierung	**11.09.2026**	**18.09.2026**	8 Tage	Offen
Kick-Off-Meeting	11.09.2026	11.09.2026	1 Tage	Offen
Kurzvorstellung Firma	14.09.2026	14.09.2026	1 Tage	Offen
Entstehung Idee Diplomarbeit	15.09.2026	15.09.2026	1 Tage	Offen
Beschreibung Ausgangslage	15.09.2026	15.09.2026	1 Tage	Offen
Marktanalyse	15.09.2026	16.09.2026	2 Tage	Offen
Zielscheibe	16.09.2026	18.09.2026	3 Tage	Offen
Stakeholder-Analyse	18.09.2026	18.09.2026	1 Tage	Offen
Projektplanung	**12.09.2026**	**20.09.2026**	9 Tage	Offen
Projektstrukturplan / Projekttyp	18.09.2026	18.09.2026	1 Tage	Offen
Projektablaufplan	12.09.2026	16.09.2026	5 Tage	Offen
Ressourcenplan	18.09.2026	18.09.2026	1 Tage	Offen
Kommunikationsplanung	18.09.2026	18.09.2026	1 Tage	Offen
Risikoanalyse	19.09.2026	20.09.2026	2 Tage	Offen
Projektrealisierung	**21.09.2026**	**18.11.2026**	59 Tage	Offen
Beschreibung des Vorgehens	21.09.2026	21.09.2026	1 Tage	Offen
Analyse der bestehenden LSK-Konstruktion	22.09.2026	23.09.2026	2 Tage	Offen
Informationssammlung	24.09.2026	24.09.2026	1 Tage	Offen
Ideenfindung	25.09.2026	25.09.2026	1 Tage	Offen
Priorisierung	25.09.2026	25.09.2026	1 Tage	Offen
Variantenbildung	26.09.2026	27.09.2026	2 Tage	Offen
Evaluation favorisierte Variante	28.09.2026	28.09.2026	1 Tage	Offen
Ausarbeitung der Variante	29.09.2026	23.10.2026	25 Tage	Offen
SWOT-Analyse	30.10.2026	31.10.2026	2 Tage	Offen
Risikoanalyse	31.10.2026	31.10.2026	1 Tage	Offen
Analyse Fertigungs- und Montagetauglichkeit	01.11.2026	01.11.2026	1 Tage	Offen
Analyse Gewichts- und Kostenreduktion	01.11.2026	01.11.2026	1 Tage	Offen
Grober Kostenvergleich zu bestehendem LSK	02.11.2026	02.11.2026	1 Tage	Offen
Expertenbericht	02.11.2026	06.11.2026	5 Tage	Offen
Dokumentation	14.09.2026	08.11.2026	56 Tage	Offen
Onlinepublikation erstellen	10.11.2026	15.11.2026	6 Tage	Offen
Präsentation erstellen	13.11.2026	18.11.2026	6 Tage	Offen
Projektabschluss	**03.11.2026**	**21.11.2026**	19 Tage	Offen
Evaluation der Projektergebnisse	03.11.2026	04.11.2026	2 Tage	Offen
Reflexion und Erkentnisse	03.11.2026	04.11.2026	2 Tage	Offen
Abgabe	**09.11.2026**	**09.11.2026**	1 Tage	Offen
Onlinepublikation	**19.11.2026**	**19.11.2026**	1 Tage	Offen
Abschlusspräsentation	**20.11.2026**	**21.11.2026**	2 Tage	Offen
Diplomfeier	**04.12.2026**	**04.12.2026**	1 Tage	Offen
Meilensteine:				

Diagramm 2: Gantt-Diagramm Projektablaufplan Soll-Werte

5.5 Ressourcenplan

Der Ressourcenplan in diesem Kapitel gibt eine kurze Übersicht über die beteiligten Personen und materiellen Ressourcen, sowie deren Abwesenheiten oder Nicht-Verfügbarkeit. Er dient dazu das Projekt logistisch zu steuern und im Voraus bekannte Abwesenheiten in die Planung aufzunehmen.

Person / materielle Ressource	Abwesenheiten / Nicht-verfügbarkeit
Julian Blum	- 17.09.2026, ganztägig - 25.10. - 29.10.2026, Ferien, ganztägig
Stefan Haberthür	- 16.10. – 25.10.2026, Ferien, ganztägig - 18.11. – 19.11.2026, ganztägig
Patrick Baumann	- Ferien im Herbst, jedoch online erreichbar -> keinen Einfluss auf das Projekt
SolidWorks-CAD-Lizenz	- Durchgängig verfügbar lokal bei Asytec AG

5.6 Kommunikationsplanung / Projektüberwachung

Die Kommunikationsplanung dient dazu, dass sämtliche Interessensgruppen beim Projekt die für sie relevanten Informationen zum richtigen Zeitpunkt erhalten. Erst werden alle Interessensgruppen analysiert, dann der Inhalt der Kommunikation definiert, der Intervall der Kommunikation festgelegt, definiert über welchen Kanal die Kommunikation stattfindet und wer für die Kommunikation der einzelnen Inhalte verantwortlich ist.

Interessensgruppe	Inhalt	Intervall	Kanal	Verantwortlichkeit
Stefan Haberthür (Fachexperte)	Projektstatusbericht	wöchentlich	E-Mail	Julian Blum
	Projektfortschritt	in der Realisierungsphase alle zwei Wochen	E-Mail, telefonisch, persönlich	Julian Blum
	technische Unterstützung	bei Bedarf	E-Mail, telefonisch, persönlich	Julian Blum
	Expertenbericht	einmalig, KW45	PDF-Dokument per E-Mail	Stefan Haberthür
Patrick Baumann (Diplomlehrer)	Projektstatusbericht	wöchentlich	E-Mail	Julian Blum
	Vorzeigetermine	KW40 und KW42	Microsoft Teams Sitzung	Julian Blum
	Beantwortung von Fragen	bei Bedarf	Microsoft Teams, E-Mail	Julian Blum
	Abschlusspräsentation	einmalig, 20. oder 21.11.26	persönlich	Julian Blum
VentoStream AG (Endkunde)	Projektfortschritt	bei Bedarf	E-Mail, telefonisch, persönlich	Stefan Haberthür
	Vorstellung Lösungskonzept	einmalig, KW45	persönlich	Julian Blum
Ruedi Haller (Prüfungsexperte)	Abschlusspräsentation	einmalig, 20. oder 21.11.26	persönlich	Julian Blum
Asytec AG	Projektfortschritt	bei Bedarf	persönlich	Julian Blum

5.7 Risikoanalyse

Die Risikoanalyse der Diplomarbeit dient dazu, verschiedene mögliche Risiken und deren Auswirkungen für die Durchführung der Arbeit bereits vor Beginn zu eruieren. Im Rahmen einer Präventionsstrategie wird anschliessend versucht, die Eintretenswahrscheinlichkeit der einzelnen Risiken mit gezielten Gegenmassnahmen auf ein vertretbares Niveau zu senken. Die identifizierten Risiken werden nummeriert, in der Tabelle beschrieben und dazu die Wahrscheinlichkeit des Eintretens definiert. Anschliessend wird evaluiert, was die schlimmstmögliche Auswirkung beim Eintreten wäre und die Höhe des Schadensmasses festgelegt.

Risikotabelle						
Nr.	Risiko beschreiben	Eintretenswahr-scheinlichkeit 1-4 (tief-hoch)	schlimmstmögliche Auswirkung	Schadensmass 1-4 (tief-hoch)	Massnahmen	Eintretenswahr-scheinlichkeit nach Massnahmen 1-4 (tief-hoch)
1	Projektverzögerung durch ungeplante Abwesenheiten / unvorhergesehenen Ausfällen (Krankheit) der Projekt-betroffenen Parteien	sehr gross (3)	Offene Punkte und Fragen können nicht rechtzeitig geklärt werden, Dokumentation kann nicht vollständig zum definierten Termin abgegeben werden	gross (3)	Zeitlichen Puffer schaffen, Offene Punkte notieren und bei frühstmöglichem Termin klären, durch andere Personen Hilfe holen	gross (2)
2	Defekter Laptop	gross (2)	Diplomarbeits-Dateien gehen verloren, keine Abgabe der Dirplomarbeit möglich	sehr gross (4)	Daten zusätzlich zum lokalen Speicher in der Cloud sowie auf einem USB-Stick sichern	unwahrscheinlich (1)
3	Winkraftturbine funktioniert nicht und Projekt wird eingestampft	gross (2)	Projektarbeit hat keine Relevanz mehr, keine Betreuung und Bewertung durch den Fachexperten mehr, Diplomarbeit kann nicht vollständig abgegeben werden	gross (3)	Frühzeitig reagieren, mit Diplomlehrer neuen Fachexperten definieren (z.B. von Asytec AG), der die Diplomarbeit in einem Expertenbericht bewertet	unwahrscheinlich (1)
4	Lösungskonzept ist schwerer als Zielvorgabe	sehr gross (3)	Optimierungsziel wird nicht erreicht, schlechte Bewertung des Lösungskonzepts durch den Fachexperten, Diplomarbeit erhält schlechte Note	gross (3)	Regelmässiger Austausch mit Fachexperten und beim Ausarbeiten jedem neuen Teil sofort das richtige Material zuordnen, um einen Überblick über die Masse der Baugruppe im CAD zu haben	gross (2)
5	Lösungskonzept ist teurer als Zielvorgabe	gross (2)	Optimierungsziel wird nicht erreicht, schlechte Bewertung des Lösungskonzepts durch den Fachexperten, Diplomarbeit erhält schlechte Note	gross (3)	Regelmässiger Austausch mit Fachexperten und bei Wahl der Komponenten Preis in einer groben Übersichtstabelle notieren um einen Überblick über die Komponentenkosten zu haben	gross (2)
6	Lösungskonzept hat mehr Komponenten als Zielvorgabe	gross (2)	Optimierungsziel wird nicht erreicht, schlechte Bewertung des Lösungskonzepts durch den Fachexperten, Diplomarbeit erhält schlechte Note	gross (3)	Regelmässige Überprüfung der Anzahl Komponenten im CAD, früh reagieren und Alternative Lösungen für Bauteile suchen wenn eine massive Überschreitung der Anzahl absehbar ist	unwahrscheinlich (1)
7	Lösungskonzept ist sehr aufwändig zum Montieren	gross (2)	Optimierungsziel wird nicht erreicht, schlechte Bewertung des Lösungskonzepts durch den Fachexperten, Diplomarbeit erhält schlechte Note	gross (3)	Regelmässiger Austausch mit Fachexperten und Asytec Mitarbeitern im Engineering und der Montage um auf deren Fachwissen und Expertisen zurückzugreifen für die Vereinfachung der Baugruppe	unwahrscheinlich (1)
8	SolidWorks-CAD-Lizenz ist nicht verfügbar	gross (2)	3D-CAD-Lösungskonzept kann nicht ausgearbeitet werden, Diplomarbeit kann nicht abgegeben werden	sehr gross (4)	Lizenzverfügbarkeit bei Asytec zu Beginn des Projekts sicherstellen, notfalls mit bechtle-plm Alternativlösung für Kurzlizenz im Zeitrahmen der Diplomarbeit suchen	unwahrscheinlich (1)
9	Technische Berechnungen sind fehlerhaft	sehr gross (3)	Die ausgearbeitete Lösungsvariante ist durch die fehlerhaften Berechnungen nicht brauchbar, schlechte Bewertung vom Fachexperten, Diplomarbeit nicht bestanden	sehr gross (4)	Berechnungen früh genug von Fachexperten, Diplomlehrer und allenfalls Asytec Mitarbeitern prüfen lassen und notfalls korrigieren	unwahrscheinlich (1)
10	CAD stürzt ab	sehr gross (3)	Kompletter ungesicherter Arbeitsfortschritt geht verloren, Verzögerung des Projekts	wesentlich (2)	Daten alle 15 Minuten lokal und im PDM sichern	gross (2)
11	Lösungskonzept ist im vorgegeben Bauraum nicht umsetzbar	gross (2)	Lösungskonzept ist nicht zu gebrauchen, schlechte Bewertung des Fachexperten, Diplomarbeit nicht bestanden	sehr gross (4)	Baugrösse von Anfang an bei der Ausarbeitung des Konzepts im CAD beachten und notfalls einzelne Bauteile anders konstruieren	unwahrscheinlich (1)

12	Winkelabweichungen zu gross durch Toleranzkette über 20 Schaufelblätter	sehr gross (3)	Lösungskonzept ist nicht zu gebrauchen, schlechte Bewertung des Fachexperten, Diplomarbeit nicht bestanden	sehr gross (4)	Die Schaufelblätter beim Lösungskonzept nicht in Reihe ansteuern, sodass gar keine Toleranzkette entstehen kann	unwahrscheinlich (1)
13	Umgebungseinflüsse wie Temperaturbereich, Staub, Dreck oder Feuchtigkeit werden nicht beachtet	gross (2)	Schlechte Bewertung des Fachexperten, keine gute Note bei der Diplomarbeit	gross (3)	Umgebungseinflüsse bei der Auswahl der Komponenten und bei der Wahl der Materialien von Anfang an beachten	unwahrscheinlich (1)
14	Daten von Ventostream (Zeichnungen, STEP-Files) sind unvollständig	gross (2)	Grosse Verzögerungen durch Datenbeschaffung	wesentlich (2)	Daten frühzeitig anfordern, kontrollieren und allenfalls nachhaken	unwahrscheinlich (1)
15	Grosse Arbeitsauslastung von Asytec AG, keine Zeit für Diplomarbeit zur verfügung	unwahrscheinlich (1)	Diplomarbeit kann zeitlich nicht abgeschlossen werden, Diplomarbeit kann nicht vollständig abgegeben werden	sehr gross (4)	Arbeitsauslastung via Projektjahresplan frühzeitig evaluieren, zeitliche Verfügbarkeit während der Diplomarbeit mit Vorgesetztem klären und Diplomarbeitszeit als Abwesenheit in der Ressourcenplanung von Asytec deklarieren	unwahrscheinlich (1)
16	Grosse Fehleinschätzungen beim Arbeitsaufwand im Projektablaufplan	unwarscheinlich (1)	Diplomarbeit kann zeitlich nicht abgeschlossen werden, Diplomarbeit kann nicht vollständig abgegeben werden	sehr gross (4)	Arbeitsaufwand nach jeder Session die geloggt wird live via extra erstelltem Dashboard überwachen und bei grossen Abweichungen Massnahmen bei der Planung treffen	unwahrscheinlich (1)
17	Schwierigkeitsgrad der Diplomarbeit wird als zu tief eingeschätzt	sehr gross (3)	Schlechte Bewertung der Diplomarbeit, Diplomarbeit wird nicht bestanden	sehr gross (4)	Diplomarbeit sehr ausführlich ausarbeiten, möglichst tiefgehende Analysen und viele Projektleitungswerkzeuge anwenden, frühzeitig Rücksprache halten mit Diplomlehrer	unwahrscheinlich (1)
18	Ventostream gibt die Dokumentation oder die Onlinepublikation zwecks Vertraulichkeit nicht frei	gross (2)	Diplomarbeit und Onlinepublikation können nicht abgegeben werden, Diplomarbeit nicht bestanden	sehr gross (4)	Dokumentation und Onlinepublikation frühzeitig an VentoStream zur Freigabe schicken, notfalls Anpassungen an den Dokumenten vornehmen	unwahrscheinlich (1)

Anhand der Eintretenswahrscheinlichkeit und des Schadensmasses werden die verschiedenen Risiken mit ihrer Nummer in der 16er-Matrix eingetragen. Anhand dieser Matrix ist visuell sehr gut ersichtlich, welche Risiken den Erfolg des Projekts extrem gefährden, und welche weniger Beachtung benötigen.

Wie man bei der 16er-Matrix rechts sehen kann, benötigen die Punkte 9, 12 und 17 besondere Aufmerksamkeit bei diesem Projekt. Der rote Bereich bedeutet eine akute Bedrohung für den Erfolg des Projekts.

Auch die Risiken im orangen Bereich sind signifikant und nicht dauerhaft tolerierbar, das Treffen von Massnahmen zur Senkung der Bedrohung ist auch da unabdingbar.

Die gelbe Zone bedeutet, dass die Risiken zwar beobachtet werden sollten und nach Möglichkeit auch da Massnahmen zur Prävention getroffen werden sollten, sie jedoch das Projekt nicht direkt existenziell bedrohen.

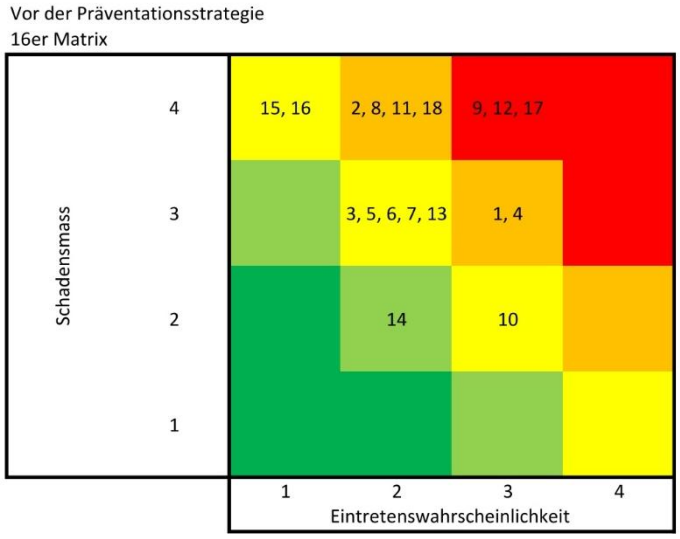


Bild 4: 16er Matrix vor Prävention

Nach dieser ersten Einordnung wird nun zu jedem Risiko eine passende Gegenmassnahme zur Prävention definiert. Danach wird die Eintretenswahrscheinlichkeit nochmals neu untersucht und die Risiken mit den neuen Eintretenswahrscheinlichkeiten zur visuellen Überprüfung in eine zweite 16er-Matrix eingetragen.

Anhand dieser zweiten Matrix sieht man nun, dass keines der Risiken den Erfolg des Projekts unmittelbar bedroht. Die getroffenen Massnahmen zeigen Wirkung.

Nichtsdestotrotz sind viele der Risiken immer noch im gelben Bereich und sollten während des Projekts weiter beobachtet und wenn nötig zusätzliche Massnahmen getroffen werden.

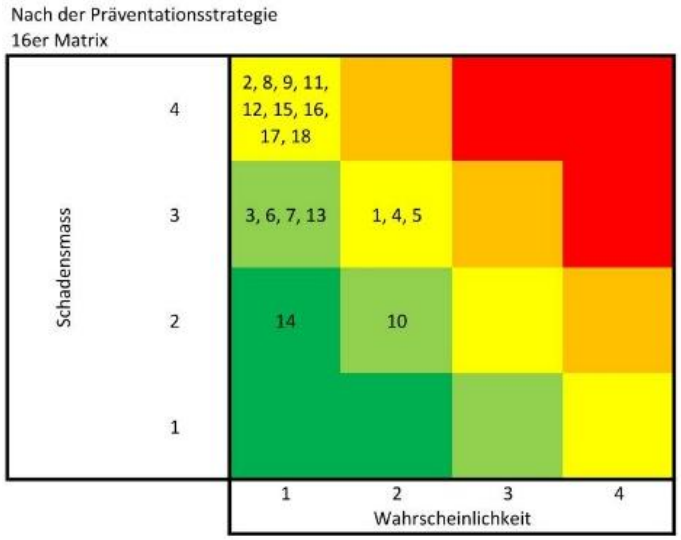


Bild 5: 16er Matrix nach Prävention

6 Projektrealisierung

Nach Abschluss der Projektinitialisierung und der Projektplanung folgt die Projektrealisierung. In diesem Kapitel wird das eigentliche Endergebnis erarbeitet.

6.1 Beschreibung des Vorgehens / Realisierungsplan

Das folgende Trichter-Modell stellt das Vorgehen der Projektrealisierung dieser Diplomarbeit kurz visuell dar.

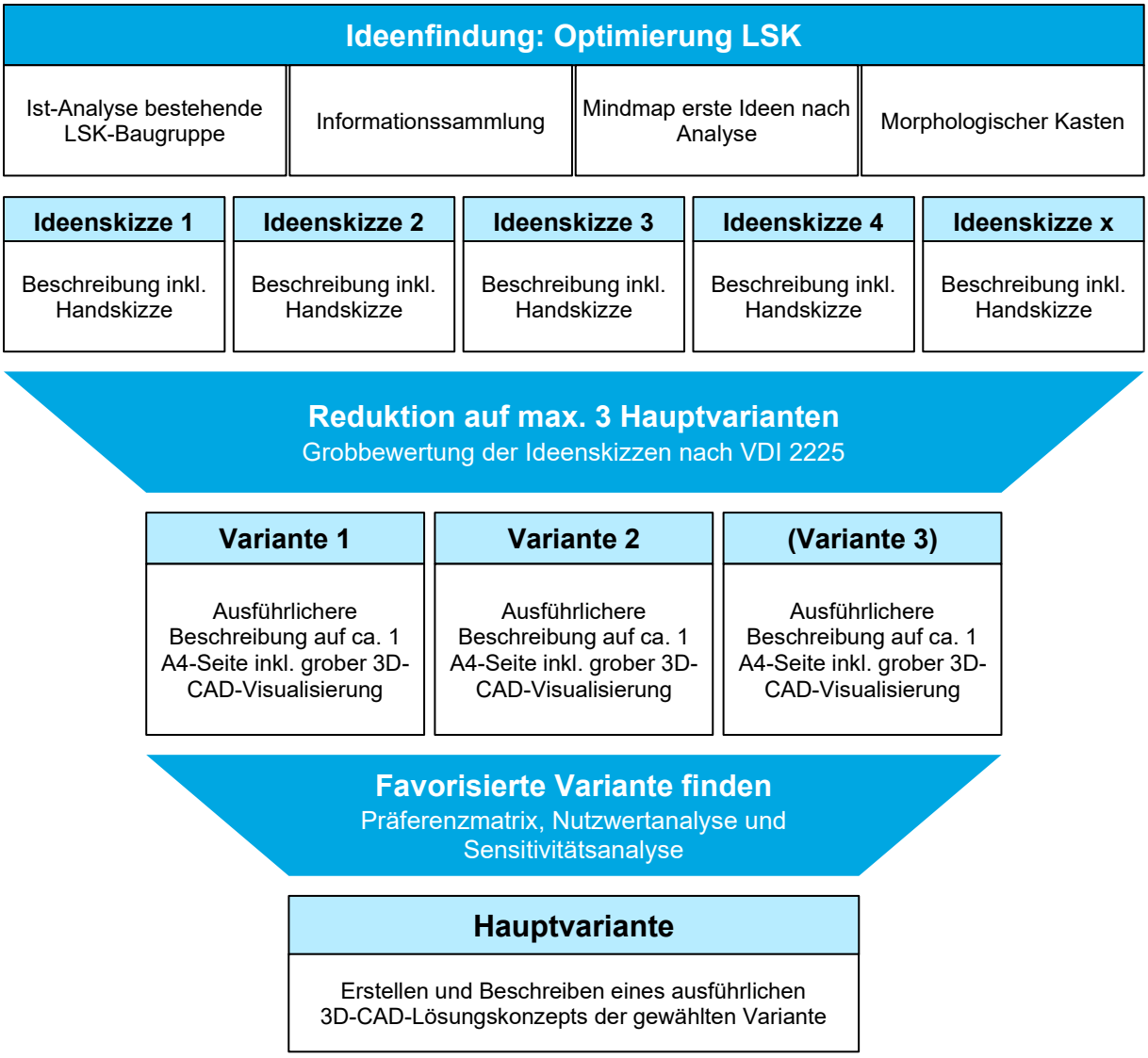


Diagramm 3: Projektrealisierungsplan

6.2 Analyse der bestehenden LSK-Konstruktion

Eine erste Analyse der bestehenden Leitschaufelkranz-Konstruktion fand zusammen mit dem Fachexperten während des Kick-Off vom 11.09.2026 bei der VentoStream AG vor Ort statt.

Die bestehende Baugruppe wurde in einem ersten Schritt im montierten Zustand an dem fertigen Turbinen-Prototyp betrachtet. Dabei konnte die Funktion der einzelnen Komponenten und Baugruppen des Leitschaufelkranzes sehr gut nachvollzogen werden.

Im nächsten Schritt wurde die gesamte Baugruppe zusammen im CAD betrachtet. Dabei konnte gut auf den Aufbau einzelner Baugruppen eingegangen und gezielt Fragen zum gesamten Aufbau gestellt werden, um ein besseres Verständnis davon zu haben, weshalb etwas so gemacht wurde, wie es gemacht wurde oder welche Funktion einzelne Bauteile in den verschiedenen Baugruppen haben.

Im Rahmen dieses Kapitels wird die Baugruppe anhand des von Ventostream zur Verfügung gestellten STEP-Modells nochmals genauer betrachtet, die wichtigsten Komponenten, Baugruppen und ihre Funktionen aufgeschlüsselt und verständlich dokumentiert.

Ebenso wird die gesamte bestehende Baugruppe hinsichtlich ihrer konstruktiven Komplexität, des bestehenden Antriebsmechanismus sowie auf mögliche Kostentreiber analysiert und die Erkenntnisse aus dieser Analyse schriftlich erfasst.

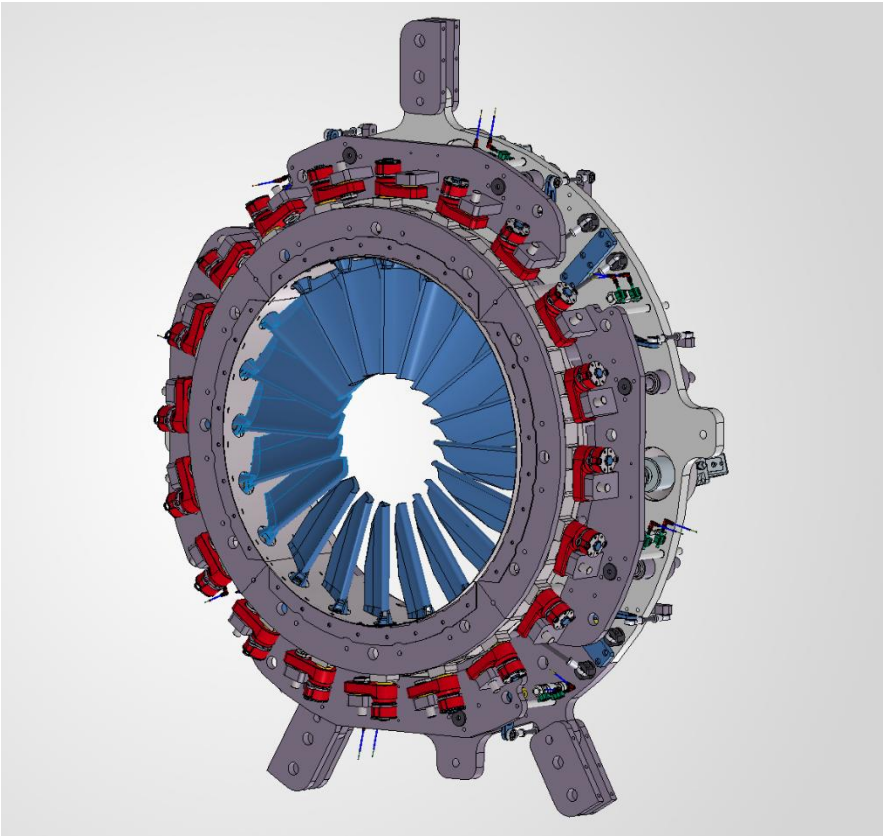


Bild 6: Bestehender Leitschaufelkranz

Funktion der wichtigsten Komponenten

Grundsätzliche Funktion der Baugruppe

Der gesamte Leitschaufelkranz ist grundsätzlich in vier einzelne Segmente unterteilt. Jedes dieser Segmente hat einen eigenen Antrieb und eine eigene Verstelleinheit. Die Ansteuerung der einzelnen Segmente erfolgt jedoch synchron und ist rein aus fertigungstechnischen Gründen in vier Einzelsegmente unterteilt. Die Aufteilung dient also nicht einer einzelnen, zonenweisen Verstellung der Schaufelblätter, wie man auf den ersten Blick annehmen könnte.

Werden die Servomotoren des LSK angesteuert, fahren die daran gekoppelten Spindelhubgetriebe aus und versetzen die Verstelleinheit in eine Linearbewegung. Diese Linearbewegung wiederum wird durch die Anlenkhebel der Leitschaufeln als Drehbewegung auf deren Achse übertragen, wodurch sie dann schlussendlich in ihrem Winkel verstellt werden.

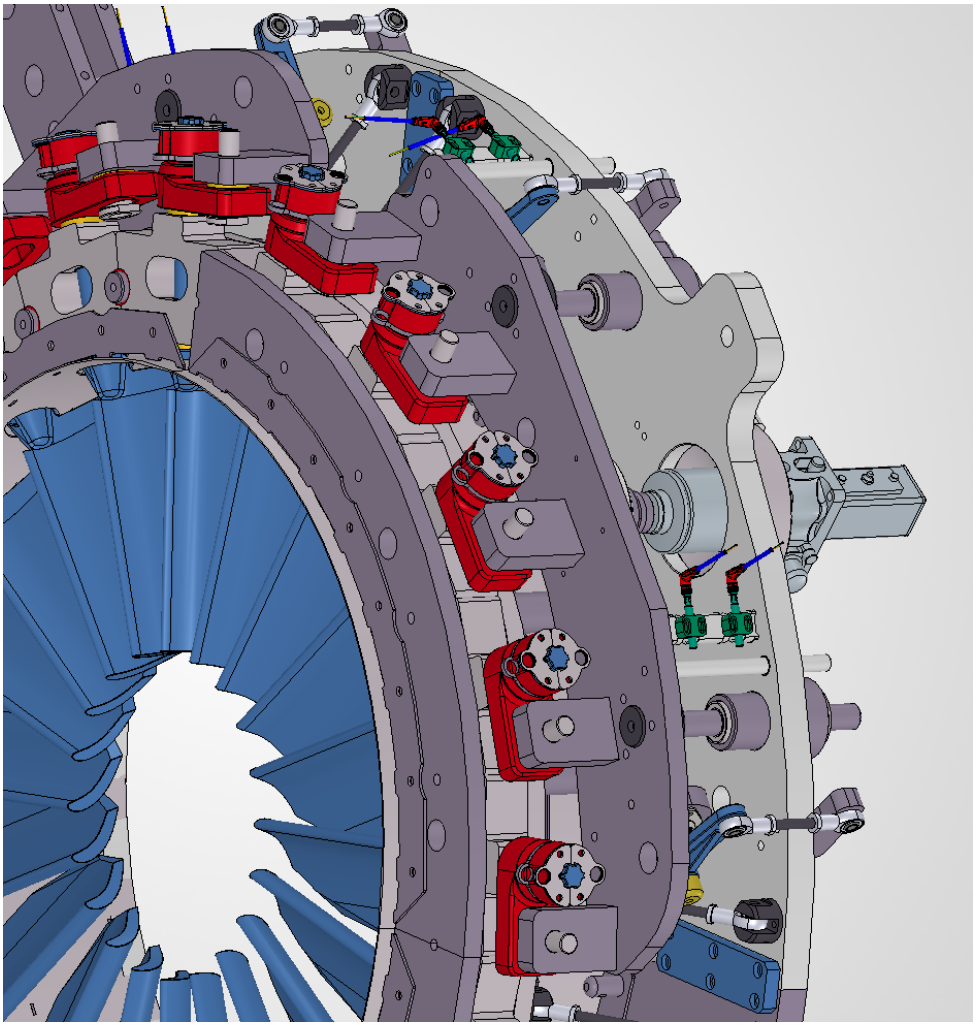


Bild 7: Funktionsprinzip LSK

Antrieb

Der Antrieb besteht aus einem AC-Servomotor des Typs BMH gepaart mit einem passenden GBX-Planetengetriebe der Firma Schneider Electric und einem Spindelhubgetriebe des Typ ZE-10-SL-TR, der Firma ZIMM.

Der Motor hat ein Dauerstillstandmoment von 1,4 Nm und ein Spitzendrehmoment von 4.2 Nm. Das Dauerstillstandmoment ist das maximale Drehmoment, das der Motor im Stillstand über eine unbegrenzte Zeit abgeben kann, ohne dabei zu überhitzen.

Seine Nenndrehzahl beträgt bis zu 5000 U/min und seine Nennleistung bis zu 680 Watt. Zudem hat der Motor eine integrierte Haltebremse mit einem Haltemoment von 3Nm.

Das GBX-Planetengetriebe ist ein geradeverzahntes Getriebe mit einer Untersetzung von 3:1.

Das Spindelhubgetriebe ist mit einer Trapezspindel versehen und ist für eine statische Last von maximal 10 kN und 40 mm Hub ausgelegt. Durch die Trapezgewindespindel ist das Getriebe selbsthemmend und braucht keine zusätzliche Bremse bei abgeschaltetem Motor.

Alle vier Antriebe sitzen auf einer massiven Aluminium-Grundplatte, mit der die gesamte Baugruppe des LSK mit dem Rest der Turbine verbunden wird.

Wird der Motor in Bewegung gesetzt, fährt die Spindel im Spindelhubgetriebe aus und versetzt die damit verbundene Verstelleinheit des Leitschaufelkranzes in Bewegung.

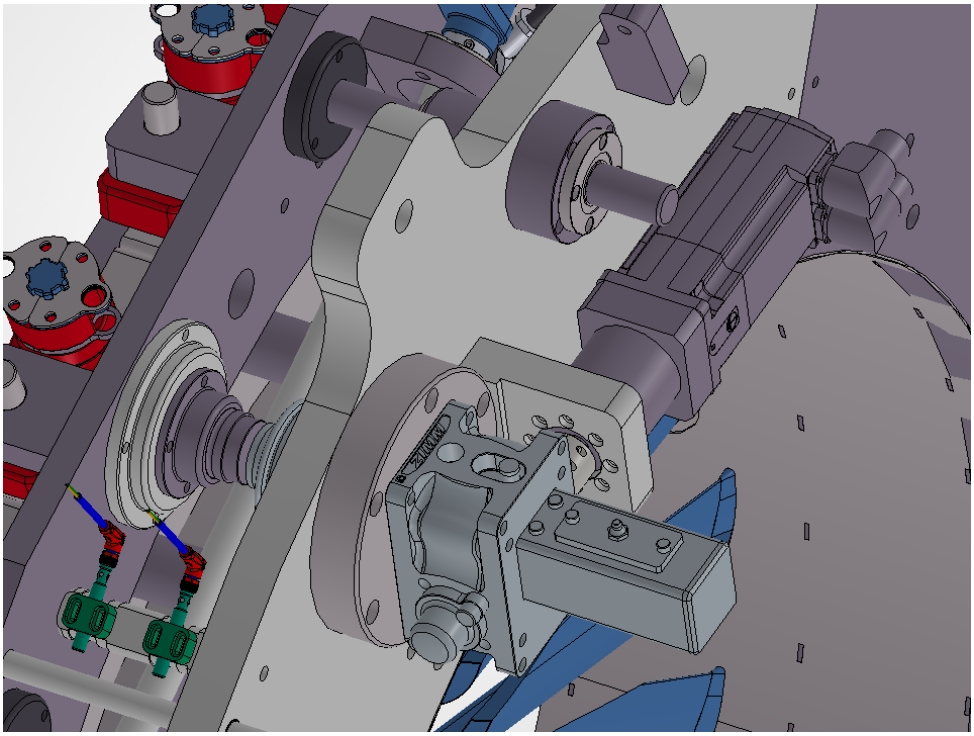


Bild 8: Antrieb LSK

Verstelleinheit

Die Basis der Verstelleinheit des Leitschaufelkranzes bildet eine grosse Aluminium-Platte, die linear mittels zwei Wellen in ihrer Bewegung geführt wird. Die beiden Führungswellen sind mit Kugelumlaufbuchsen gelagert. Zusätzlich sind noch zwei weitere, kleinere Wellen angebracht, die jedoch nur zur Positionsüberwachung der Verstelleinheit mit den Sensoren da sind.

Diese Aluminiumplatte ist durch einen grossen Flansch mit der Antriebseinheit verbunden.

Auf der gegenüberliegenden Seite sind an der Platte je fünf Konsolen verbaut, die mittels Bolzen mit den Leitschaufeln verbunden sind.

Setzt sich der Antrieb nun in Bewegung, fährt die gesamte Baugruppe, geführt auf den beiden Wellen, ein oder aus.

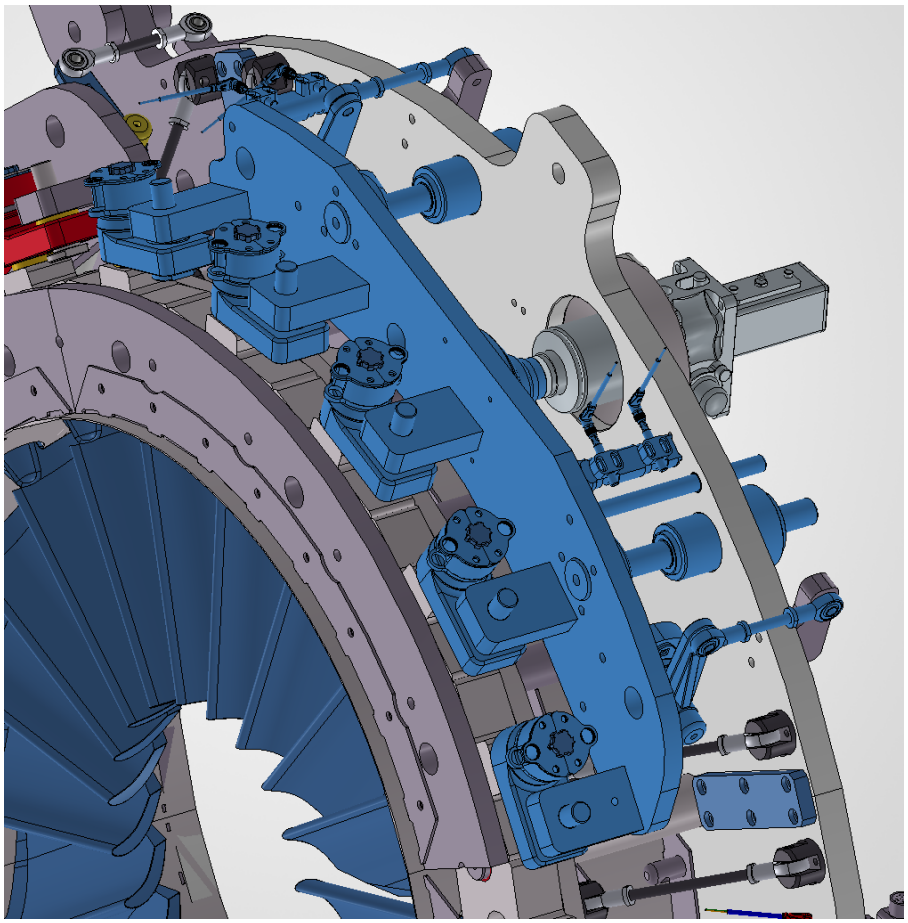


Bild 9: Verstelleinheit LSK

Leitschaufeln und Lagerung

Vorne am Leitschaufelkranz befinden sich die 20 Leitschaufeln und deren Lagerung. Die Leitschaufeln bestehen aus einem mit Blech verstärktem 3D-Druck.

Die Lagerung der Schaufeln ist pro Segment aus je fünf einzelnen Lagerböcken aufgebaut, die in Sandwich-Bauform zwischen zwei grossen Aluminiumplatten verbaut sind. In diesen Lagerböcken sind je zwei Igus Iglidur-Gleitlager eingepresst, in denen die Leitschaufeln geführt werden.

Am Wellenende der Leitschaufeln sitzt je ein Anlenkhebel, der mit dem bereits oben erwähnten Bolzen mit der Konsole und somit mit der Verstelleinheit verbunden ist.

Die gesamte Lagerbaugruppe mit den Lagerböcken und den zwei Aluminiumplatten, ist mit je fünf massiven Distanzwellen mit der Grundplatte des LSK verbunden, um die nötige Stabilität aufzubringen. Zusätzlich sind noch je zwei Koppelstangen angebracht, die den Lagerkranz noch zusätzlich verstreben mit der Grundplatte.

Fährt nun die oben beschriebene Verstelleinheit ein oder aus, werden die Leitschaufeln durch die Anlenkhebel in ihrem Winkel verstellt.

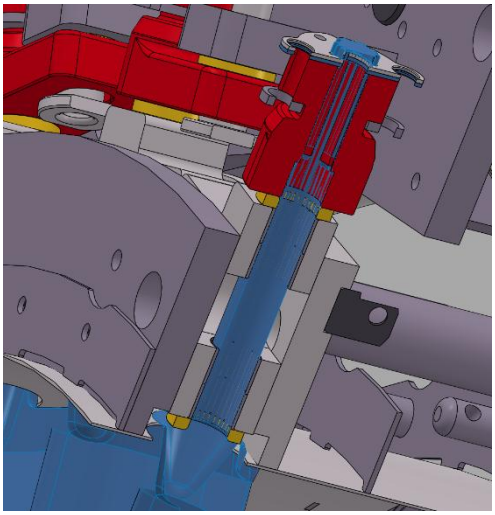


Bild 11: Schnittansicht Lagerung

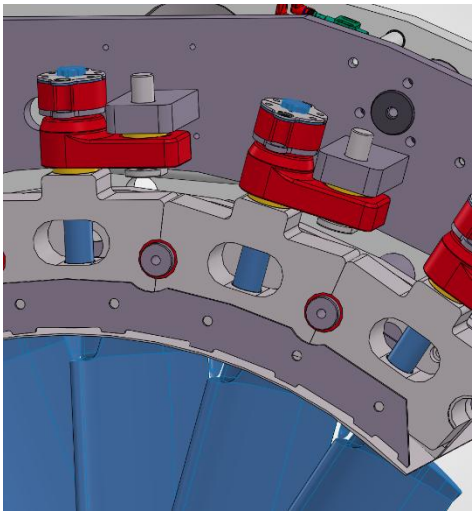


Bild 10: Lagerböcke Leitschaufeln

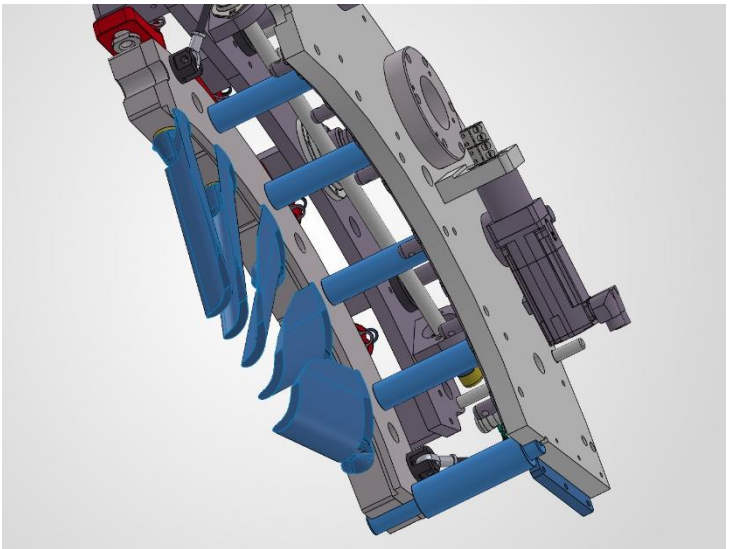


Bild 12: Distanzwellen LSK

Stabilisierungswelle

An den vier Verstelleinheiten der Baugruppe ist je eine Stabilisierungswelle an der Rückseite der grossen Aluminiumplatte angebracht. Diese Welle ist wiederum an den beiden Enden durch einen Umlenkhebel und eine Koppelstange mit der Grundplatte verbunden.

Fährt die Verstelleinheit nun aus, dreht sich die Stabilisierungswelle gleichmässig und sorgt dafür, dass sich die grosse Aluminiumplatte der Verstelleinheit während der Bewegung absolut gleichmässig verhält und sich nicht verkanten kann.

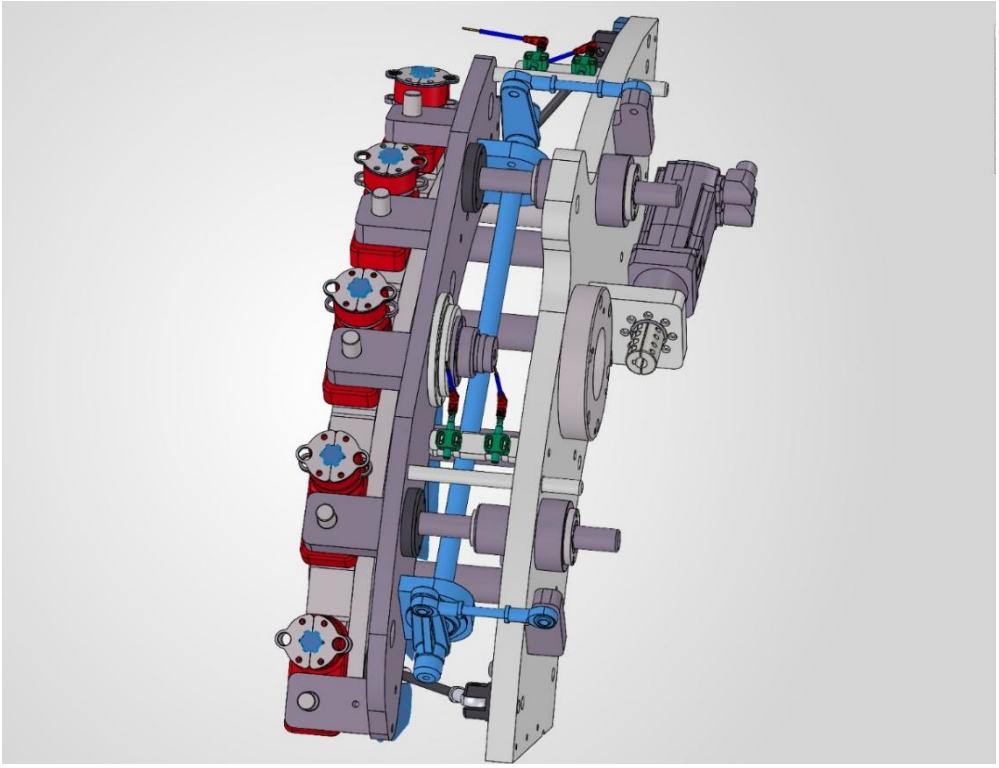


Bild 13: Stabilisierungswelle

Sensoren

Jedes der vier Segmente ist mit jeweils zwei Sensorhaltern ausgestattet. Pro Sensorhalter sind je zwei Induktivsensoren verbaut. Die Sensoren dienen zur reinen Positionsüberwachung der Verstelleinheit während der Referenzfahrt (Stellung der Schaufeln 0° - 45°).

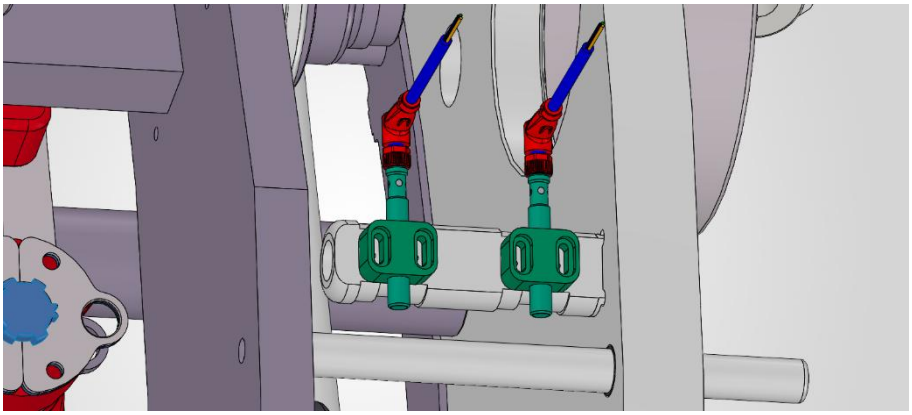


Bild 14: Induktivsensoren LSK

Abdeckblech

Die vier Abdeckbleche im Inneren des Leitschaufelkranzes dienen zur Führung des Luftstroms, zur Abschottung der Technik des LSK vom Luftstrom und zur Prävention von unerwünschten Verwirbelungen.

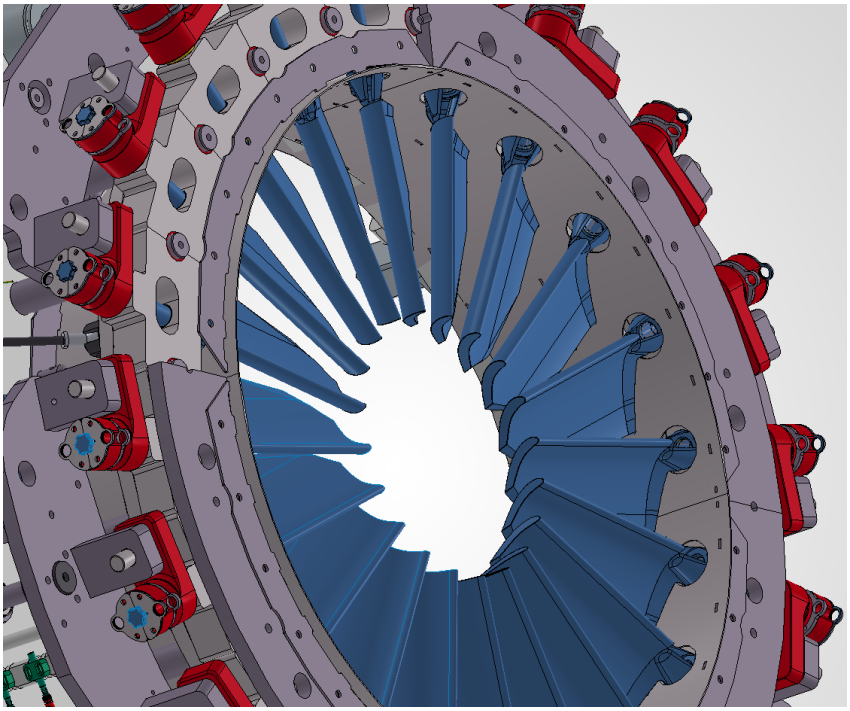


Bild 15: Abdeckbleche

Aufhängungsplatten

Mit je zwei Aufhängungsplatten wird die gesamte Baugruppe durch die Grundplatte mit den Aufhängungsfinnen der Turbine verbunden.

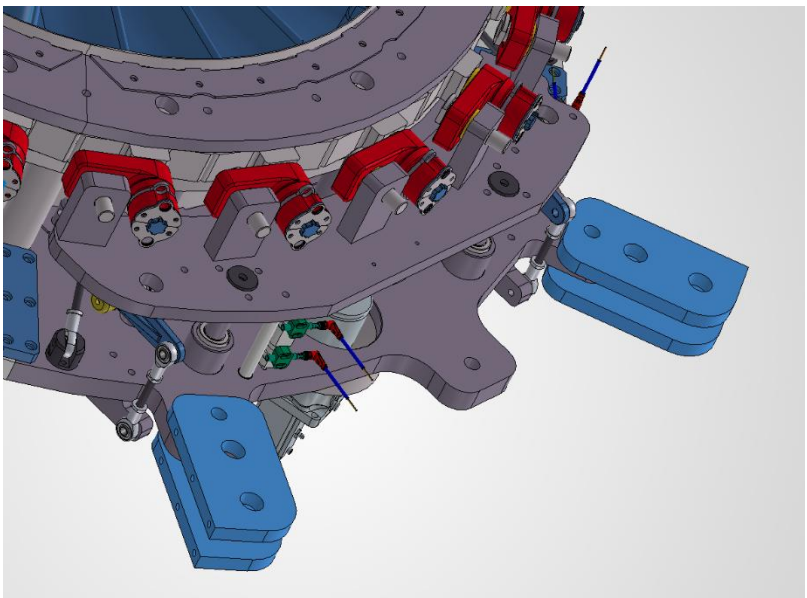


Bild 16: Aufhängungsplatten unten

Analyse Optimierungspotential

Konstruktive Komplexität

Der bestehende Leitschaufelkranz ist konstruktiv betrachtet relativ komplex aufgebaut. Durch die bestehende Lösung der Ansteuerung sind einige zusätzliche Bauteile vonnöten, um die Funktion zu gewährleisten. Ohne die Stabilisierungswellen und die Führungswellen würde die Ansteuerung der Schaufel per linearer Hubbewegung nicht funktionieren.

Auch die Unterteilung in vier einzelne Segmente, mit vier einzelnen Antrieben bringt eine zusätzliche Komplexität mit sich. Pro Segment sind je vier Sensoren verbaut, die jedoch über die gesamte Baugruppe hinweg gesehen alle die gleiche Funktion haben.

Was auch auffällt ist, dass viele Bauteile unnötig kompliziert oder auch unnötig massiv ausgeführt sind. Die Bauteile sollten so ausgelegt werden, dass sie die auftretenden Lasten zwar gut aufnehmen können, aber nicht völlig überdimensioniert sind. Nur schon durch die gezielte Neukonstruktion komplexer, schwerer und überdimensionierter Bauteile lassen sich eine Menge Gewicht und Herstellungskosten einsparen.

Bestehendes Antriebskonzept

Die Ansteuerung mit vier einzelnen Antrieben zur Verstellung der Leitschaufeln funktioniert zwar, lässt sich aber sicherlich einfacher und eleganter mit nur einem Antrieb lösen.

Das aktuelle Antriebskonzept nutzt AC-Servomotoren mit einem relativ geringen Drehmoment, die zusätzlich an je ein Spindelhubgetriebe gekoppelt werden müssen, damit sie überhaupt das nötige Stellmoment für die Leitschaufeln erzeugen können.

Mit einem modernen Linearaktuator liessen sich diese beiden Antriebskomponenten in einem einzigen Bauteil vereinen. Dadurch würden deutlich Kosten und Gewicht gespart werden können, da zwölf einzelne Komponenten durch eine ersetzt werden.

Kostentreiber

Wie sich in den oberen beiden Kapiteln schon erahnen lässt, besitzt die Baugruppe grosses Potential zur Gewichts- und Kostenersparnis. Die grössten Kostentreiber sind basierend auf der Analyse folgende Komponenten oder konstruktive Eigenschaften

- **Antriebe:** Das Ersetzen von vier Antrieben durch einen Einzelnen bringt grosses Einsparpotential. Allein ein Servomotor dieses Typs kostet gut 1200.- CHF, das Planetengetriebe und das zusätzlich benötigte Spindelhubgetriebe noch nicht miteingerechnet.
- **Ansteuerung:** Das aktuelle Konzept zur Ansteuerung der Verstellung benötigt eine Vielzahl an (teuren) Bauteilen. Durch die Wahl eines anderen Ansteuerungskonzepts lassen sich einige Komponenten und somit auch Kosten einsparen.
- **Massive Bauweise:** Durch die teils überdimensionierten Bauteile wird mehr Material benötigt, das die Teile automatisch teurer in der Herstellung macht.
- **Komplexe Teile:** Viele Teile sind unnötig komplex ausgeführt. Zum Beispiel der Sensorhalter ist aktuell als komplexes Dreh- und Frästeil ausgeführt, obwohl da eine einfache Blechkonstruktion reichen würde. Die Komplexität treibt die Fertigungskosten der einzelnen Bauteile massiv in die Höhe.

6.3 Informationssammlung

Die Informationssammlung wird in diesem Kapitel bewusst kurzgehalten. Eine Analyse, welche bestehenden Lösungen / Mechanismen bereits auf dem Markt erhältlich sind, ist unter Kapitel *4.3* dieser Dokumentation zu finden.

In diesem Kapitel wird vor allem auf mögliche, einsetzbare Bauteile eingegangen.

Nichtsdestotrotz ist beim Recherchieren noch ein Mechanismus aufgefallen, der für die Lösung auch interessant sein könnte: Die Iris-Blende. Jedoch bezogen auf den Leitschaufelkranz mit einem axialen Verstellring, statt des normalen radialen Verstellrings, wie er beispielsweise bei einer Kamera zum Einsatz kommt.

Bei den nützlichen Bauteilen sind bei der Informationssammlung vor allem folgende aufgefallen:

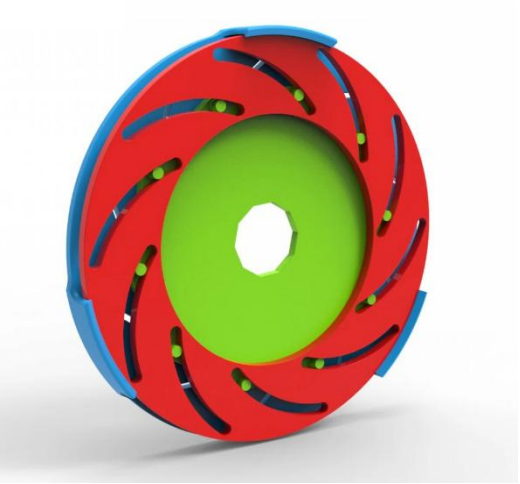


Bild 17: Irisblende-Mechanik, Quelle: www.cults3d.com

Linearaktuator

Solch ein Linearaktuator wie der Electrak HD von Thomson könnte sich beim Ersatz der vier Einzelantriebe als sehr gut geeignete Lösung herausstellen. Der im Bild gezeigte Electrak bringt dynamische Schub- und Zugkräfte von bis zu 4500 N und ein statisch von bis zu 18'000 N auf. Somit könnte auch auf das vorhandene Spindelhubgetriebe verzichtet werden. Zudem hat der Aktuator auch eine integrierte Bremse, ist IP66 zertifiziert und kostet gerade mal 767.- CHF. Verglichen dazu: Ein aktuell eingesetzter Servomotor kostet rund 1200.-, das passende Planetengetriebe 300.- und das Spindelhubgetriebe dazu rund 600.- zusätzlich.

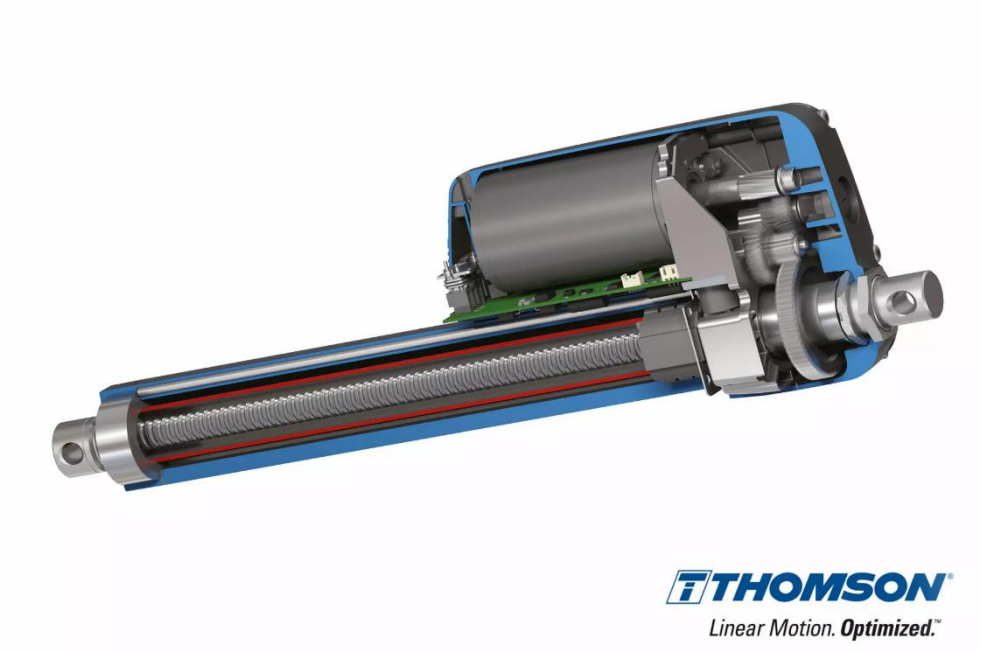


Bild 18: Electrak Linearaktuator, Quelle: www.produktion.de

Riemen / Ketten / Schubstangen

Mit diesen Maschinenelementen liesse sich sicherlich eine Ansteuerung der einzelnen Leitschaufeln zur Verstellung des Winkels realisieren. Ob alle Leitschaufeln miteinander gekoppelt oder einzeln angetrieben, beides wäre denkbar.

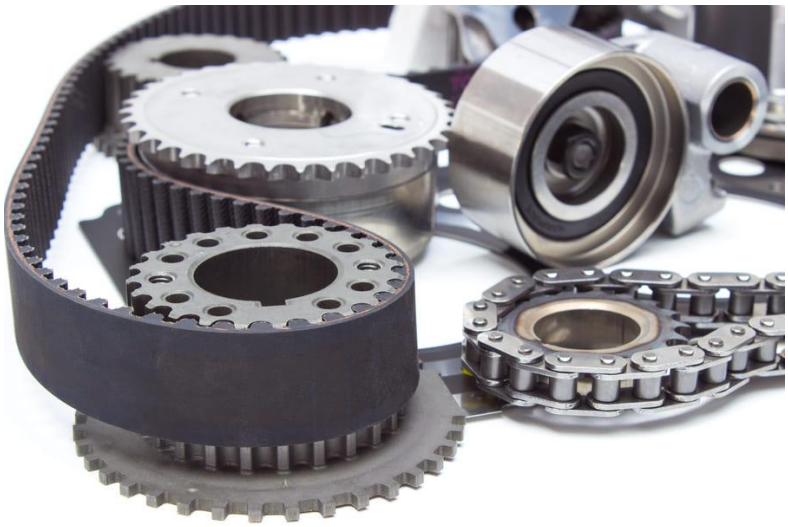


Bild 19: Rollenkette und Zahnriemen, Quelle: www.club.auto-doc.at

Drehverbindungen verzahnt / unverzahnt

Drehverbindungen von SKF oder Franke sind Grosswälzlager die mit Innen- oder Aussenverzahnung oder auch ganz ohne Verzahnung erhältlich sind. Der Durchmesser bei SKF als Ausführung mit Vierpunktlager reicht von kleinen 0,1 m bis zu grossen 18 m.

So etwas liesse sich am neuen Konzept sicherlich auch umsetzen, eventuell auch mit einem Schneckenradantrieb auf die Aussenverzahnung. Kostentechnisch würde ich aber solche Grosswälzlager für diesen Anwendungsfall eher als unwirtschaftlich betrachten. Eine Drehverbindung von Franke des Typs LVA-1200 mit 1,2 m Durchmesser liegt bei ca. 6000 bis 8000 CHF.

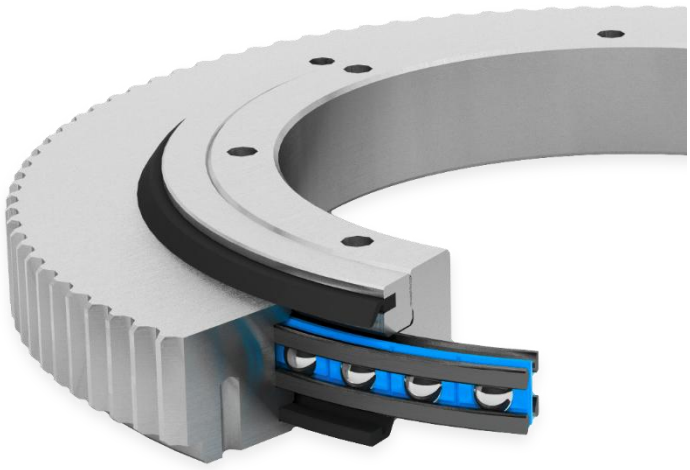


Bild 20: Franke Drehverbindung Typ LVE, Quelle: www.franke-gmbh.de

Winkelgetriebe

Ein Winkelgetriebe könnte für die Lösung auch nützlich sein, um Drehmomente 90° versetzt weiterzugeben. Für das vorgegebene Stellmoment von 55 Nm pro Schaufel sind die auf dem Markt angebotenen Lösungen jedoch recht gross und schwer ausgeführt, wie die Recherche zeigte.

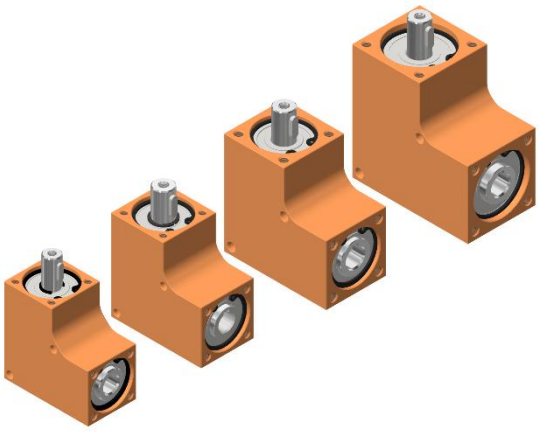


Bild 21: Winkelgetriebe, Quelle: www.shop.ketterer.de

Bogenführungen

Auf dem Markt erhältliche Bogenführungen sind für die Erarbeitung eines Lösungskonzepts sehr interessant und eignen sich gut zur Lagerung eines Drehrings. Erhältlich sind unter anderem Lösungen von Hepco und THK. Die Bogenführungen von Hepco basieren dabei auf V-Förmig genuteten Kugellagern, die aussen auf einer Schiene laufen, während diejenigen von THK mit Kugelumlaufwagen funktionieren, wie die herkömmlich erhältlichen Linearführungen.

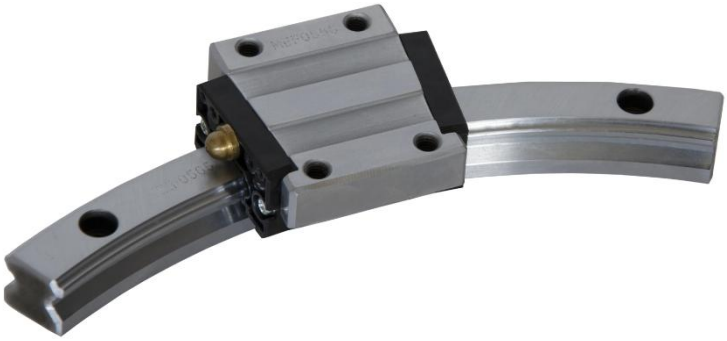


Bild 22: Bogenführung THK HCR, Quelle: www.bachofen.ch



Bild 23: Bogenführung Hepco PRT2, Quelle: www.hepcomotion.com

6.4 Kreativitätsmethode / Ideenfindung

In diesem Kapitel werden mittels Kreativitätsmethode Ideen gesucht, um daraus die verschiedenen Varianten ableiten zu können. Verwendet werden dafür das Mindmap und der Morphologische-Kasten.

Mit dem Mindmap werden erst mal jegliche Ideen, die einem zum Thema einfallen frei gesammelt und niedergeschrieben.

Mit dem Morphologischen-Kasten werden die Ideen danach, sauber sortiert und strukturiert nach Merkmalen, als Ausprägungen in eine Tabelle eingetragen. Anhand der verschiedenen Ausprägungen können mit dem morphologischen Kasten dann die einzelnen Ideenskizzen abgeleitet werden.

Die beiden Methoden wurden gewählt, weil sie sich perfekt ergänzen. Das Mindmap ist eine erste freie Ideensammlung und der Morphologische-Kasten strukturiert diese anschliessend für die Variantenbildung.

Mindmap



Bild 24: Mindmap LSK

Morphologischer-Kasten

Merkmale	Ausprägungen				
Antrieb	Schneckenrad-antrieb	Einzelne, kleine Servomotoren	Linearaktuator		
Lagerung	Drehverbindung	Gleitlager	Bogenführung	keine	
Verstellelement	Drehring	Drehring Innenverzahnt	Drehring Aussenverzahnt	Iris-Verstellring	Schubstangen
Anbindung Leitschaufel	Anlenkhebel	Kegelrad	Kettenräder	Zahnriemen-räder	
Verbindung	Koppelstangen	Ketten	Zahnriemen	Achsen	keine

6.5 Ideenskizzen

Aus den Varianten mit den verschiedenen Ausprägungen werden nun passende Ideenskizzen erstellt. Bei der Ideenskizze wird kurz beschrieben, wie der Aufbau der Lösung mit den spezifischen Ausprägungen etwa aussieht, wie sie funktioniert und wie man sie sich etwa vorstellen kann. Zusätzlich werden noch die wichtigsten Vor- und Nachteile gelistet und die Idee mit einer einfachen Handskizze visuell untermalt.

Ideenskizze 1

Bei dieser Variante wird der Antrieb mit einem Linearaktuator realisiert. Der Aktuator ist mit einem Drehring verbunden und verstellt diesen durch seine Schub- und Zugbewegungen. Der Drehring ist mittels Bogenführungen gelagert und mit der Grundplatte des Leitschaufelkranzes verbunden. Die Leitschaufeln werden wie bei der bisherigen Lösung mit Anlenkhebeln angesteuert und verbunden sind diese durch einzelne Koppelstangen mit dem Drehring. Wenn also der Linearaktuator ausfährt, dreht sich der Drehring und überträgt diese Bewegung via Koppelstangen und Anlenkhebel auf die Leitschaufeln, wodurch diese in ihrem Winkel verdreht werden. Aufgebaut ist das ganze so: Grundplatte – Drehring – Lagerung mit Leitschaufeln.

Vorteile:

- Kostengünstig zur Herstellung
- 4 Antriebe werden durch einen ersetzt
- Einfache Montage
-
- Bestehende Komponenten werden teils beibehalten
- Geringes Gewicht

Nachteile:

- Bogenführung in richtigem Radius muss erhältlich sein
- Drehring muss wahrscheinlich mehrteilig gefertigt werden aufgrund der Grösse

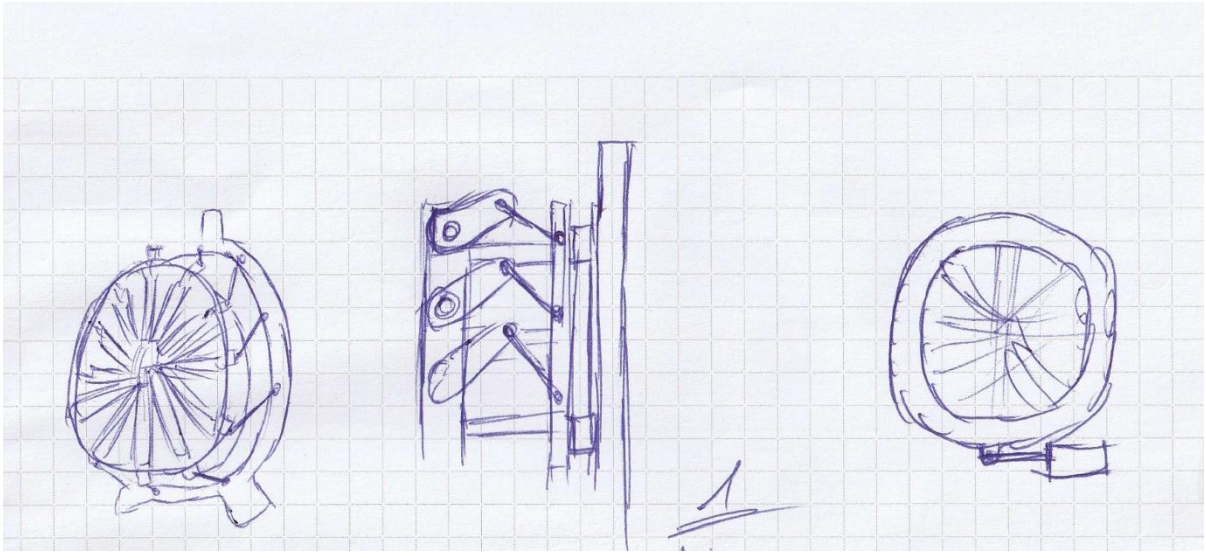


Bild 25: Lösungsskizze 1 Drehring

Ideenskizze 2

Die Variante verwendet zum Antrieb ein Schneckenantrieb bestehend aus einem Getriebe und einem Servomotor. Die Lagerung und gleichzeitig auch das Verstellelement bildet eine grosse Drehverbindung mit Vierpunktlager und Aussenverzahnung. Die Anbindung an die Leitschaufeln erfolgt mit einem Kegelrad, das auf der Achse der Leitschaufel sitzt. Die Verbindung von den Leitschaufeln zur Drehverbindung übernehmen Achsen, die an der einen Seite ein Kegelrad und an der anderen Seite ein normales Stirnrad haben. Wird der Motor angesteuert dreht sich das Schneckenrad und somit der grosse Drehverbinder. Durch die Drehung des Drehverbinders rotieren die Verbindungsachsen. Diese Rotation wird dann abschliessend mit den Kegelrädern auf die Leitschaufeln übertragen und diese somit im Winkel verstellt. Der Aufbau sieht dadurch so aus: Grundplatte – Drehverbindung – Lagerplatte für Achsen – Lagerung mit Leitschaufeln.

Vorteile:

- Die Drehverbindung kombiniert gleich zwei Bauteile in einem: Ansteuerung und Lagerung
- Komponenten wie Drehverbindung können ab Stange beim Hersteller gekauft werden
- Selbsthemmend dank Schneckenantrieb
- Ein zentraler Antrieb

Nachteile:

- Wahrscheinlich sehr schwer durch Drehverbindung und zusätzlich benötigter Lagerplatte für die Achsen
- Viele Komponenten
- Teuer durch Drehverbindung und Stirnräder
- Sehr genaue Bauteile nötig wegen Flankenspiel

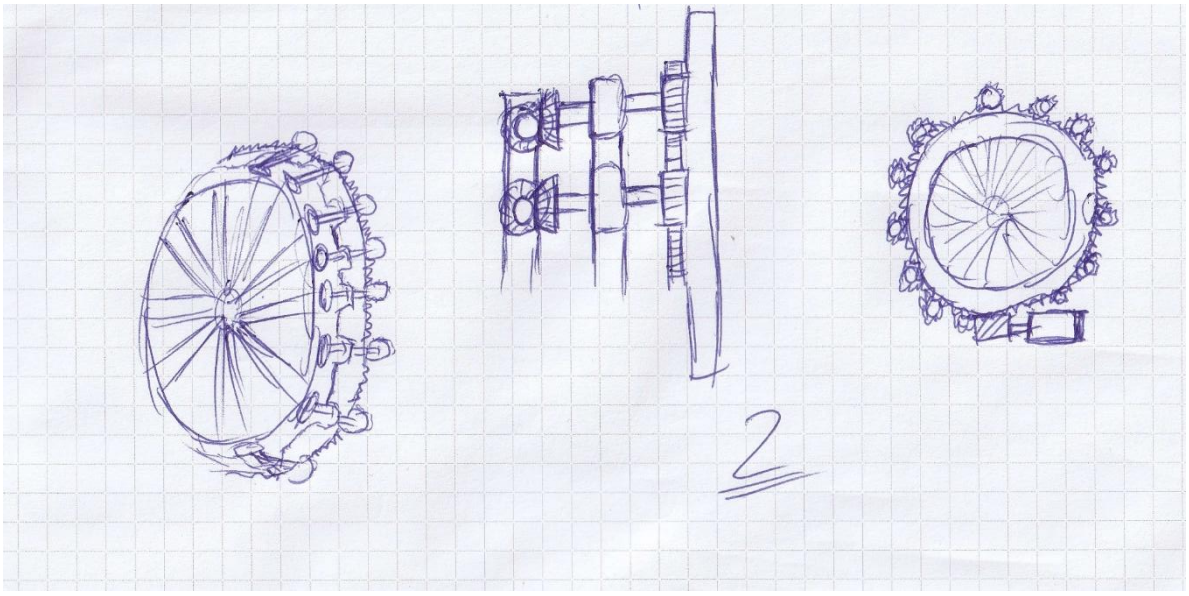


Bild 26: Lösungsskizze 2 Drehkranz

Ideenskizze 3

Dieser Lösungsansatz kommt mit sehr wenigen Bauteilen aus. Den Antrieb übernimmt ein Linearaktuator. Als Verstellelement kommen Schubstangen zum Einsatz. Als Ansteuerung der Schaufel werden wie bisher die Anlenkhebel verwendet. Der Linearaktuator ist direkt mit den Schubstangen verbunden und die Schubstangen direkt mit den Anlenkhebeln. Eine Lagerung oder zusätzliche Verbindung mit dem Drehelement wird somit nicht benötigt. Fährt der Linearaktuator ein oder aus, werden die Schubstangen in Bewegung gesetzt und bewegen direkt die Anlenkhebel der Leitschaufeln und verdrehen diese somit in ihrem Winkel. Der Aufbau sieht so aus: Grundplatte – Antrieb mit Schubstangen – Lagerung mit Leitschaufeln.

Vorteile:

- Wenig Komponenten
- Nur ein Antrieb
- Wahrscheinlich sehr günstig
- Geringes Gewicht

Nachteile:

- Grosse Winkelabweichungen zwischen erster und letzter Schaufel möglich wegen Toleranzkette!

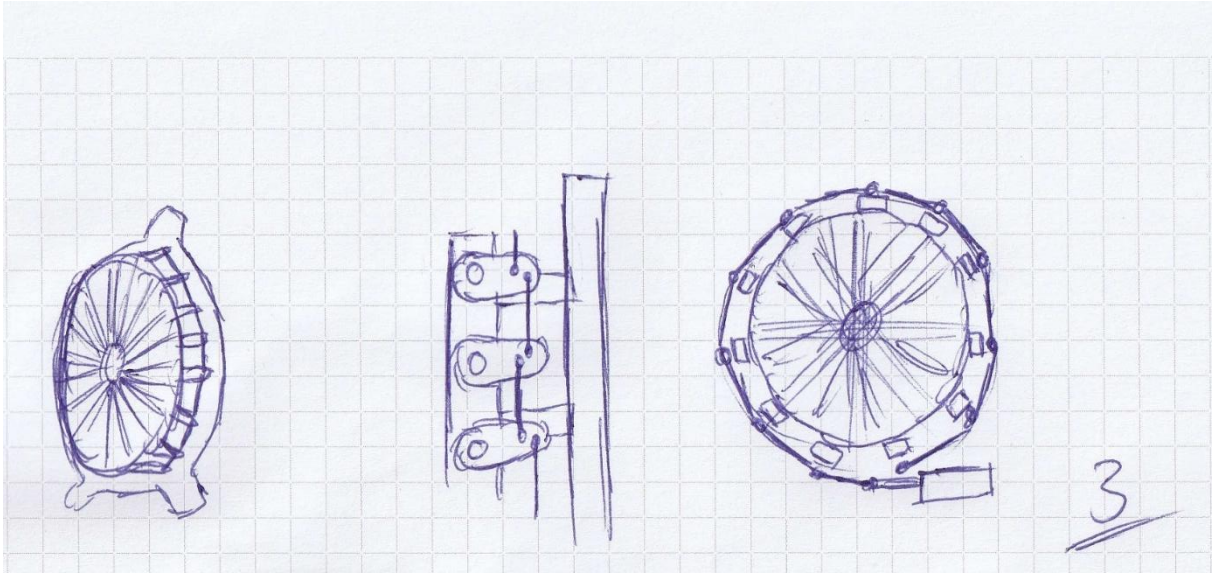


Bild 27: Lösungsskizze 3 Schubstangen

Ideenskizze 4

Den Antrieb dieser Lösungsidee übernehmen 20 einzelne, kleine Servomotoren. Jeder Servomotor treibt so eine Leitschaufel an. Ein zusätzliches Verstellelement und eine Lagerung dessen wird nicht benötigt. Die Verbindung zwischen Servomotoren und Leitschaufeln bilden zwei Kettenräder mit einer Rollenkette. Das Kettenrad an der Leitschaufel ist grösser als das am Servomotor um das übertragbare Drehmoment zu erhöhen. Eventuell muss noch ein zusätzliches Getriebe zwischen Servo und Kettenantrieb geschaltet werden, um das nötige Drehmoment aufzubringen. Wird ein Motor angesteuert, wird die Kraft über den Kettentrieb direkt an die Leitschaufel geleitet und verstellt diese so in ihrem Winkel. Der Aufbau sieht folgendermassen aus: Grundplatte mit Motoren – Lagerung mit Leitschaufeln.

Vorteile:

- Kompakter Aufbau möglich
- Kein zusätzliches Verstellelement und Lagerung
- Jede Leitschaufel könnte unabhängig angesteuert werden

Nachteile:

- 20 Antriebe statt vier
- Ketten müssen eingestellt werden können
- Zweifelhaft ob benötigtes Drehmoment aufgebracht werden kann
- Eher schwer durch zwanzig Antriebe
- Teuer

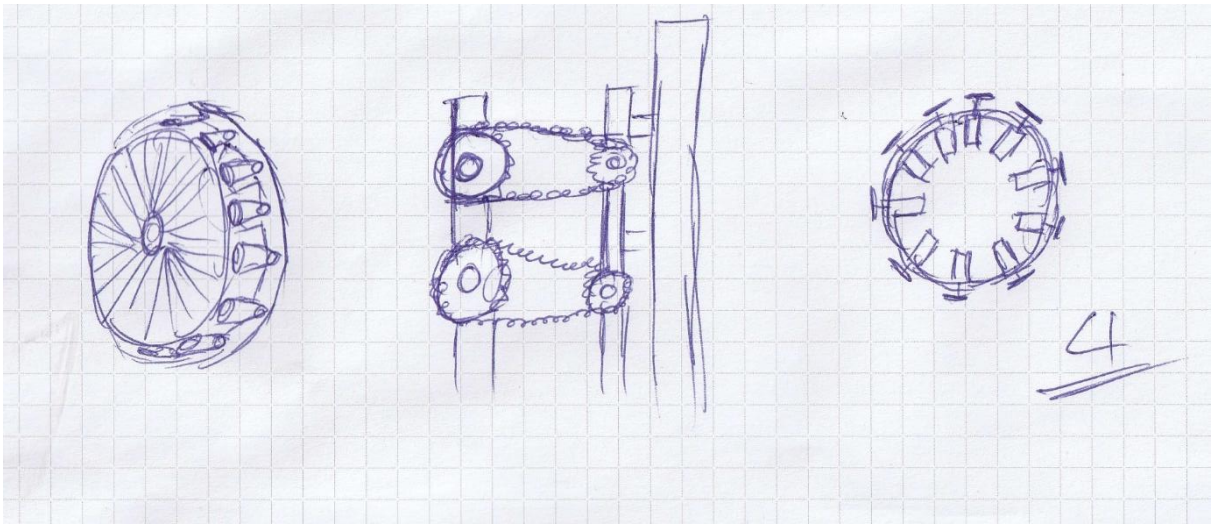


Bild 28: Lösungsskizze 4 Kettentrieb

Ideenskizze 5

Bei dieser Lösung kommt wieder der Linearaktuator als Antrieb zum Einsatz. Als Verstellelement kommt ein spezieller axialer Iris-Verstellring (wie in radialer Ausführung bei einer Kamera) zum Einsatz. Als Lagerung des Rings dient eine Bogenführung. Die Anbindung an die Leitschaufeln erfolgt mit einem Anlenkhebel, der zusätzlich mit einem Bolzen ausgestattet ist, der in der Nut des Iris-Verstellrings läuft. Wird der Verstellring nun durch den Linearaktuator gedreht, bewegen sich die Anlenkhebel in den Nuten vor und zurück und verdrehen so die Leitschaufeln in ihrem Winkel. Der Aufbau sieht so aus: Grundplatte – Iris Verstellring – Lagerung mit Leitschaufeln.

Vorteile:

- Wenig Bauteile
- Verbindungselement und Anbindung Leitschaufeln in einem Bauteil vereint
- Niedriges Gewicht möglich
- Einfache Montage

Nachteile:

- Gefahr von Verkanten im Verstellring
- Iris-Ring ist komplexes Bauteil so ausgeführt
- Wahrscheinlich relativ teuer herzustellen

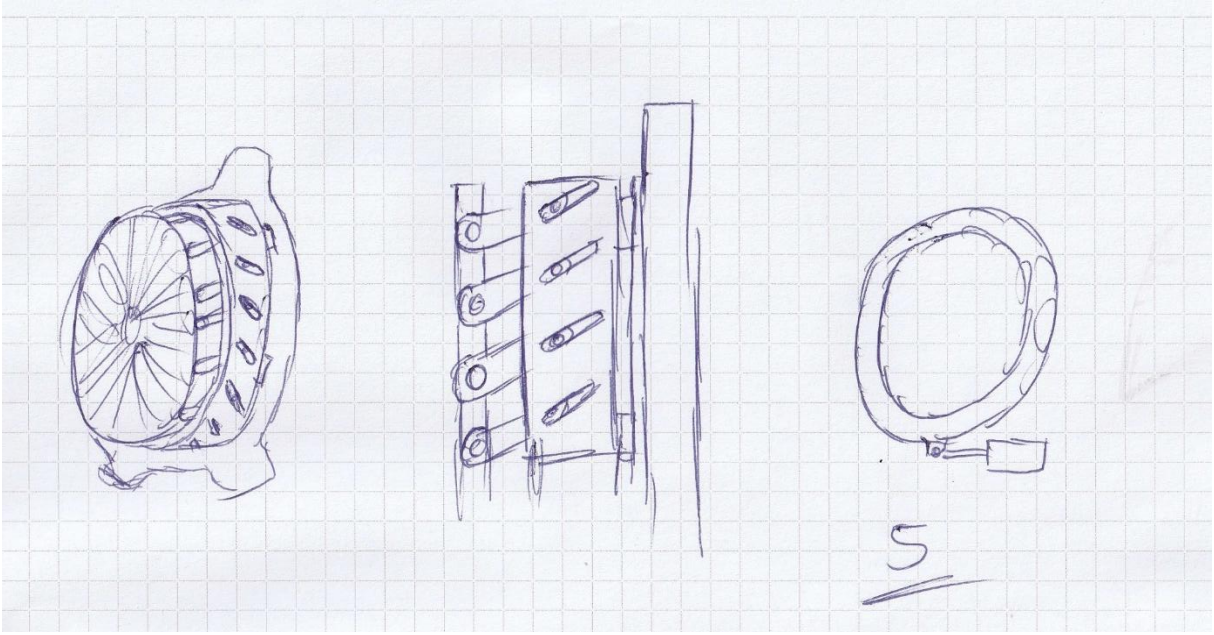


Bild 29: Lösungsskizze 5 Iris-Ring

6.6 Priorisierungsmethode

Diese fünf Ideenskizzen werden mit einer Grobbewertung nach VDI 2225 bewertet und auf maximal drei Hauptvarianten, die weiter untersucht werden, eingegrenzt.

Die Grobbewertung nach VDI 2225 ist ein schnelles und einfaches Verfahren, um verschiedene Lösungsvarianten in einer Konzeptphase früh nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien zu vergleichen und ungeeignete Lösungen auszusortieren.

Dabei werden die technischen Kriterien und die wirtschaftlichen Kriterien in zwei separaten Tabellen bewertet.

Eine Tabelle enthält links die Bewertungskriterien und rechts davon werden die einzelnen Lösungen mit der Punktzahl 1-4 bewertet. Zum Schluss wird die Gesamtpunktzahl addiert und durch die maximale Punktzahl geteilt. Dadurch erhält man die technische Wertigkeit einer Lösung von 0 bis 1. Für die wirtschaftliche Bewertung wird in einer separaten Tabelle genau gleich vorgegangen.

Zum Schluss werden die Lösungen mit den Werten in einem Diagramm eingetragen und können so bewertet und aussortiert werden.

Technische Bewertungskriterien	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5
Anzahl Komponenten	3	2	4	2	4
Anzahl Antriebe	4	4	4	1	4
Gewicht	3	2	4	1	3
Stell und Haltemoment 55 Nm	4	4	3	1	3
Synchronität Schaufeln	4	3	1	2	2
Bauraum	4	3	4	3	3
Gesamtpunkte	**22**	**18**	**20**	**10**	**19**
Technische Wertigkeit	**0,92**	**0,75**	**0,83**	**0,42**	**0,79**

Wirtschaftliche Bewertungskriterien	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5
Herstellkosten	3	1	4	1	2
Montageaufwand	4	1	3	2	4
Fertigungstauglichkeit	4	1	4	3	1
Gesamtpunkte	**11**	**3**	**11**	**6**	**7**
Wirtschaftliche Wertigkeit	**0,92**	**0,25**	**0,92**	**0,5**	**0,58**

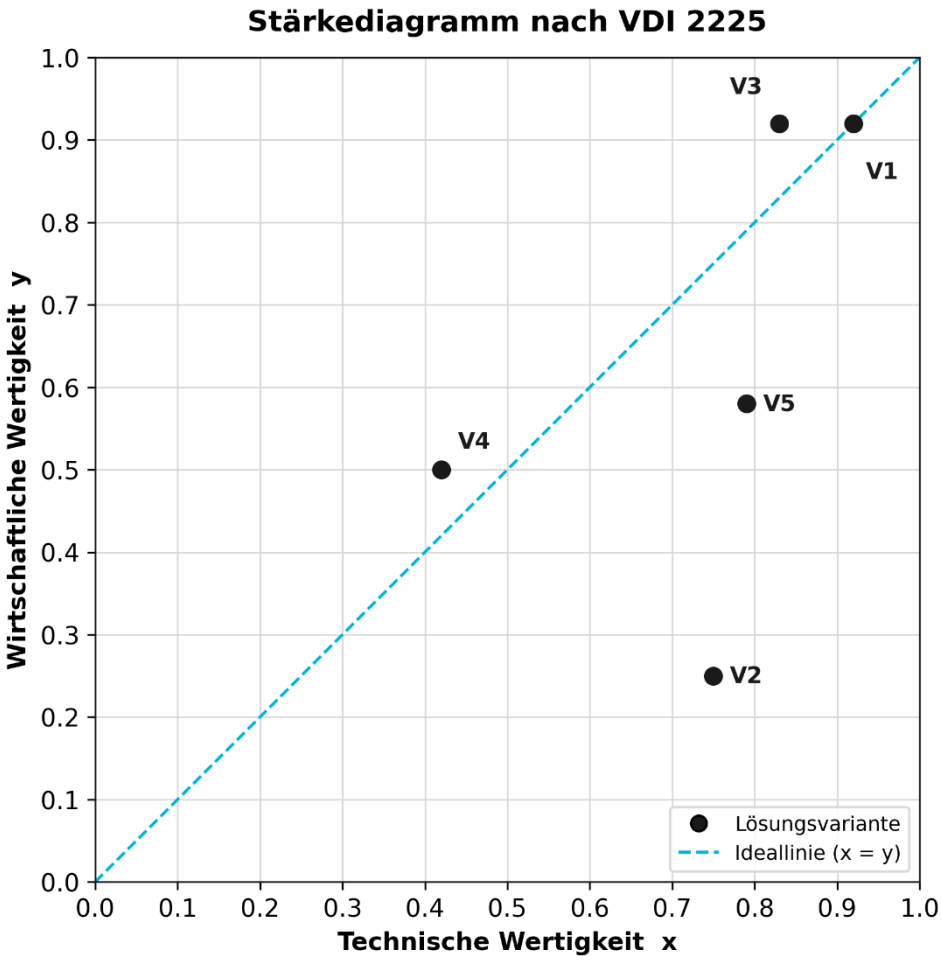


Diagramm 4: Stärkediagramm nach VDI 2225

Wie man anhand der eingetragenen Werte im Diagramm sehen kann, eignen sich aus technischer, sowie aus wirtschaftlicher Sicht vor allem die **Lösungsskizze 1** und die **Lösungsskizze 3** zur Erarbeitung eines Lösungskonzepts. Deshalb werden nur diese zwei Lösungsansätze für die Variantenbildung weiterverwendet. Die Lösungsskizzen 2, 4 und 5 scheiden an diesem Punkt aus.

6.7 Variantenbildung

Aus beiden priorisierten Lösungsskizzen vom vorangegangenen Kapitel werden nun zwei Lösungsvarianten ausgearbeitet, ausführlich beschrieben und mit einem groben, schnellen CAD-Konzept visuell untermalt.

Kurzbeschreibung Variante 1

Den Kern dieser Variante bildet ein Drehring, der die Leitschaufeln ansteuert. Der Aufbau besteht aus sechs Hauptkomponenten:

Grundplatte

Die Grundplatte trägt die ganze Konstruktion und bildet die Schnittstelle zum Rest der Turbine. Die Anbindung an die Finnen mit den Aufhängungsplatten und deren Position wird unverändert übernommen. Die Grundplatte soll eine stabile Basis bilden aber trotzdem nicht unnötig schwer ausgeführt werden.

Bogenführungen

Für die Lagerung des Drehrings kommen Bogenführungen zum Einsatz. Die Führungsschienen mit den Führungswagen werden dabei auf der Grundplatte befestigt. Durch die Verstellung der Schaufeln um nur 45 Grad reichen einzelne 3 bis 4 Teilbögen als Führungen und es wird kein Vollkreis benötigt.

Linearaktuator

Den Antrieb übernimmt ein Linearaktuator, er sitzt mit allfälligen Spacern im unteren Teil der Grundplatte.

Drehring

Der Drehring wird auf die Führungswagen der Bogenführungen geschraubt und ist durch eine Lasche mit dem Linearaktuator verbunden. An der Vorderseite des Rings sind zwanzig Konsolen verbaut, die zur Befestigung der Koppelstangen sind.

Koppelstangen

Zwanzig Koppelstangen verbinden den Drehring mit den Leitschaufeln. Die Koppelstangen sind als Welle mit zwei Kugelköpfen ausgeführt und in ihrer Länge verstellbar. Die Koppelstangen sind auf der einen Seite an den Konsolen des Drehrings befestigt und auf der anderen Seite an den Anlenkhebeln der Leitschaufeln. Die Koppelstangen stehen für eine optimale Kraftübertragung parallel zur Wirkungslinie des Linearaktuators.

Anlenkhebel und Lagerung Leitschaufeln

Die Anlenkhebel und die Lagerung der Leitschaufeln werden zu einem grossen Teil von der bestehenden Lösung übernommen. Die Anlenkhebel stehen aber verglichen mit der ursprünglichen Lösung 90° nach rechts versetzt, aufgrund der anderen Ansteuerung mit dem Drehring.

Die Lagerung der Leitschaufeln wird wie bei der ursprünglichen Version als grosser Ring mit einzelnen Lagerböcken ausgeführt. Der Ring ist mit den massiven Distanzwellen mit der Grundplatte verbunden.

Die Abdeckbleche zur Leitung des Luftstroms im Inneren des Leitschaufelkranzes werden nach Möglichkeit unverändert von der bestehenden Lösung übernommen.

Mögliche Risiken

- Der Leitschaufelkranz wird nicht leicht genug aufgrund des Drehrings
- Der Linearaktuator kann im vorgegebenen Bauraum nicht untergebracht werden
- Der Leitschaufelkranz wird teurer als vorgegeben aufgrund der grossen Fertigungsteile (Drehring, Grundplatte)
- Antriebskraft wird viel grösser aufgrund der kürzeren Anlenkhebel an der Leitschaufel

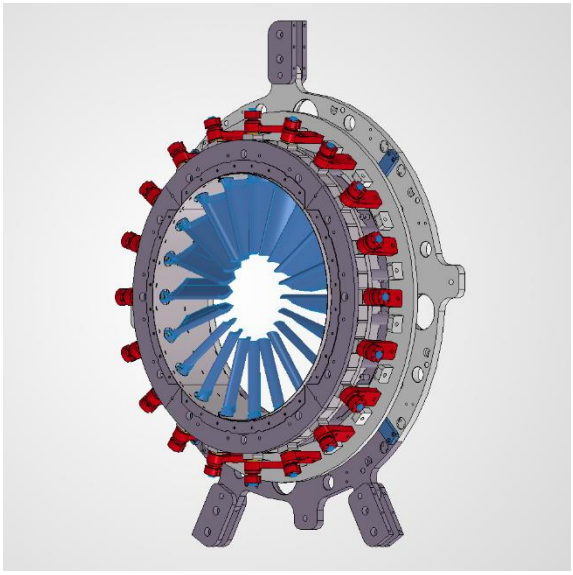


Bild 30: LSK mit Drehring

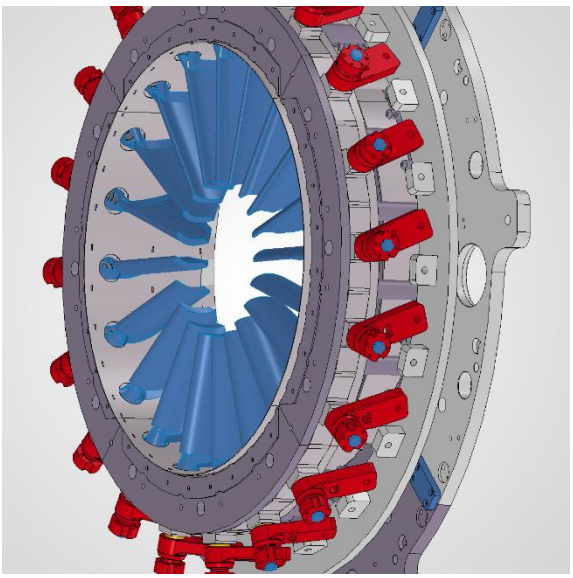


Bild 31: Drehring Schaufeln offen

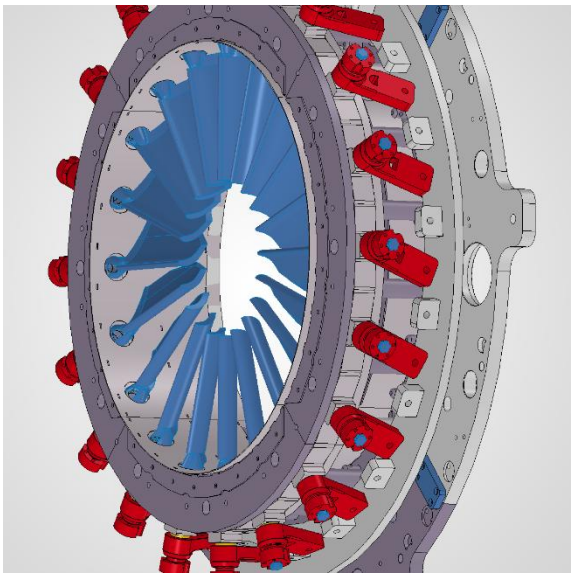


Bild 32: Drehring Schaufeln zu

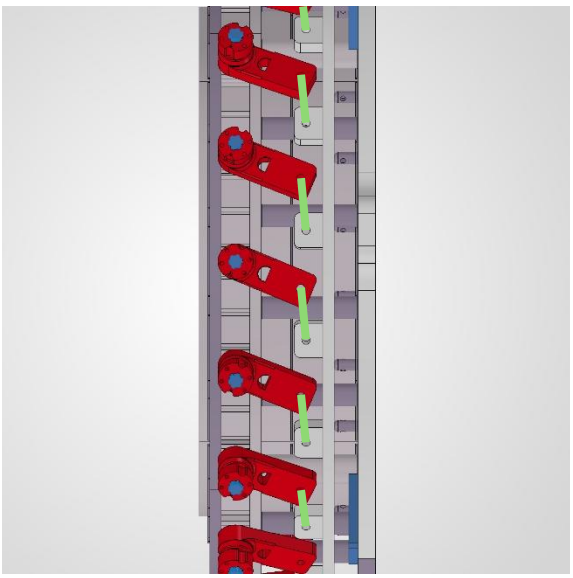


Bild 33: Ansicht Drehring und Anlenkhebel seitlich

Kurzbeschreibung Variante 2

Diese Variante verzichtet auf ein zusätzliches, gelagertes Verstellelement und steuert die Leitschaufeln über die Schubstangen direkt an. Sie besteht aus nur vier Hauptkomponenten:

Grundplatte

Die Grundplatte ist wie bei der ersten Variante dazu da, die ganze Konstruktion zu tragen und die Schnittstelle zum Rest der Turbine zu bilden. Die Anbindung an die Finnen mit den Aufhängungsplatten und deren Position wird ebenfalls unverändert übernommen. Die Grundplatte soll eine stabile Basis bilden aber trotzdem nicht unnötig schwer ausgeführt werden.

Linearaktuator

Den Antrieb übernimmt auch hier ein Linearaktuator, der auf die Grundplatte verschraubt ist. Er ist Antriebsseitig direkt mit dem ersten Anlenkhebel der Leitschaufeln verbunden.

Schubstangen

Die neunzehn Schubstangen sind als massive Koppelstangen mit einer Welle und zwei Gelenkköpfen ausgeführt. Sie verbinden die einzelnen Anlenkhebel der Leitschaufeln miteinander. Fährt der Linearaktuator nun ein oder aus, bewegt er den ersten Anlenkhebel und die einzelnen Schubstangen übertragen dann diese Bewegung auf alle weiteren Anlenkhebel. Die Schubstangen stehen für eine optimale Kraftübertragung parallel zur Wirkungslinie des Aktuators.

Anlenkhebel und Lagerung Leitschaufeln

Die Anlenkhebel und die Lagerung der Leitschaufeln werden auch hier zu einem grossen Teil von der bestehenden Lösung übernommen. Die Anlenkhebel stehen aber auch 90° nach rechts versetzt und sind etwas länger ausgeführt, um einen grösseren Hebel zur Kraftübertragung zu haben. Das heisst in diesem Fall eine geringere Belastung für die Schubstangen und insbesondere deren Gelenkköpfen. Wäre die Belastung zu hoch, würden die Gelenkköpfe zu früh verschleissen und die Winkelabweichung von der ersten zur letzten Schaufel würde durch die Toleranzkette mit dem Spiel zu gross werden.

Die Lagerung der Leitschaufeln wird wie bisher als grosser Ring mit einzelnen Lagerböcken ausgeführt. Der Ring ist mit den massiven Distanzwellen mit der Grundplatte verbunden.

Die Abdeckbleche zur Leitung des Luftstroms im Inneren des Leitschaufelkranzes werden nach Möglichkeit unverändert von der bestehenden Lösung übernommen.

Mögliche Risiken

- Toleranzkette wird bis zur letzten Schaufel zu gross
- Durch die Anordnung der Schubstangen im Kreis werden die Kräfte zu gross
- Wenn sich die Anlenkhebel um die vollen 45 Grad drehen, könnten die Schubstangen in einem zu steilen Winkel zueinanderstehen und sich verkanten.
- Es könnten grössere Belastungen auf die Lagerung der Leitschaufeln wirken

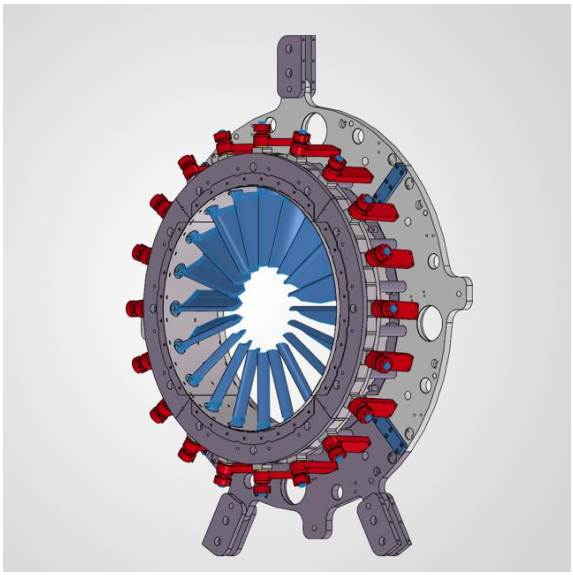


Bild 34: LSK mit Schubstangen

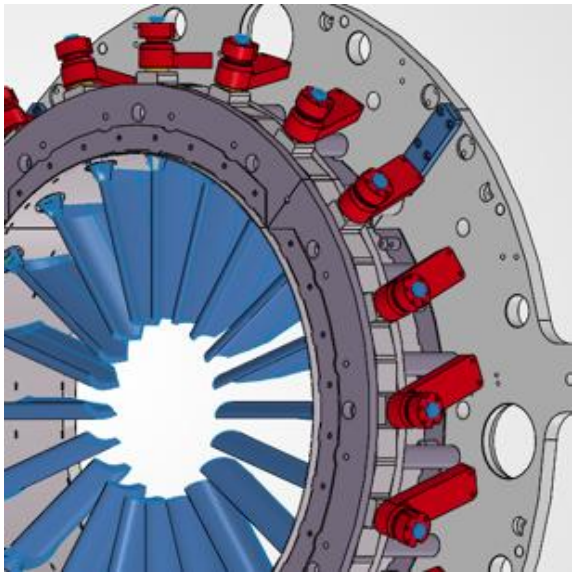


Bild 35: Schubstangen Schaufeln offen

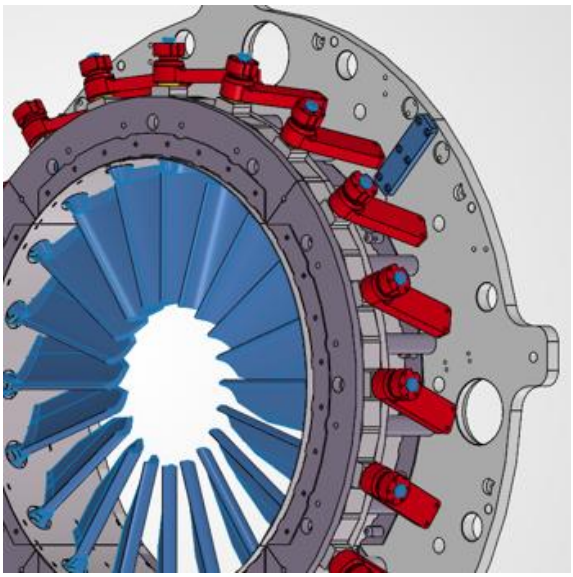


Bild 36: Schubstangen Schaufeln zu

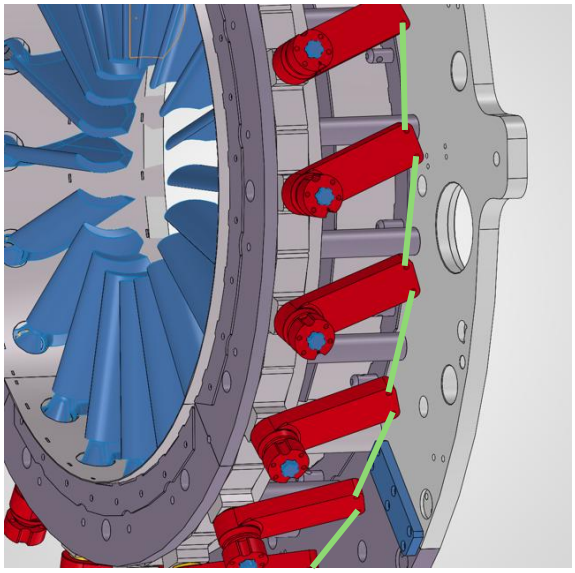


Bild 37: Ansicht Anlenkhebel Schubstangen seitlich

6.8 Evaluation der geeignetsten Variante

Anhand der beiden ausführlichen Variantenbeschreibungen wird nun evaluiert, welche der beiden sich für ein Lösungskonzept am besten eignet.

Dazu bietet sich die Bewertung mit der Präferenzmatrix und der Nutzwertanalyse an. Mit diesem Vorgehen kann die Wahl der am besten geeigneten Variante sachlich durchgeführt und von Aussenstehenden verständlich nachvollzogen werden.

Abschliessend wird die Wahl der favorisierten Variante noch kurz begründet, weshalb sie gewählt wurde, wo ihre Stärken liegen und was es bei der Ausarbeitung zu beachten gibt.

Bewertungskriterien

Die Bewertungskriterien werden in dieser Arbeit basierend auf den Anforderungen und Zielen im Pflichtenheft festgelegt und als Liste niedergeschrieben. Zusätzlich wird diese Liste noch durch weitere Punkte, die ich für den Vergleich als sinnvoll erachtete, ergänzt. Dazu gehört zum Beispiel die Wartungstauglichkeit der Baugruppe.

Bewertungskriterien

- Anzahl Komponenten Total
- Anzahl Kaufteile
- Anzahl Fertigungsteile
- Konstruktive Komplexität
- Anzahl Antriebe
- Herstellkosten Baugruppe
- Fertigungskosten
- Kaufteilkosten
- Gewicht
- Montageaufwand
- Stellzeit
- Antriebskraft
- Bauraum
- Wartungstauglichkeit
- Wartungsintervall

Präferenzmatrix

Mit der Präferenzmatrix werden die verschiedenen Bewertungskriterien in ihrer Wichtigkeit gegeneinander verglichen und entsprechend gewichtet. Die Frage lautet also was ist wichtiger, Kriterium x oder Kriterium y. Sobald alle Kriterien miteinander verglichen und bewertet sind, errechnet die Tabelle der Präferenzmatrix automatisch die Relevanz der einzelnen Kriterien für das Projekt und gibt diese als Prozentzahl aus.

Präferenzmatrix

Die mit dieser Farbe hinterlegten Zellen werden automatisch berechnet

als / wichtiger	Anzahl Komponenten Total	Anzahl Kaufteile	Anzahl Fertigungsteile	Konstruktive Komplexität	Anzahl Antriebe	Herstellkosten Baugruppe	Fertigungskosten	Kaufteilkosten	Gewicht	Montageaufwand	Stellzeit	Antriebskraft	Bauraum	Wartungstauglichkeit	Wartungsintervall	Summe	%
Anzahl Komponenten Total		1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	9	9%
Anzahl Kaufteile	0		1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	2%
Anzahl Fertigungsteile	0	0		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	2%
Konstruktive Komplexität	0	1	0		0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	2%
Anzahl Antriebe	0	1	1	1		0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	8	8%
Herstellkosten Baugruppe	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	0	1	1	13	12%
Fertigungskosten	0	1	1	1	0	0		0	0	0	0	1	0	1	1	6	6%
Kaufteilkosten	1	1	1	1	0	0	1		0	0	0	1	0	1	1	8	8%
Gewicht	1	1	1	1	1	0	1	1		1	1	1	0	1	1	12	11%
Montageaufwand	1	1	1	1	1	0	1	1	0		1	1	0	0	0	9	9%
Stellzeit	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0		1	0	1	1	8	8%
Antriebskraft	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0%
Bauraum	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	14	13%
Wartungstauglichkeit	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0		1	7	7%
Wartungsintervall	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0		5	5%
															Prüfsumme		100%

Bewertung 1 bedeutet im Beispiel Kriterium 1 ist wichtiger als Kriterium 2

Wie man bei der ausgefüllten Matrix sehen kann, fallen die Gewichtungen sehr unterschiedlich aus. Das wichtigste Bewertungskriterium ist dementsprechend der vorgegebene Bauraum, gefolgt von den Herstellkosten und dem Gewicht der Baugruppe. Wiederum gar keine Relevanz in der Bewertung hat die benötigte Antriebskraft.

Die ***Präferenzmatrix*** ist im Anhang noch grösser ersichtlich.

Nutzwertanalyse

Bei der Nutzwertanalyse werden nun die beiden Varianten anhand der aus der Präferenzmatrix gewichteten Bewertungskriterien miteinander verglichen und bewertet. Für jedes Bewertungskriterium vergibt man der Variante eine Zahl von 0 bis 5. Null bedeutet die Variante erfüllt das Bewertungskriterium gar nicht und fünf bedeutet die Variante erfüllt das Kriterium perfekt.

Anschliessend errechnet die Tabelle bei jedem Kriterium, mittels der Prozentzahl der Relevanz und der vergebenen Bewertung von 0-5, die Punktezahl aus.

Sobald alle Kriterien bewertet wurden, erhält man die Summe der erreichten Punktzahl pro Variante und sieht auf einen Blick, welche punktemässig am besten abgeschnitten hat.

Nutzwertanalyse

		Drehring		Schubstangen	
	Gewichtung	Bewertung	Wert	Bewertung	Wert
Anzahl Komponenten Total	9%	3	0.26	5	0.43
Anzahl Kaufteile	2%	3	0.06	5	0.10
Anzahl Fertigungsteile	2%	2	0.04	4	0.08
Konstruktive Komplexität	2%	4	0.08	4	0.08
Anzahl Antriebe	8%	5	0.38	5	0.38
Herstellkosten Baugruppe	12%	3	0.37	4	0.50
Fertigungskosten	6%	3	0.17	4	0.23
Kaufteilkosten	8%	3	0.23	5	0.38
Gewicht	11%	3	0.34	5	0.57
Montageaufwand	9%	4	0.34	5	0.43
Stellzeit	8%	5	0.38	4	0.30
Antriebskraft	0%	3	-	4	-
Bauraum	13%	5	0.67	5	0.67
Wartungstauglichkeit	7%	4	0.27	5	0.33
Wartungsintervall	5%	3	0.14	5	0.24
	Summe		3.72		4.70

Bewertungszahl von 0 - 5
Bewertungszahl 0 entspricht Variante erfüllt das Kriterium nicht
Bewertungszahl 5 entspricht Variante erfüllt das Kriterium perfekt

Wie man der Tabelle entnehmen kann, hat die Variante 2 mit den Schubstangen deutlich besser abgeschnitten und ist der Variante 1 mit dem Drehring aufgrund dieser Bewertungskriterien überlegen.

Mechanische Machbarkeit

Trotz des deutlichen Ergebnisses der Nutzwertanalyse werden die beiden Varianten nochmal geprüft.

Durch die beiden CAD-Mockups kann die mechanische Machbarkeit der Varianten bereits in der Phase der Variantenwahl geprüft und somit später beim Ausarbeiten der favorisierten Variante unschöne Überraschungen vermieden werden.

Dadurch, dass die einzelnen Bauteile in SolidWorks gezielt miteinander verknüpft werden, kann der mechanische Ablauf des Verstellmechanismus 1:1 simuliert und untersucht werden.

Bei beiden Varianten wurde eine Leitschaufel mit dem Igus Lager konzentrisch verknüpft, damit sie sich im Lager drehen kann. Zusätzlich wurde der Flansch der Schaufel unten deckungsgleich mit der Auflagefläche des unteren Lagers gesetzt, zur Fixierung der Komponente in Z-Richtung.

Danach wurde der Anlenkhebel mit seiner Verzahnung passend mit der Leitschaufel verknüpft. Der Anlenkhebel wiederum wurde mit zwei maximalen Ausschwenkwerten von 22.5° pro Seite, ausgehend von seiner senkrechten Stellung, beschränkt. Die Leitschaufel lässt sich also nun durch den Anlenkhebel in ihrer Position genau von 0 - 45° schwenken.

Die restlichen Leitschaufeln mit Hebel wurden per Kreismuster der Baugruppen zugefügt, dadurch sind alle mit der ersten Schaufel verknüpft und führen die Drehbewegungen exakt gleich aus wie die erste, in ihren Bewegungsgraden vollständig definierten Schaufel. Dies ist wichtig für die Messungen zwischen den einzelnen Hebeln.

Variante 1

Bei der Variante 1 wurde zusätzlich noch der Drehring konzentrisch mit der Grundplatte verknüpft und in einem Abstand von 40 mm zu dieser in der Längsrichtung der Turbinenachse fixiert. Durch die konzentrische Verknüpfung lässt sich der Kranz perfekt um die korrekte Achse drehen und mit den 40 mm wird die Höhe der Laufwagen der Bogenführungen simuliert.

Abschliessend wurde mittig der Bohrung einer Konsole und mittig der Bohrung eines Anlenkhebels je ein Punkt gesetzt und mit einem fixen Abstand verknüpft, um die Koppelstangen zu simulieren.

Diese Punkte wurden dann stichprobenmässig bei drei verschiedenen Hebeln und Konsolen in der Stellung 0°, 22.5° und 45° gemessen. Wie sich herausstellte, blieb der Abstand der Bohrungen immer gleich, lediglich der Winkel änderte sich leicht. In der Praxis bedeutet das, einfach, dass die Koppelstangen in einem kleinen Winkel gegen links und rechts ausscheren bei der Verstellung.

Die Variante 1 ist also mechanisch machbar und funktioniert.

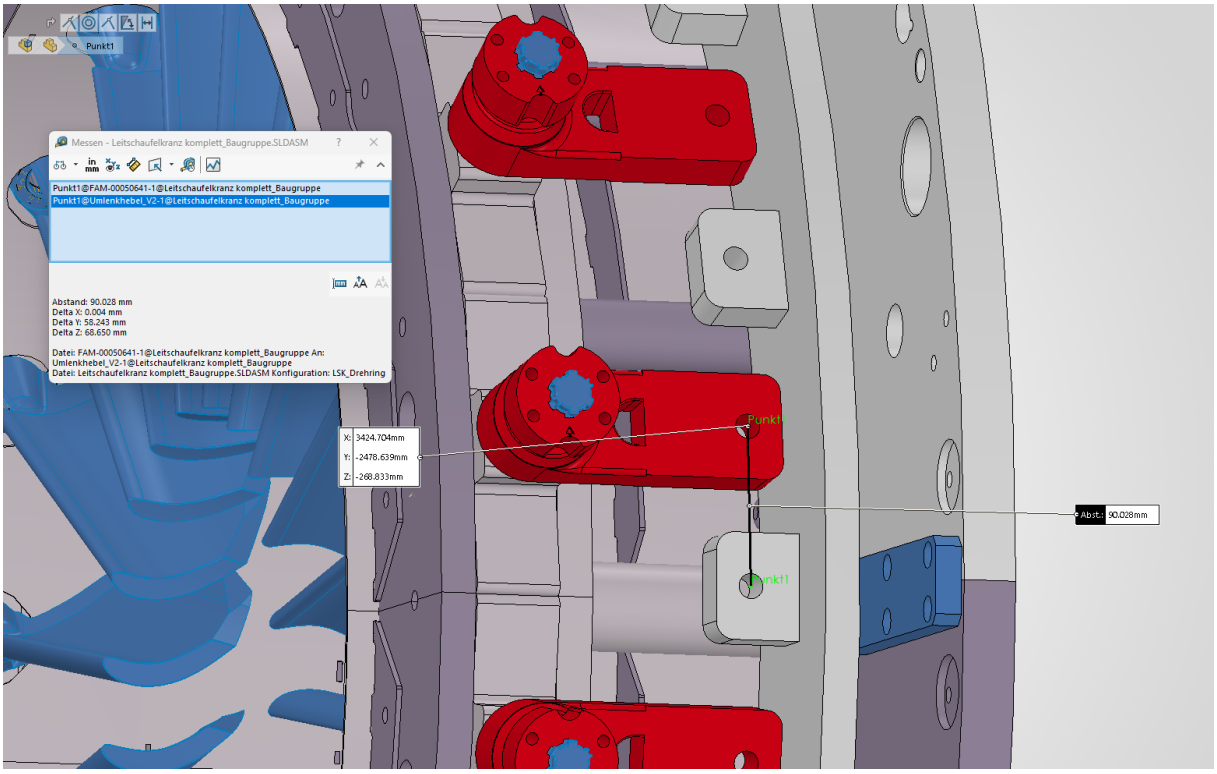


Bild 38: Messung Drehring Schaufelstellung 22.5 Grad

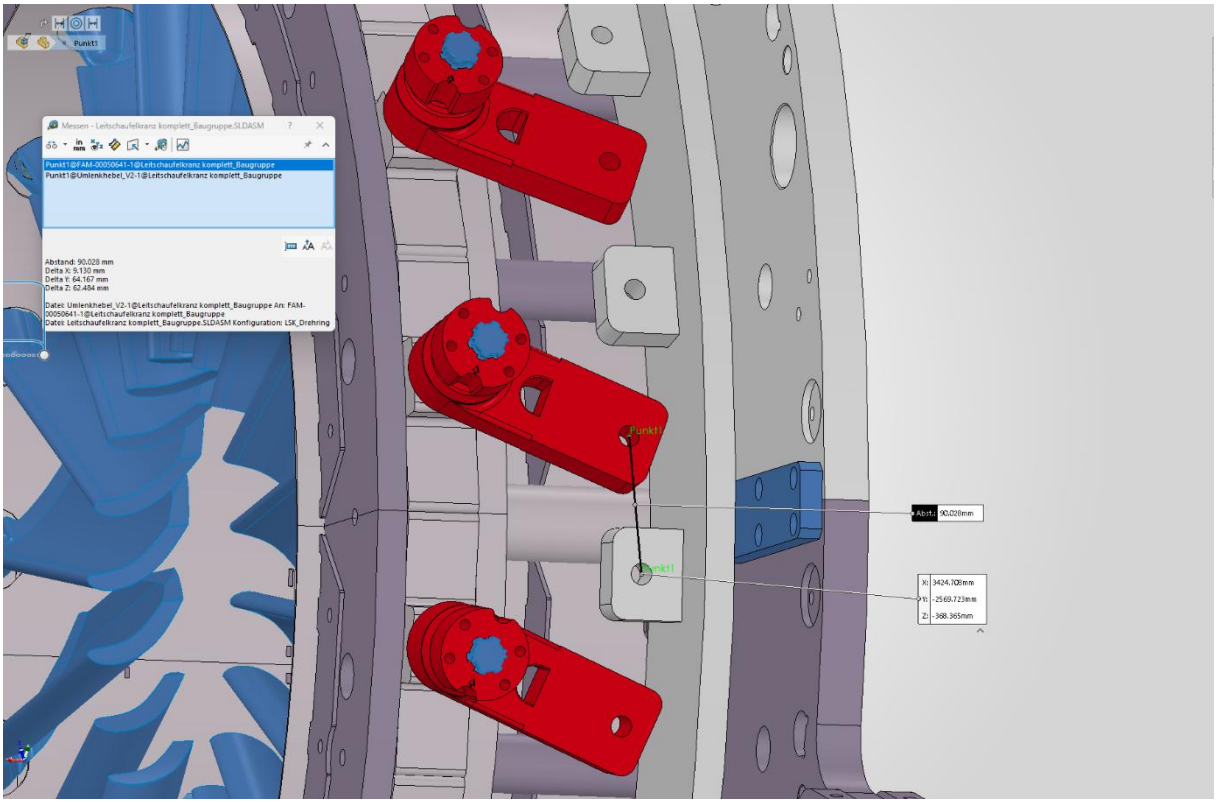


Bild 39: Messung Drehring Schaufelstellung 0 Grad

Variante 2

Da bei der Variante zwei kein zusätzlicher Drehring vonnöten ist, mussten die Hebel mit den Bohrungen nicht noch zusätzlich auf ein anderes Bauteil verknüpft werden, sondern konnten direkt in den verschiedenen Stellungen untereinander vermessen werden.

Dabei zeigte sich ein interessantes Bild. Der Abstand zwischen den Punkten der Bohrungen veränderte sich je nach Stellung der Anlenkhebel. Das hiesse in der Praxis müssten sich die Koppelstangen in ihrer Länge je nach Schaufelstellung um einige Millimeter dehnen oder stauchen lassen, was natürlich nicht möglich war. Um eine falsche Anbindungsposition der Koppelstangen auszuschliessen, führte ich die Messungen in drei verschiedenen Varianten durch. Einmal obere Bohrung mit oberer Bohrung, dann untere Bohrung mit oberer Bohrung und eine zentrale Bohrung hinten am Anlenkhebel mit der nächsten zentralen Bohrung hinten.

Bei allen drei Messvarianten zeigte sich immer das gleiche Ergebnis: Der Abstand ändert sich über den Verstellbereich. Je nach Anbindungsvariante war die Differenz zwischen 1.258 mm und 5.135 mm.

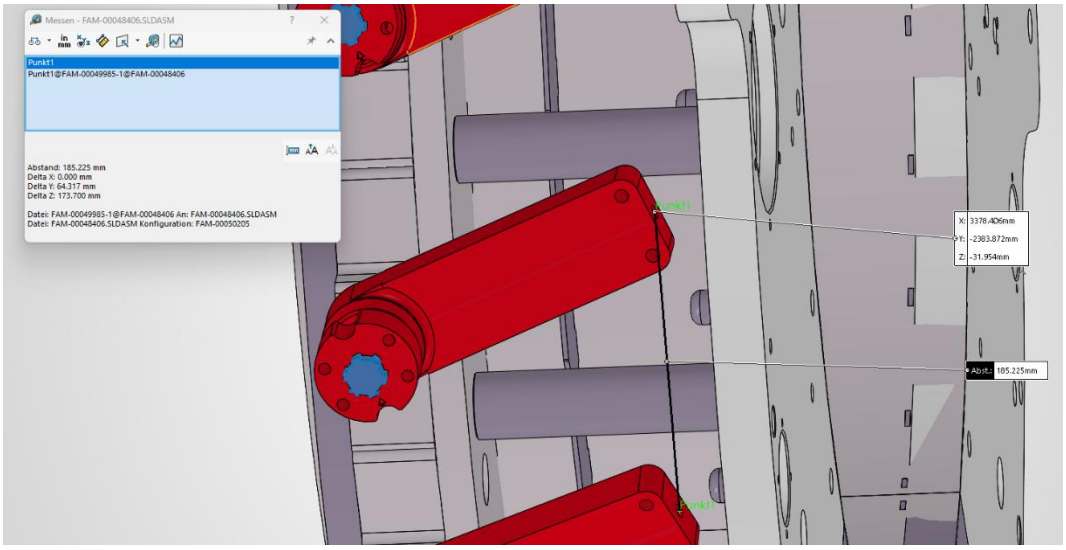


Bild 40: Messung Mitte Schaufelstellung 45 Grad

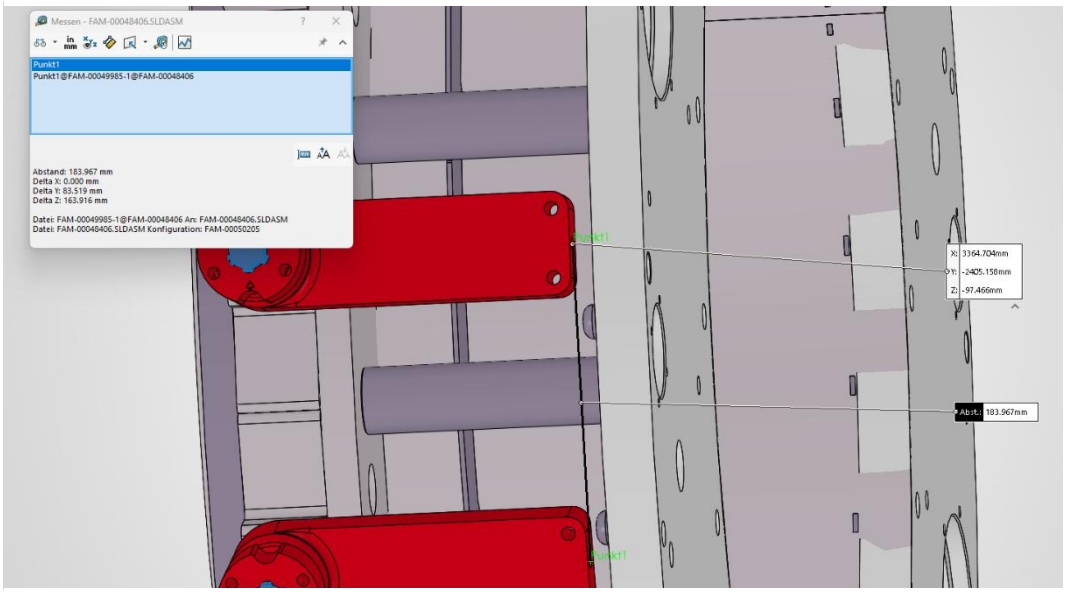


Bild 41: Messung Mitte Schaufelstellung 22.5 Grad

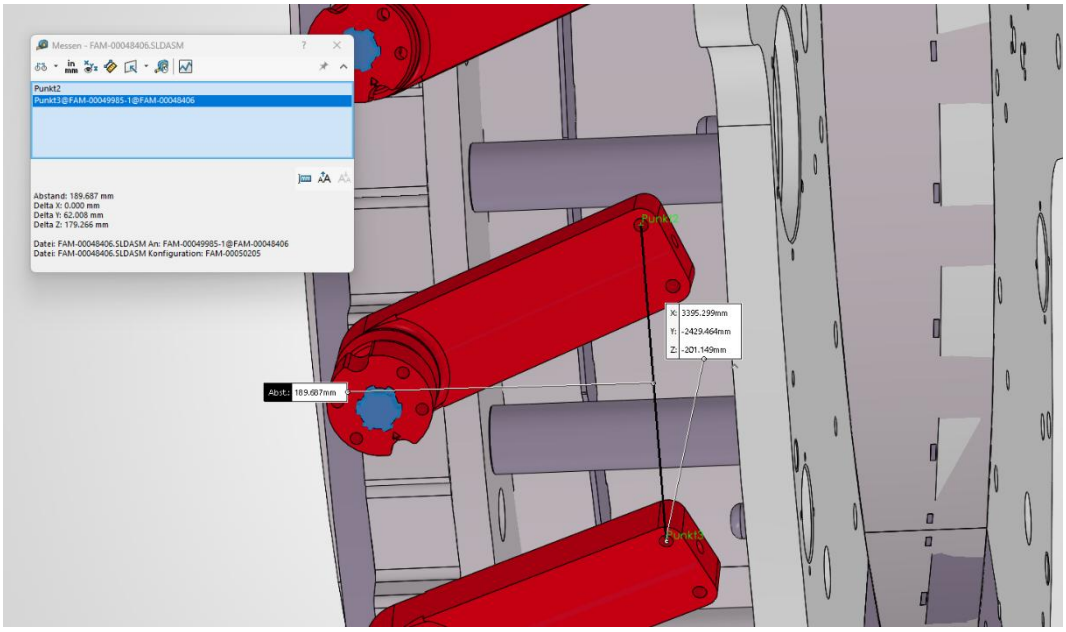


Bild 42: Messung Oben-Oben Schaufel 45 Grad

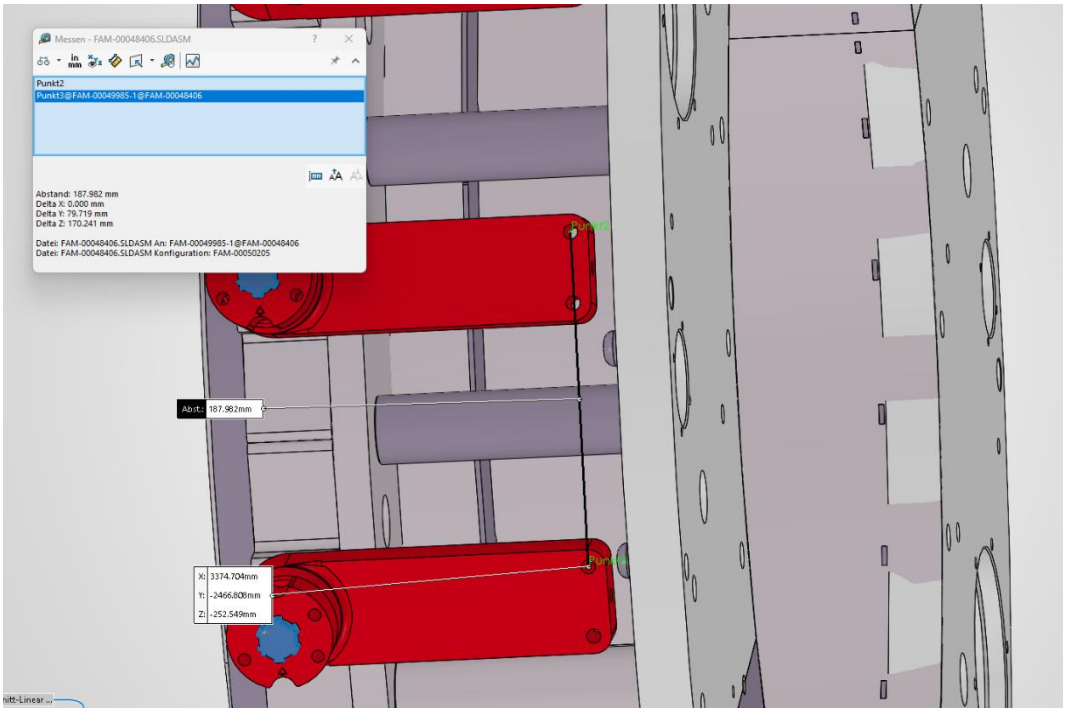


Bild 43: Messung Oben-Oben Schaufel 22.5 Grad

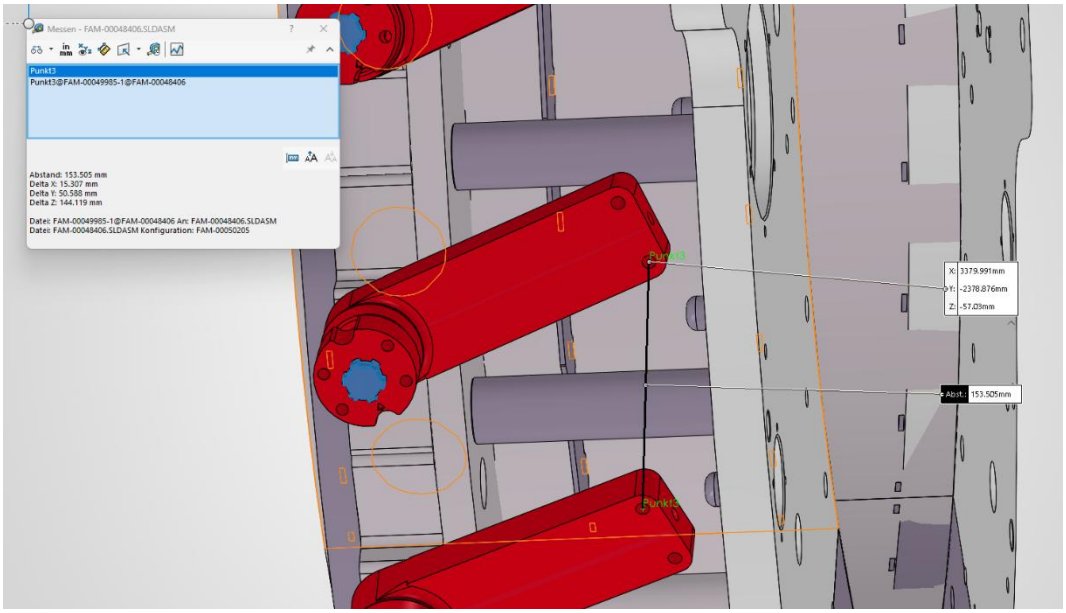


Bild 45: Messung Unten-Oben Schaufel 45 Grad

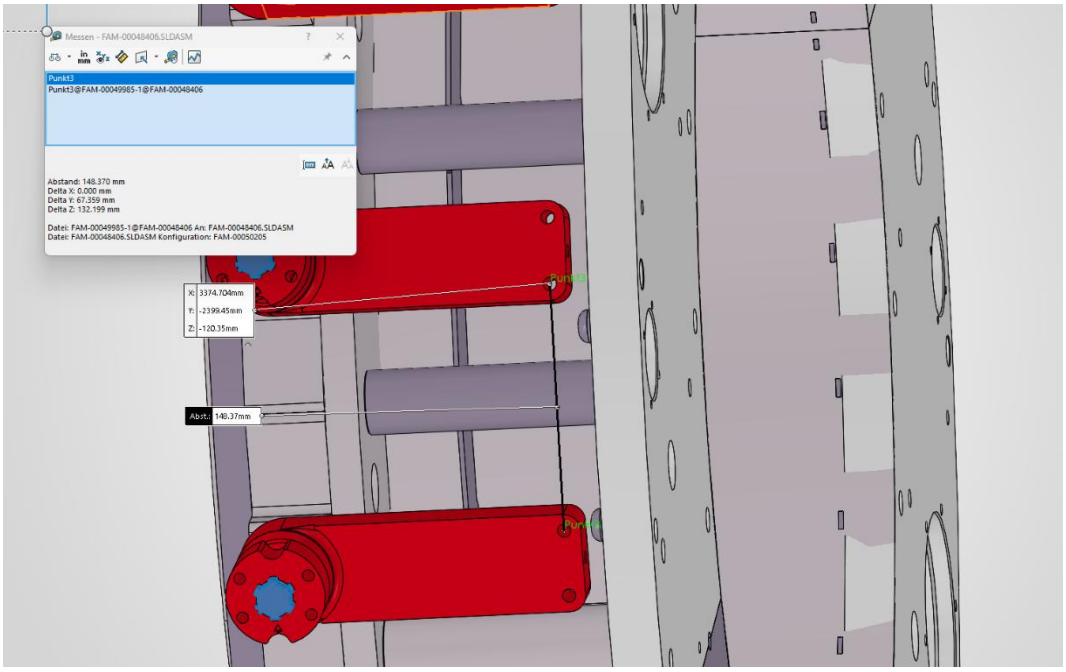


Bild 44: Messung Unten-Oben Schaufel 22.5 Grad

Wieso ist das so?

Beim Verstellen wandert das Ende des Anlenkhebels auf einen etwas grösseren Kreis hinaus, und auf einem grösseren Kreis liegen die zwei Anlenkpunkte weiter auseinander als vorher. Dieses Beispiel zeigt das Problem rechnerisch Schritt für Schritt auf:

1. **Nullstellung:** Der Hebel zeigt parallel zur Mittelachse des LSK nach vorne. Sein Anlenkpunkt liegt damit genau auf dem Teilkreis, also auf R = 605 mm.
2. **Beim Verstellen:** Der Hebel schwenkt um φ. Sein Ende bewegt sich dabei seitlich, also in Umfangsrichtung, um $l \cdot sin\,\varphi$. Bei 22.5° sind das $180\,mm \cdot sin\,22.5° \approx 68.88\,mm$.
3. **Pythagoras:** Dieser seitliche Weg steht senkrecht auf dem Radius. Der Anlenkpunkt ist danach nicht mehr 605 mm von der Mittelachse des LSK entfernt, sondern $\rho = \sqrt{(R^2 + (l \cdot sin\,\varphi)^2)} = \sqrt{(605^2 + 68.88^2)} \approx 608.9\,mm$ Er ist also 3.9 mm weiter draussen.
4. **Grösserer Kreis, längere Sehne:** Zwei Punkte im Teilungswinkel von 18° haben auf einem Kreis den Abstand $2 \cdot \rho \cdot sin\,9°$. Wird ρ grösser, wird auch dieser Abstand grösser. Sprich in diesem Beispiel sind die Punkte $2 \cdot 3.9\,mm \cdot sin\,9 = 1.22\,mm$ weiter voneinander entfernt.

Der Teilungswinkel von 18° ergibt sich durch 360° geteilt durch die 20 Schaufelachsen.

Mit folgender Skizze wird das Problem noch visuell dargestellt:

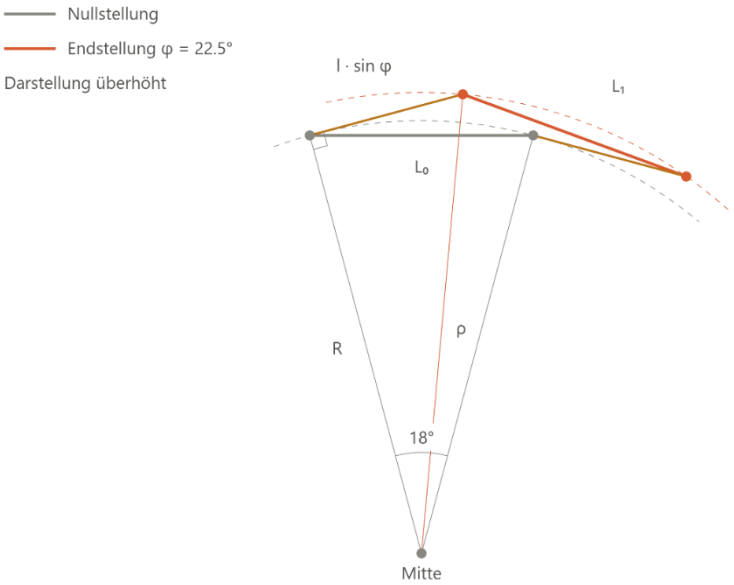


Bild 46: Skizze Ursache Unterschied Länge, Quelle: KI-generiert

- **Nullstellung**: Beide Anlenkpunkte liegen auf dem Teilkreis $R = 605\,mm$ von der Mitte des LSK, die graue Koppelstange hat die Länge L_0.
- **Endstellung**: Die Hebel sind um $\varphi = 22.5°$ geschwenkt, die Anlenkpunkte sind seitlich um $180mm \cdot sin\,\varphi$ gewandert und liegen dadurch auf dem grösseren Radius $\rho = 608.9\,mm$. Die Sehne L_1 zwischen ihnen ist um $2 \cdot (\rho - R) \cdot sin\,9° = 1.22\,mm$ länger als L_0.

Das rechtwinklige Dreieck aus $R, l \cdot sin\,\varphi$ und ρ ist der Kern: Weil der Anlenkhebel senkrecht auf der Achse der Leitschaufel dreht, gilt $\rho = \sqrt{(R^2 + (l \cdot sin\,\varphi)^2)}$, und ρ ist damit immer grösser als R.

Winkelfehler

Dadurch, dass die Koppelstangen bereits im günstigsten Fall laut CAD-Messung 1.258 mm zu kurz sind, ergibt sich eine erhebliche Winkelabweichung von der ersten zur letzten Schaufel. Wird das ganze gerechnet kommt man auf folgende Zahl pro Schaufel:

$$\Delta\varphi = \Delta L / (l \cdot cos\,9°) = 1.258\,mm / (180\,mm \cdot \cos 9°) \approx 0.00707\,rad$$

$$\approx 0.00707\,rad \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \approx 0.405°\,pro\,Glied$$

Diese Winkelabweichung wird jeweils immer auf die nächste Schaufel weitergegeben und summiert sich zum Schluss auf 7.7° auf. Sprich wenn die erste Schaufel auf Stellung 45° ist, ist die letzte Schaufel nur auf 37.3°.

Für die Praxis heisst das, die Variante 2 funktioniert mechanisch nicht.

Wenn man alle Anlenkhebel mit einer Schubstange zu einem Kreis verbindet, blockiert der Mechanismus bei der Verstellung. Wenn man die Kette offenlässt und nur 19 Schubstangen verwendet, blockiert der Mechanismus zwar nicht, jedoch ist die Winkelabweichung von 7.7° die sich ergibt weit weg von den geforderten maximalen 1°.

Wieso funktioniert es bei der ersten Variante?

Der Längenfehler der Koppelstangen, wenn sie untereinander gekoppelt werden würden, ist auch bei der ersten Variante vorhanden, die Hebel sind von den geometrischen Bedingungen ja gleich aufgebaut.

Der Unterschied ist aber, dass jeder Anlenkhebel einzeln und unabhängig von den anderen mit der Drehscheibe gekoppelt ist. Zudem sind alle 20 Verbindungen identisch aufgebaut und liegen auf dem gleichen Teilkreis. Es können also keine Fehler aufsummiert und als Winkelfehler weitergegeben werden.

Wo sich der Längenfehler aber auch bei dieser Variante bemerkbar macht, ist die nichtlineare Übertragung. Das heisst der Schaufelwinkel ist nicht proportional zum Drehscheibenwinkel.

Resultat der Variantenevaluation

Obwohl sich die Variante 2 bei der Nutzwertanalyse mit 0.98 Punkten Vorsprung als klarer Sieger herausstellte, wurde sie bei der Überprüfung der mechanischen Machbarkeit als untauglich identifiziert. Der Winkelfehler, der sich über die einzelnen Schaufeln aufsummiert ist mit 7.7° deutlich grösser als die vorgegebenen 1° aus dem Pflichtenheft.

Deshalb wird die **Variante 1 mit dem Drehring** als Favorit gewählt und zu einem 3D-CAD-Lösungskonzept ausgearbeitet.

7 Ausarbeitung der Variante

In diesem Kapitel wird die Variante zu einem vollwertigen Lösungskonzept ausgearbeitet. Wichtige Komponenten werden rechnerisch anhand der auftretenden Kräfte ausgelegt.

7.1 Phasenplan zur Umsetzung der Variante

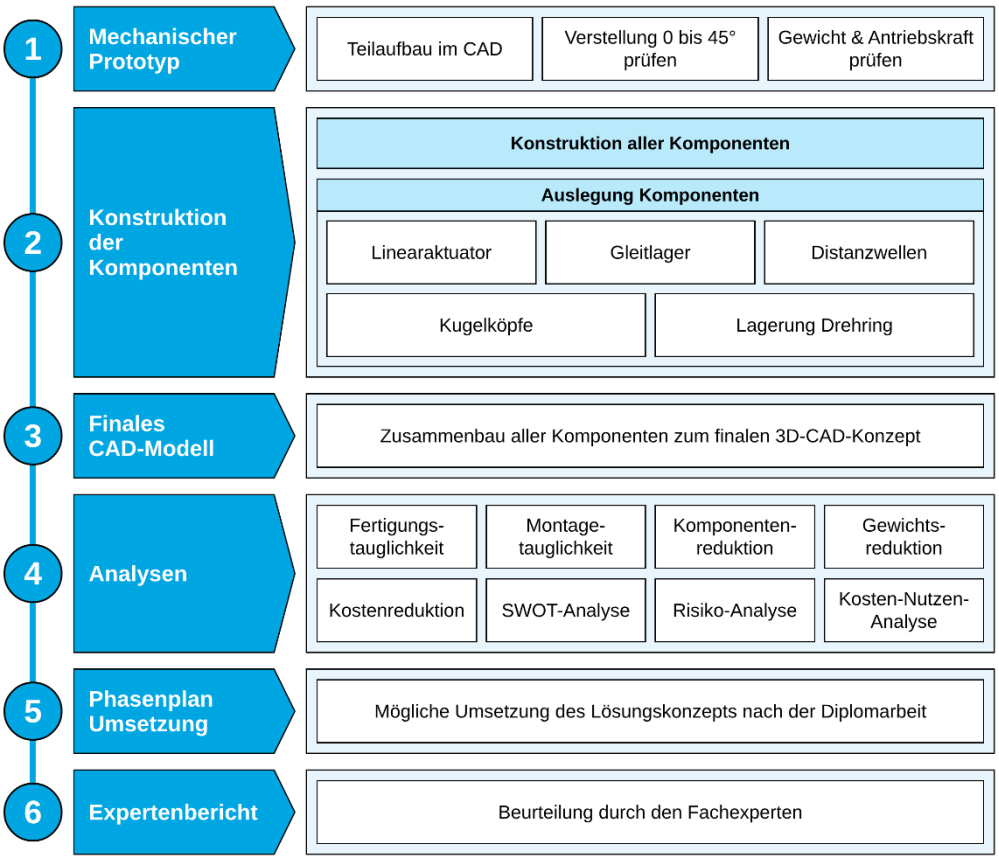


Diagramm 5: Phasenplan Umsetzung Variante Drehring

Als Erstes wird im CAD ein mechanischer Prototyp aufgebaut. Er basiert auf dem ursprünglichen Leitschaufelkranz, enthält aber bereits alle wichtigen Komponenten der neuen Variante. Lager, Antrieb, etc. werden dabei nur grob abgeschätzt. Am Prototyp werden erste Prüfungen der Antriebskraft, des Gewichts und des Verstellweges vorgenommen. Er bildet die Basis für das finale Modell.

In der zweiten Phase werden die Komponenten nacheinander final im CAD ausgearbeitet. Für Linearaktuator, Gleitlager, Distanzwellen, Kugelköpfe und die Lagerung des Drehrings werden die auftretenden Kräfte ermittelt und die Komponenten anhand dieser ausgelegt.

Sobald alle Komponenten konstruiert sind und ihr Zusammenspiel geprüft ist, wird das finale CAD-Modell inklusive Normteilen zusammengebaut. Daran wird danach der neue LSK mit dem bestehenden verglichen, zusätzlich zu einer SWOT-, Risiko- und Kosten-Nutzen-Analyse.

Ein weiterer Phasenplan zeigt die mögliche Umsetzung des Lösungskonzepts nach der Diplomarbeit.

Den Schluss bildet der Expertenbericht, in dem der Fachexperte die Lösung nach den Anforderungen im Pflichtenheft bewertet.

7.2 Finales CAD-Modell

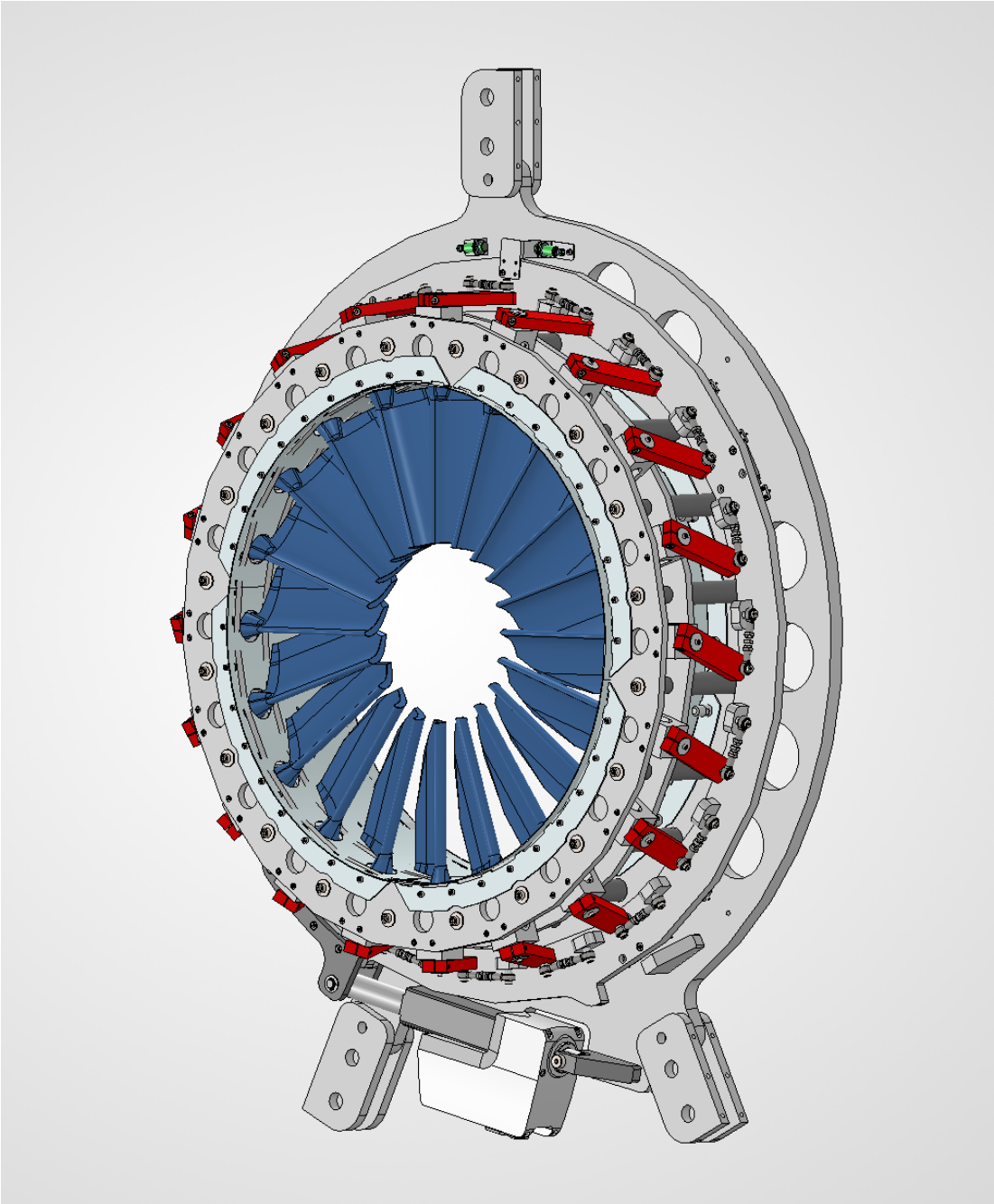


Bild 47: Finales CAD-Modell des Leitschaufelkranzes

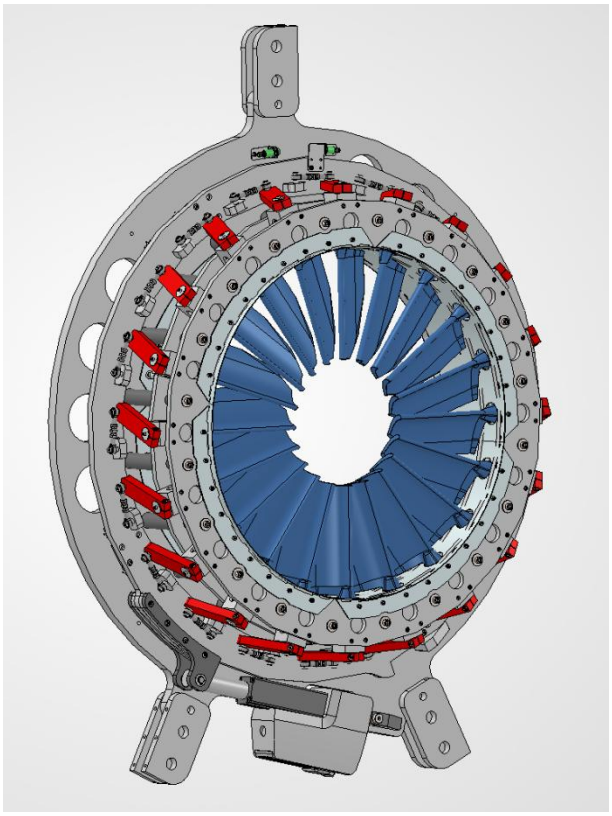


Bild 48: Ansicht LSK seitlich links



Bild 49: Seitenprofil LSK

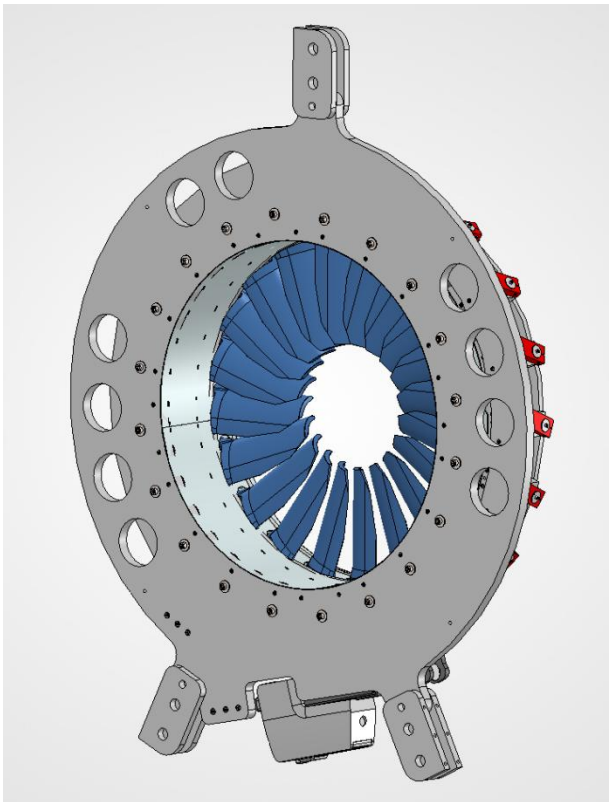


Bild 50: Ansicht LSK hinten

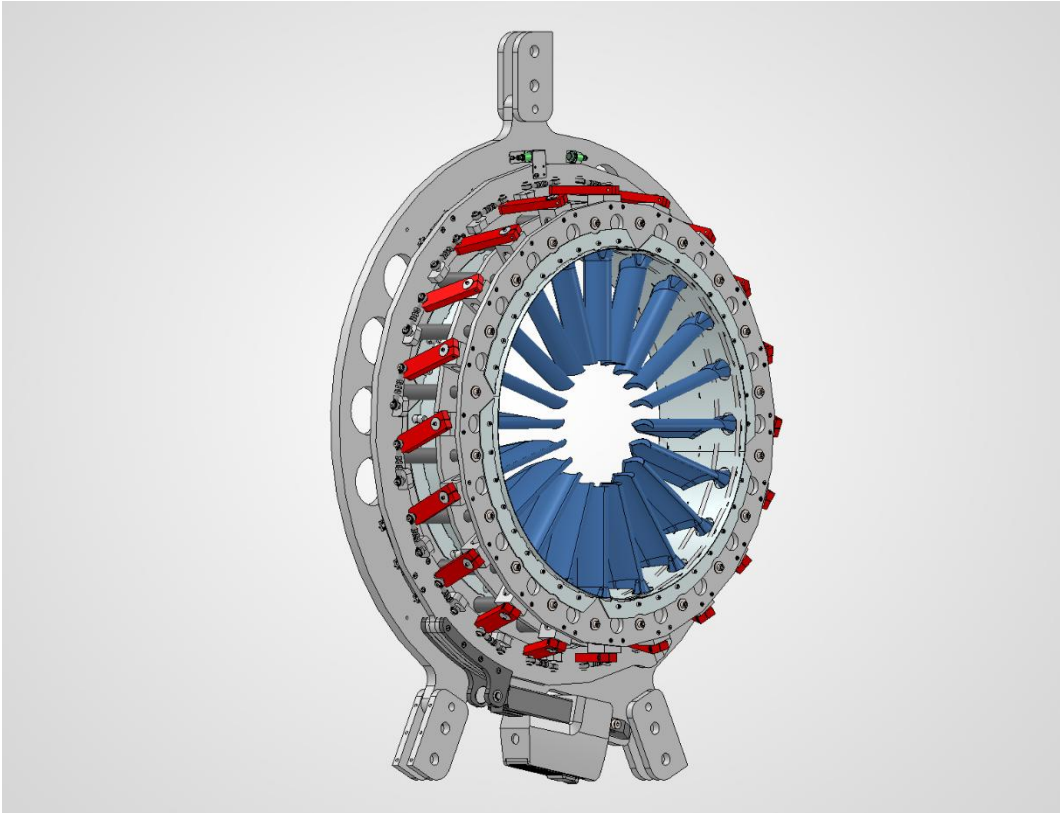


Bild 51: Ansicht LSK mit Schaufelstellung 45 Grad

Funktionsweise

Der neue Leitschaufelkranz funktioniert durch eine Verstellung der Schaufeln per Drehbewegung, statt wie beim ursprünglichen Leitschaufelkranz per Linearbewegung.

Der Linearaktuator fährt auf Befehl der Steuerung aus und setzt damit die grosse Alu Drehscheibe, welche auf den THK-Bogenführungen befestigt ist, in Bewegung.

Diese Drehbewegung wird von den Koppelstangen mit den Kugelköpfen auf die Anlenkhebel der Leitschaufeln übertragen.

Die Anlenkhebel wiederum sind direkt mit den Leitschaufeln verbunden und leiten die Bewegung der Koppelstangen in eine Winkelbewegung der Schaufeln um.

Es kann jede Position zwischen 0° und 45° eingestellt werden. Eine Failsave-Stellung gibt es nicht.

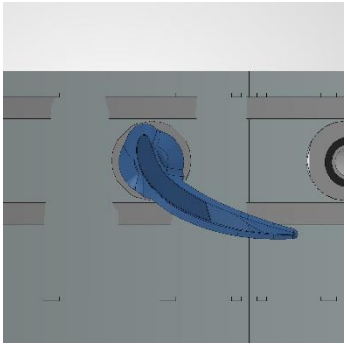


Bild 54: Stellung 0 Grad

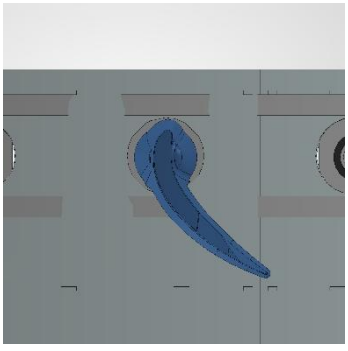


Bild 53: Stellung 22,5 Grad

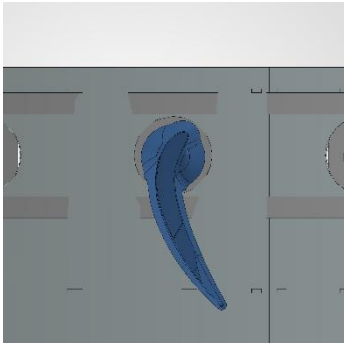


Bild 52: Stellung 45 Grad

7.3 Umsetzung Variante Drehring

7.3.1 Mechanischer Prototyp

Auf Basis des ursprünglichen Leitschaufelkranz-Modell wurde im CAD als erster Schritt ein mechanischer Prototyp des neuen Verstellmechanismus aufgebaut.

Die Grundplatte wurde nahezu 1:1 vom ursprünglichen Modell übernommen, lediglich die verschiedenen Bohrungen für die Motorenflansche wurden verschlossen. So konnte sichergestellt werden, dass die Anbindungspunkte zur Turbine auch beim neuen Leitschaufelkranz passen.

Genauso übernommen wurden die Distanzwellen, die den Lagerkranz mit der Grundplatte verbinden.

Für den Lagerkranz wurde bereits in diesem Schritt eine neue Version erstellt, mit etwas schlichteren Lagerböcken und je 5mm dünneren Aluminium-Platten vorne und hinten. Dadurch konnte mit dem eingesparten Vollmaterial der Lagerböcke bereits ca. 30 kg Gewicht eingespart werden.

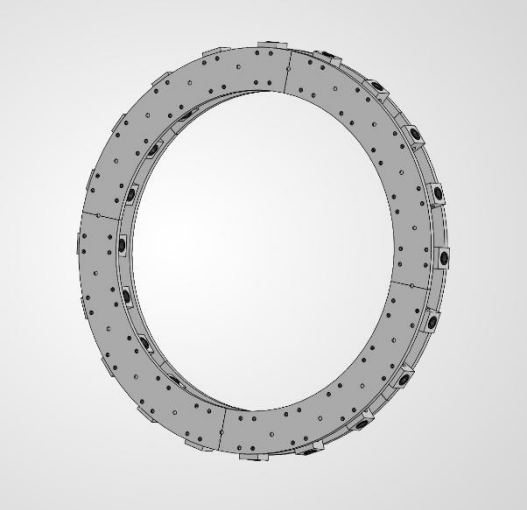


Bild 55: Lagerkranz mech. Prototyp

Die bestehenden Leitschaufeln wurden für den Prototyp bei der Anschlusswelle etwas eingekürzt und statt dem Vielzahn-Profil zum Anschluss wurde eine Passfedernut angebracht. Angedacht ist, dass die Welle der Leitschaufeln später aus Aluminium gefertigt werden und die Anlenkhebel mit einer Klemmverbindung, zusätzlich geführt von einer Passfeder, mit den Schaufeln verbunden sind. Dadurch kann auf das komplexe Vielzahnprofil in Bohrung und Welle verzichtet werden.

Für die Lagerung des Aluminium-Drehrings wurden beim Prototyp vorerst THK HCR35 Bogenführungen in einem Radius von 600 mm eingesetzt.

An dem Drehring verschraubt sind 20 Aluminium-Konsolen, die das Gegenstück zu den Anlenkhebeln bilden.

Die Koppelstangen bestehen aus einer kurzen Chromstahl Welle mit zwei Kugelköpfen. Die Kugelköpfe sind wichtig, um die Winkeländerungen beim Verstellen der Schaufeln aufnehmen zu können.

Dadurch dass die Komponenten dieses mechanischen Prototyps im CAD wie in der Realität verknüpft wurden, konnte der Bewegungsablauf bei einer Verstellung der Schaufeln von 0 - 45° exakt nachvollzogen, geprüft und vermessen werden.

Wie sich zeigte funktionierte die Verstellung im CAD, wie sie sollte. Der ganze Verstellbereich konnte gefahren werden und es gab keine Kollisionen von einzelnen Komponenten während der Verstellung.

Dieser mechanische Prototyp bildet die Basis für den neuen Leitschaufelkranz.

Messungen und Rechnungen am Prototyp

Durch die vollständig definierte Geometrie konnten nun Messungen am Modell mit der integrierten Messfunktion von SolidWorks durchgeführt werden. Anhand dieser Messungen konnte die Antriebskraft für die Schaufeln, die bei diesem Prototyp nötig wäre, berechnet werden. Dies ist ein wichtiger Anhaltspunkt für die weitere Ausarbeitung, zur Wahl der Lagerung oder zur Bestimmung des passenden Aktuators.

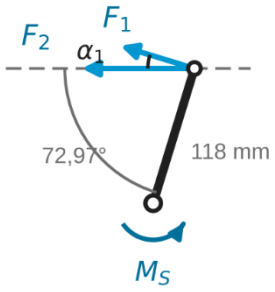
Die Rechnungen wurden für die Schaufelstellung bei 0°, 22.5° und 45° durchgeführt, da sich die Winkel an den Gelenkstellen über den Verstellbereich verändern.

Die Handrechnungen sowie die Screenshots der CAD-Messungen sind im Anhang zu finden.

Ausgangswerte: M_S = 55 Nm r_H = 118 mm r_K = 596,5 mm R_A = 670 mm z = 20 Leitschaufeln

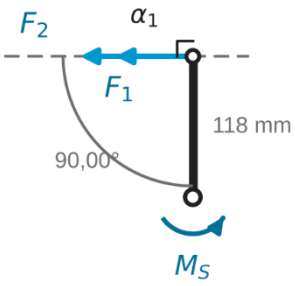
Kraft am Anlenkhebel: $F_1 = \frac{M_S}{r_H} = \frac{55\ \text{Nm}}{0{,}118\ \text{m}} = 466{,}1\ \text{N}$

Schaufelstellung 0°



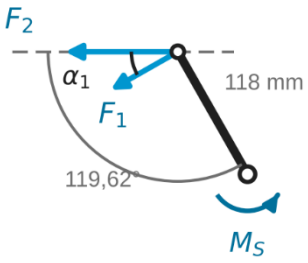
α_1 = 17,03°
F_1 = 466,1 N → F_2 = 487,48 N

Schaufelstellung 22,5°



α_1 = 0°
$F_1 = F_2$ = 466,1 N

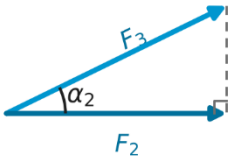
Schaufelstellung 45°



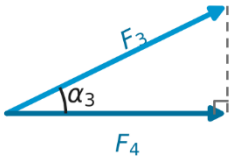
α_1 = 29,62°
F_1 = 466,1 N → F_2 = 536,17 N

a) Gelenk Anlenkhebel – Koppelstange

b) Gelenk Koppelstange – Konsole



$F_3 = F_2 / \cos\alpha_2$



$F_4 = F_3 \cdot \cos\alpha_3$

Schaufelstellung 0°

α_1 = 17,03° (90° − 72,97°) | **α_2** = 1,18° | **α_3** = 3,41°

1. Kraft Anlenkhebel	$F_2 = \frac{466{,}1\ \text{N}}{\cos(17{,}03°)} = 487{,}475\ \text{N}$
2. Anlenkhebel - Koppelstange	$F_3 = \frac{487{,}475\ \text{N}}{\cos(1{,}18°)} = 487{,}58\ \text{N}$
3. Koppelstange - Konsole	$F_4 = 487{,}58\ \text{N} \cdot \cos(3{,}41°) = 486{,}72\ \text{N}$
4. Moment am Drehring	$M_1 = 486{,}72\ \text{N} \cdot 0{,}5965\ \text{m} = 290{,}33\ \text{Nm}$
5. Gesamtmoment	$M_{ges} = 20 \cdot 290{,}33\ \text{Nm} = 5806{,}51\ \text{Nm}$
6. Antriebskraft	$F_A = \frac{5806{,}51\ \text{Nm}}{0{,}67\ \text{m}} = 8666{,}44\ \text{N}$

Schaufelstellung 22,5°

α₁ = 0° (Hebel senkrecht) | **α₂** = 4,5° | **α₃** = 4,5°

1. Kraft Anlenkhebel $F_2 = \frac{466{,}1\ \text{N}}{\cos(0°)} = 466{,}1\ \text{N}$

2. Anlenkhebel - Koppelstange $F_3 = \frac{466{,}1\ \text{N}}{\cos(4{,}5°)} = 467{,}54\ \text{N}$

3. Koppelstange - Konsole $F_4 = 467{,}54\ \text{N} \cdot \cos(4{,}5°) = 466{,}1\ \text{N}$

4. Moment am Drehring $M_1 = 466{,}1\ \text{N} \cdot 0{,}5965\ \text{m} = 278{,}03\ \text{Nm}$

5. Gesamtmoment $M_{ges} = 20 \cdot 278{,}03\ \text{Nm} = 5560{,}57\ \text{Nm}$

6. Antriebskraft $F_A = \frac{5560{,}57\ \text{Nm}}{0{,}67\ \text{m}} = 8299{,}36\ \text{N}$

Schaufelstellung 45°

α₁ = 29,62° (119,62° − 90°) | **α₂** = 9,8° | **α₃** = 3,41°

1. Kraft Anlenkhebel $F_2 = \frac{466{,}1\ \text{N}}{\cos(29{,}62°)} = 536{,}165\ \text{N}$

2. Anlenkhebel - Koppelstange $F_3 = \frac{536{,}165\ \text{N}}{\cos(9{,}8°)} = 544{,}1\ \text{N}$

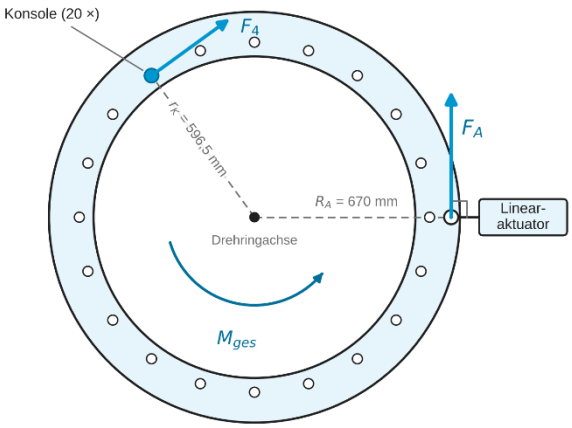
3. Koppelstange - Konsole $F_4 = 544{,}1\ \text{N} \cdot \cos(3{,}41°) = 543{,}14\ \text{N}$

4. Moment am Drehring $M_1 = 543{,}14\ \text{N} \cdot 0{,}5965\ \text{m} = 323{,}98\ \text{Nm}$

5. Gesamtmoment $M_{ges} = 20 \cdot 323{,}98\ \text{Nm} = 6479{,}67\ \text{Nm}$

6. Antriebskraft $F_A = \frac{6479{,}67\ \text{Nm}}{0{,}67\ \text{m}} = 9671{,}15\ \text{N}$

Wie man den Ergebnissen entnehmen kann, ist für die Auslegung vor allem die Stellung der Schaufeln bei Winkel von 45° von Bedeutung. Bei dieser Stellung ist die benötigte Antriebskraft mit rund 9.7 kN am höchsten.



Gewicht Prototyp

Dadurch, dass allen Teilen im CAD ein Material zugewiesen wurden, konnte das Gesamtgewicht der Baugruppe bei den Masseneigenschaften in SolidWorks ausgelesen werden. Es beträgt beim Prototyp 236 kg, also noch deutlich über dem Zielwert von 100 kg.

Im nächsten Schritt werden die einzelnen Bauteile des mechanischen Prototyps für die finale Lösung fertig ausgearbeitet, optimiert und ausgelegt.

7.3.2 Linearaktuator

Die Auswahl des geeigneten Linearaktuators erfolgt in mehreren Schritten.

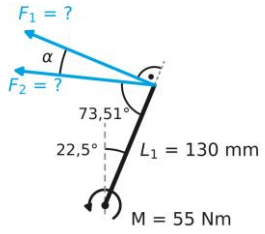
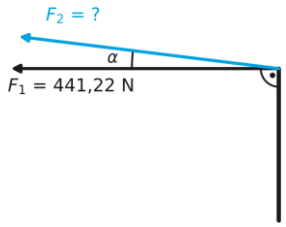
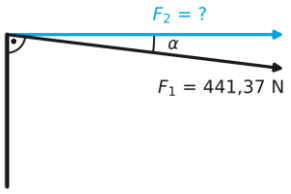
Benötigte Antriebskraft

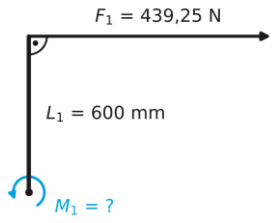
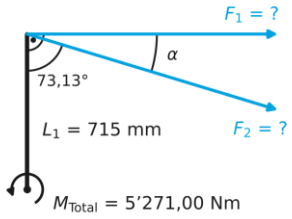
Als erstes wird mit dem finalen Aufbau die nötige Antriebskraft berechnet. Dies wird nach dem gleichen Schema getan, wie bei dem mechanischen Prototyp.

Dafür werden in einem ersten Schritt in SolidWorks Messungen am Modell vorgenommen für die Schaufelstellungen 0°, 22.5° und 45°:

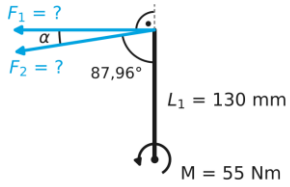
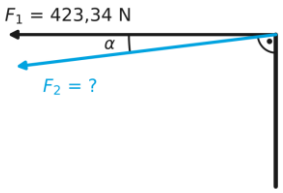
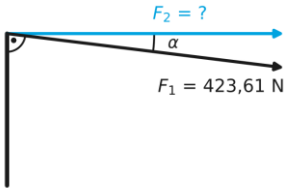
Messungen	Wert 0°	Wert 22.5°	Wert 45°
Hebellänge Anlenkhebel	130 mm	130 mm	130 mm
Winkel Mittelachse Anlenkhebel - Koppelstange	73.51°	87.96°	60.37° (119.63°)
Winkel Fläche Anlenkhebel - Koppelstange	1.49°	2.04°	8°
Winkel Koppelstange - Konsole	5.61°	6.93°	5.61°
Radius Mitte LSK – Anbindung Koppelstange Konsole	600 mm	600 mm	600 mm
Radius Mitte LSK – Anbindung Linearaktuator	715 mm	715 mm	715 mm
Winkel Linearaktuator – Mittelachse Drehring	73.13°	76.14°	79.25°

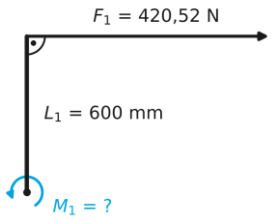
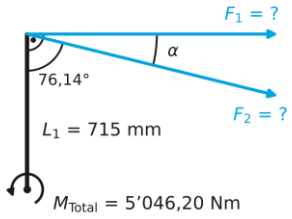
Benötigte Antriebskraft bei 0°

Schritt	Berechnung	Skizze
1	**Kraft Anlenkhebel** $\alpha = 90° - 73{,}51° = 16{,}49°$ $F_1 = \frac{M}{L_1} = \frac{55\ \text{Nm}}{0{,}13\ \text{m}} = \underline{423{,}07\ \text{N}}$ $F_2 = \frac{F_1}{\cos\alpha} = \frac{423{,}07\ \text{N}}{\cos(16{,}49°)} = \underline{\underline{441{,}22\ \text{N}}}$	
2	**Kraft Anlenkhebel – Koppelstange** $\alpha = 1{,}49°$ $F_2 = \frac{F_1}{\cos\alpha} = \frac{441{,}22\ \text{N}}{\cos(1{,}49°)} = \underline{\underline{441{,}37\ \text{N}}}$	
3	**Kraft Koppelstange – Konsole** $\alpha = 5{,}61°$ $F_2 = F_1 \cdot \cos\alpha = 441{,}37\ \text{N} \cdot \cos(5{,}61°) = \underline{\underline{439{,}25\ \text{N}}}$	

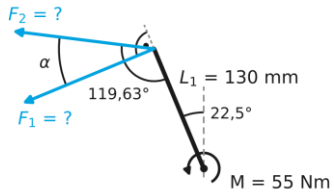
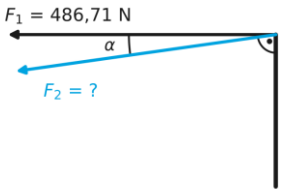
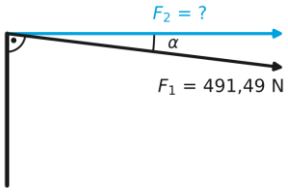
Schritt	Berechnung	Skizze
4	**Drehmoment Ring** $M_1 = F_1 \cdot L_1 = 439{,}25\ \text{N} \cdot 0{,}6\ \text{m} = \underline{263{,}55\ \text{Nm}}$ $M_{\text{Total}} = z \cdot M_1 = 20 \cdot 263{,}55\ \text{Nm} = \underline{\underline{5'271{,}00\ \text{Nm}}}$ z = 20 (Anzahl Leitschaufeln)	
5	**Benötigte Antriebskraft** $\alpha = 90° - 73{,}13° = 16{,}87°$ $F_1 = \frac{M_{\text{Total}}}{L_1} = \frac{5'271{,}00\ \text{Nm}}{0{,}715\ \text{m}} = \underline{7'372{,}03\ \text{N}}$ $F_2 = \frac{F_1}{\cos\alpha} = \frac{7'372{,}03\ \text{N}}{\cos(16{,}87°)} = \underline{\underline{\mathbf{7'703{,}55\ N}}}$	

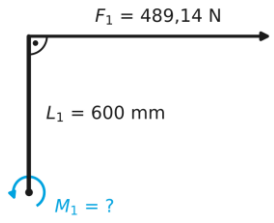
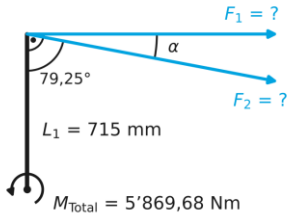
Benötigte Antriebskraft bei 22.5°

Schritt	Berechnung	Skizze
1	**Kraft Anlenkhebel** $\alpha = 90° - 87{,}96° = 2{,}04°$ $F_1 = \frac{M}{L_1} = \frac{55\ \text{Nm}}{0{,}13\ \text{m}} = \underline{423{,}07\ \text{N}}$ $F_2 = \frac{F_1}{\cos\alpha} = \frac{423{,}07\ \text{N}}{\cos(2{,}04°)} = \underline{\underline{423{,}34\ \text{N}}}$	
2	**Kraft Anlenkhebel – Koppelstange** $\alpha = 2{,}04°$ $F_2 = \frac{F_1}{\cos\alpha} = \frac{423{,}34\ \text{N}}{\cos(2{,}04°)} = \underline{\underline{423{,}61\ \text{N}}}$	
3	**Kraft Koppelstange – Konsole** $\alpha = 6{,}93°$ $F_2 = F_1 \cdot \cos\alpha = 423{,}61\ \text{N} \cdot \cos(6{,}93°) = \underline{420{,}52\ \text{N}}$	

Schritt	Berechnung	Skizze
4	**Drehmoment Ring** $M_1 = F_1 \cdot L_1 = 420{,}52\ \text{N} \cdot 0{,}6\ \text{m} = \underline{252{,}31\ \text{Nm}}$ $M_{\text{Total}} = z \cdot M_1 = 20 \cdot 252{,}31\ \text{Nm} = \underline{\underline{5'046{,}20\ \text{Nm}}}$ z = 20 (Anzahl Leitschaufeln)	
5	**Benötigte Antriebskraft** $\alpha = 90° - 76{,}14° = 13{,}86°$ $F_1 = \frac{M_{\text{Total}}}{L_1} = \frac{5'046{,}20\ \text{Nm}}{0{,}715\ \text{m}} = \underline{7'057{,}62\ \text{N}}$ $F_2 = \frac{F_1}{\cos\alpha} = \frac{7'057{,}62\ \text{N}}{\cos(13{,}86°)} = \underline{\underline{\mathbf{7'269{,}27\ N}}}$	

Benötigte Antriebskraft bei 45°

Schritt	Berechnung	Skizze
1	**Kraft Anlenkhebel** $\alpha = 119{,}63° - 90° = 29{,}63°$ $F_1 = \frac{M}{L_1} = \frac{55\ \text{Nm}}{0{,}13\ \text{m}} = \underline{423{,}07\ \text{N}}$ $F_2 = \frac{F_1}{\cos\alpha} = \frac{423{,}07\ \text{N}}{\cos(29{,}63°)} = \underline{\underline{486{,}71\ \text{N}}}$	
2	**Kraft Anlenkhebel – Koppelstange** $\alpha = 8{,}00°$ $F_2 = \frac{F_1}{\cos\alpha} = \frac{486{,}71\ \text{N}}{\cos(8{,}00°)} = \underline{\underline{491{,}49\ \text{N}}}$	
3	**Kraft Koppelstange – Konsole** $\alpha = 5{,}61°$ $F_2 = F_1 \cdot \cos\alpha = 491{,}49\ \text{N} \cdot \cos(5{,}61°) = \underline{\underline{489{,}14\ \text{N}}}$	

Schritt	Berechnung	Skizze
4	**Drehmoment Ring** $M_1 = F_1 \cdot L_1 = 489{,}14\ \text{N} \cdot 0{,}6\ \text{m} = \underline{293{,}48\ \text{Nm}}$ $M_{\text{Total}} = z \cdot M_1 = 20 \cdot 293{,}48\ \text{Nm} = \underline{\underline{5'869{,}68\ \text{Nm}}}$ z = 20 (Anzahl Leitschaufeln)	
5	**Benötigte Antriebskraft** $\alpha = 90° - 79{,}25° = 10{,}75°$ $F_1 = \frac{M_{\text{Total}}}{L_1} = \frac{5'869{,}68\ \text{Nm}}{0{,}715\ \text{m}} = \underline{8'209{,}34\ \text{N}}$ $F_2 = \frac{F_1}{\cos\alpha} = \frac{8'209{,}34\ \text{N}}{\cos(10{,}75°)} = \underline{\underline{\mathbf{8'355{,}98\ \text{N}}}}$	

Wie aus den Berechnungen ersichtlich ist, wird mit **8'355,98 N** die höchste Antriebskraft bei der 45 Grad Stellung der Schaufeln benötigt.

Diese Berechnungen dienen als Basis zur Wahl des passenden Aktuator-Typs, sowie für weitere Berechnungen im Zusammenhang mit dieser Diplomarbeit.

Wahl des Aktuator-Typs

Antriebskraft

Für die Wahl des passenden Linearaktuators werden verschiedene Modelle der Firma Thomson Linear verglichen. Die Firma bietet ein breites Angebot an starken, smarten und vor Umwelteinflüssen geschützten Linearaktuatoren für wenig Geld.

Die Linearaktuatoren müssen mindestens die benötigte Antriebskraft von 8,35 kN + etwas Reserve aufbringen können. Modelle mit unter 10 kN bei der dynamischen Tragzahl fallen somit raus. Infrage kommen nur die Modelle XD, HD, DMHD, B-Track und H-Track.

Umgebung

Für den Aussenbetrieb in der Turbine ist mindestens IP66 gefordert. Diese Schutzart erfüllen nur XD, HD, B-Track und H-Track.

Geschwindigkeit und Stellzeit

Gegeben ist ein Verfahrweg von 0 - 45 Grad von 115,561 mm bei einer Stellzeit von 90 s. Das ergibt eine Geschwindigkeit von $v = \frac{s}{t} = \frac{115{,}561\ mm}{90\ s.} = 1.28\ mm/s.$

Dies erfüllen alle Baureihen.

Steuerung und Positionsrückführung

Der Linearaktuator muss mit seiner integrierten Steuerung seine Position an die SPS ausgeben können. Zudem müssen die Aus- und Einfahrgrenzen programmierbar sein, da nicht der ganze Hub genutzt werden kann.

H-Track hat keine Positionsrückführung und B-Track keine programmierbaren Aus- und Einfahrgrenzen. Somit bleibt nur noch XD und HD übrig.

Einschaltdauer

Pro Stunde müssen maximal vier Verstellungen vollzogen werden. Beim HD dauert ein voller Verstellweg ca. 23 Sekunden bei 5 mm/s. Beim XD ca. 4,6 Sekunden bei 25 mm/s.

Die Einschaltdauer beim HD liegt somit bei ca. 2,6 % und beim XD bei ca. 0,5 %. Die zulässige Einschaltdauer beträgt beim HD 15% und beim XD 50% bei voller Last.

Formel: $4 \cdot Stellzeit\ in\ s. \div 3600\ s.\ (1\ Stunde) \cdot 100 = Einschaltdauer\ in\ \%$

Beide erfüllen also die Anforderung.

Variantenvergleich XD gegen HD

Der HD erfüllt ebenso alle Grundanforderungen wie der XD, ist aber ca. 4 kg leichter und kostet rund 1000 CHF weniger in der benötigten Konfiguration. Der HD hat jedoch einen Bürstenmotor mit Kohlebürsten, die verschleissen, der XD dagegen einen Bürstenlosen-Motor. Bei vier Verstellungen pro Stunde ergibt sich beim HD eine Laufzeit von ca. 224 h pro Jahr, beim XD aufgrund der höheren Geschwindigkeit nur ca. 45 h. Das heisst der Motor des HD verschleisst nicht nur durch die Bauart schon schneller als der des XD, sondern auch noch zusätzlich durch die deutlich höhere Laufzeit pro Jahr. Gewählt wird deshalb trotzdem der XD für eine lange Lebensdauer des Aktuators.

Formel Laufzeit: $\frac{4 \cdot Stellzeit\ in\ s. \cdot 8760\ h\ pro\ Jahr}{3600}$

Begründung für die Wahl von CANopen

Mit CANopen meldet der Aktuator Position, Geschwindigkeit, Stromaufnahme und Diagnosedaten zurück. Die Steuerung kennt somit jederzeit den tatsächlichen Schaufelwinkel. Auch die Geschwindigkeit ist drosselbar.

Zudem kann man eine Stromgrenze vorgeben, wodurch die Antriebskraft begrenzt wird. Ohne CANopen drückt der Aktuator bis zu seiner internen Überlastschaltung. Dadurch werden teure Folgeschäden an Anbindung, Drehring und Führungen im Blockierfall verhindert.

Die digitale Signalübertragung ist auch etwas weniger anfällig gegen elektromagnetische Störungen, wie sie bei der Turbine durch die Generatoren vorkommen können.

Detailauslegung

- Lastklasse: B080 (8 kN) ist zu schwach. Gewählt wird deshalb B160 mit 16 kN.
- Hub: Mit 115.561 mm benötigtem Stellweg wird die Version mit 150 mm Hub gewählt.
- Spannung: 24V, im Schaltschrank durch die SPS vorhanden.
- Steuerung: COO mit Positions- und Stromrückmeldung, einstellbarer Stromgrenze, Diagnose und dynamischen Bremsen über den ganzen Hub.
- Handbetätigung: Option R für die Handbetätigung bei der Inbetriebnahme und als Notverstellung.
- Adapter: Querbohrung M vorne und hinten, Bolzen 16 mm.
- Stossdämpfung: keine

Bestellcode: XD24B160-0150COORMMSN

Ein weiterer Vorteil des XD ist auch, dass er später genügend Reserven bietet für eine allfällige kontinuierliche Nachregelung.

7.3.3 Grundplatte

Die Grundplatte bestand im Original aus vier Einzelteilen, die zusammen verschraubt wurden. Dies wurde aus fertigungstechnischen Gründen damals so umgesetzt. Die Mehrteiligkeit hat aber mehrere Nachteile:

- Die einzelnen Platten müssen sehr genau und aufwendig toleriert werden, damit die Lochbilder später im zusammengebauten Zustand zueinander passen. Es sind ausführliche Überlegungen erforderlich, um die Zeichnungen so genau wie möglich zu tolerieren aber sie im Umkehrschluss auch nicht zu überbestimmen.
- Die erforderlichen genauen Toleranzen sind mit einem deutlich grösseren Fertigungsaufwand und somit auch mit Mehrkosten verbunden.
- Die Montage ist deutlich aufwändiger, die Platten müssen genau zueinander ausgerichtet und dann verschraubt werden.

Aus diesen Gründen wollte ich bei dem neuen Lösungskonzept auf eine mehrteilige Variante verzichten und die Platte als ein Stück konstruieren.

Um die Fertigungskosten bei einem so grossen Aluminiumteil im machbaren Rahmen zu halten, wird zuerst die Kontur der Platte mittels Wasserstrahlschneiden aus einer soliden Platte ausgeschnitten und erst danach die genauen Bohrungen auf einer Grossformat-CNC Fräsmaschine nachgearbeitet. Dadurch können die teuren CNC-Frässtunden auf ein Minimum reduziert werden.

Zur Reduktion des Gewichts wurden an der Platte, in den Bereichen, die keine Kräfte aufnehmen müssen, mehrere kreisförmige Ausschnitte angebracht. Dadurch kann rund 9.2 kg Gewicht gespart werden.

Das zusätzliche Material rechts unten an der Grundplatte mit den drei Durchgangsbohrungen für M8 Schrauben dient der Anbindung des Aktuators.

Um die Grundplatte, sowie später den ganzen Lagerkranz während der Montage transportieren zu können, sind noch vier M10 Gewinde für passende Ringschrauben eingebracht.

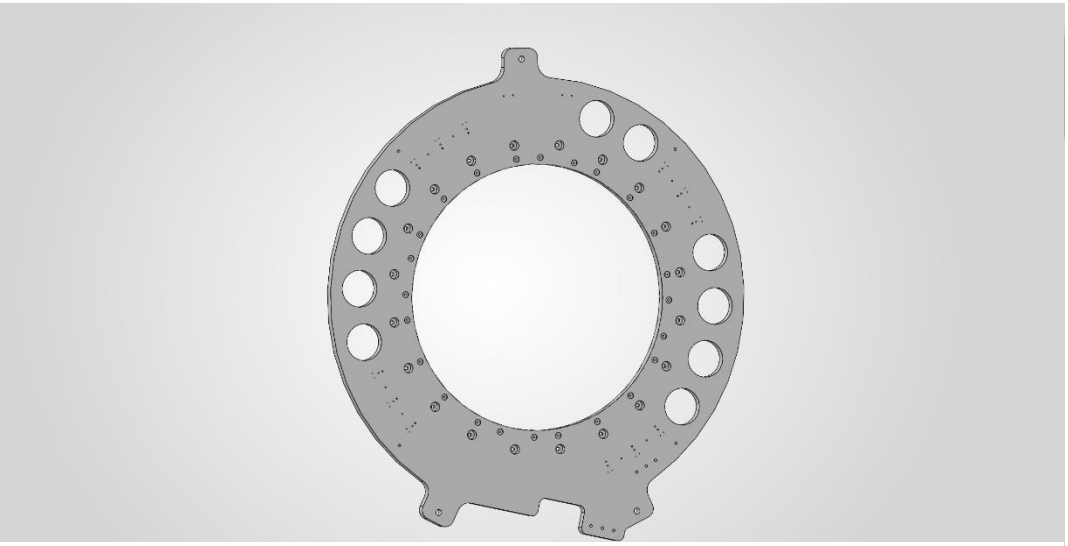


Bild 56: CAD-Modell Grundplatte

7.3.4 Aufhängungsplatten

Die Aufhängungsplatten werden unverändert vom bestehenden Leitschaufelkranz übernommen.

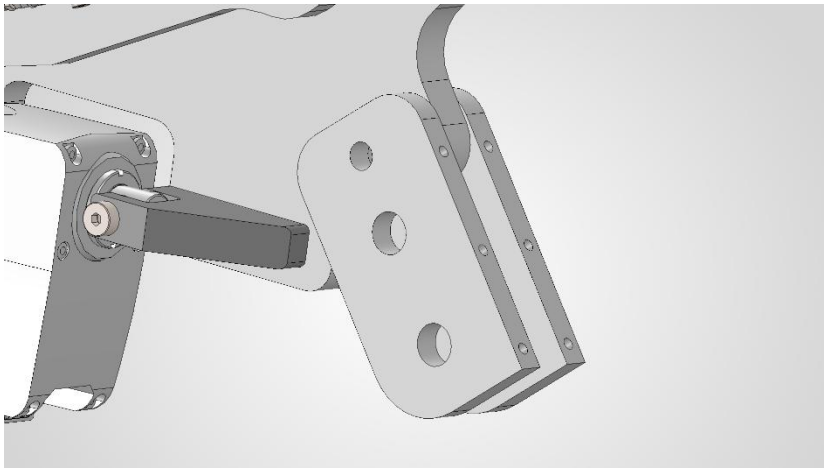


Bild 57: Aufhängungsplatten

7.3.5 Lagerkranz

Der bereits überarbeitete Lagerkranz des mechanischen Prototyps wurde für die finale Lösung noch weiter verfeinert. Die mehrteiligen Platten auf der Vorder- und Rückseite wurden ebenso wie bei der Grundplatte als ein Teil gestaltet. Das bringt die gleichen Vorteile in der Fertigungstauglichkeit und der Montagetauglichkeit wie bei der Grundplatte.

Genauso wurde bei den beiden Platten an unbelasteten Stellen kreisförmige Ausschnitte zur Gewichtsersparnis hinzugefügt. Bei den Lagerböcken wurden auch noch zusätzliche Langloch-Ausschnitte angebracht. Zusätzlich zu den Ausschnitten wurden bei den beiden Platten die Dicke von ursprünglichen 20 mm auf 15 mm reduziert. Mit allen Massnahmen zusammen kann nochmal 6,5 kg zur Version aus dem mechanischen Prototyp und insgesamt sogar 28,5 kg zum Lagerkranz des ursprünglichen LSK eingespart werden.

Als Lager für die Leitschaufeln in den Lagerböcken dienen je zwei zylindrische Bundbuchsen aus Iglidur G, der Firma Igus.



Bild 58: CAD-Modell Lagerkranz

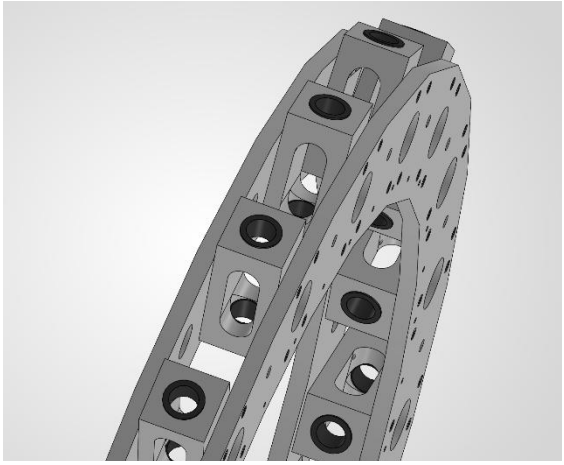


Bild 59: Detailansicht Lagerkranz

Berechnung Gleitlager

Mit folgenden Berechnungen wurde die vorhandene Flächenpressung bei einer Windstärke von 400 km/h gegen die zulässige Flächenpressung der Iglidur G Buchsen des Typs GFM-2528-21 geprüft:

Ausgangswerte

Grösse	Zeichen	Wert	Herkunft
Windgeschwindigkeit	v	400 km/h	Stefan Haberthür
Luftdichte bei 15 °C	ρ	1,225 kg/m³	Wikipedia
Widerstandsbeiwert Ringfläche	c_w	2,0	Annahme (konservativ)
Schaufelring aussen / innen	D_a / D_i	844 mm / 309 mm	CAD
Anzahl Leitschaufeln	n	20	CAD
Abstand Lager 2 – Lager 1	l	101,5 mm	CAD
Abstand Lager 1 – Angriffspunkt Windkraft	a	167,93 mm	CAD
Abstand Lager 2 – Angriffspunkt Windkraft	l_F	269,43 mm	CAD
Innendurchmesser / Länge Buchse GFM-2528-21	d_i / H	25 mm / 21,5 mm	igus
Zulässige Flächenpressung iglidur G	p_{zul}	80 MPa	igus, Datenblatt iglidur G

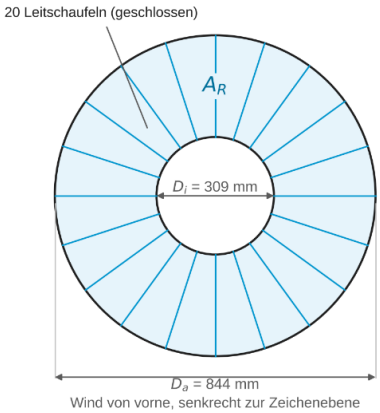
Windkraft auf Leitschaufeln

Für die Gesamtkraft wird vereinfacht mit einer geschlossenen Ringfläche gerechnet, welche durch 20 geteilt wird für den Wert einer Schaufel.

Windgeschwindigkeit und Staudruck

$$v = \frac{400\ \text{km/h}}{3{,}6} = 111{,}1\ \text{m/s}$$

$$q = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = \frac{1{,}225\ \text{kg/m}^3}{2} \cdot (111{,}1\ \text{m/s})^2 = 7560{,}2\ \text{Pa}$$



Ringfläche

$$A_R = \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_a^2 - D_i^2\right) = \frac{\pi}{4} \cdot \left(0{,}844^2 - 0{,}309^2\right)\ \text{m}^2 = 0{,}4845\ \text{m}^2$$

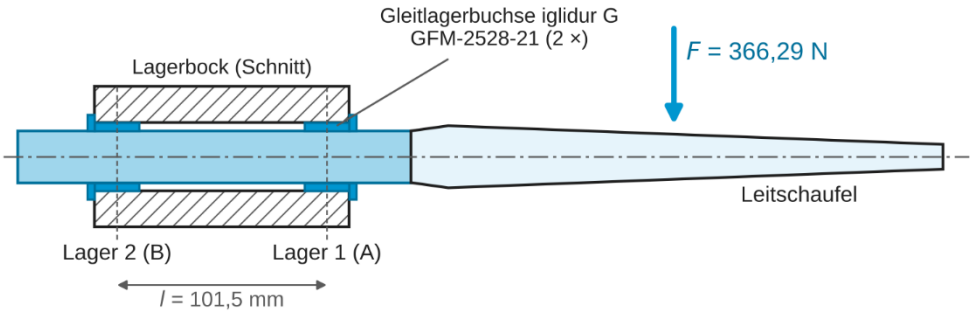
Windkraft

$$F_W = q \cdot A_R \cdot c_w = 7560{,}2\ \text{Pa} \cdot 0{,}4845\ \text{m}^2 \cdot 2{,}0 = 7325{,}83\ \text{N}$$

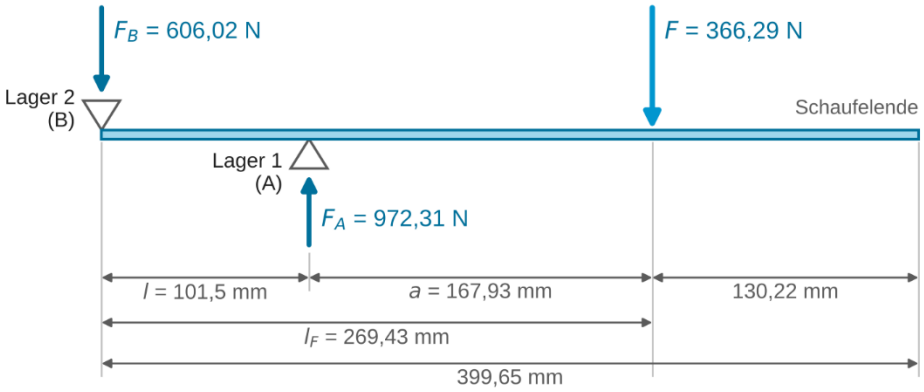
$$F = \frac{F_W}{n} = \frac{7325{,}83\ \text{N}}{20} = 366{,}29\ \text{N}$$

Stützkräfte in den Gleitlagern

Die Leitschaufel ist in einem Lagerbock mit zwei Lagerbuchsen gelagert. Die Windkraft F greift ausserhalb der Lager am Schaufelblatt an.



Für die Berechnung wird der Aufbau als Biegeträger mit zwei Lagern und einem Kragarm betrachtet.



Stützkräfte

$$F_A = F \cdot \left(1 + \frac{a}{l}\right) = 366{,}29\ \text{N} \cdot \left(1 + \frac{167{,}93\ \text{mm}}{101{,}5\ \text{mm}}\right) = 972{,}31\ \text{N}$$

$$F_B = F \cdot \frac{a}{l} = 366{,}29\ \text{N} \cdot \frac{167{,}93\ \text{mm}}{101{,}5\ \text{mm}} = 606{,}02\ \text{N}$$

Kontrolle mit dem Momentensatz

Das Momentengleichgewicht um Lager 2 (B) muss mit der berechneten Stützkraft F_A und den Abständen wieder die Windkraft F ergeben:

$$F \cdot l_F = F_A \cdot l$$

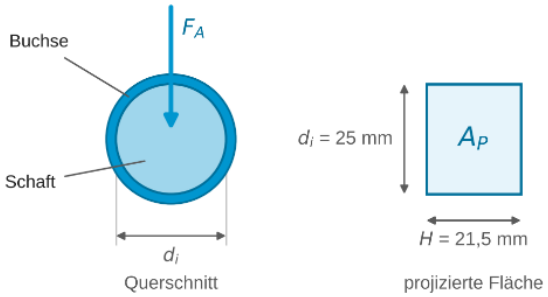
$$F = \frac{F_A \cdot l}{l_F} = \frac{972{,}31\ \text{N} \cdot 101{,}5\ \text{mm}}{269{,}43\ \text{mm}} = 366{,}29\ \text{N}$$

Die Kontrolle ergibt F = 366,29 N, die Kräfte sind demnach richtig berechnet.

Flächenpressung in den Gleitlagern

Für die Berechnung wird lediglich das Lager 1 beachtet, da seine Stützkraft mit 972,31 N deutlich höher ist.

Die projizierte Fläche ergibt sich aus dem Innendurchmesser des Lagers und dessen Höhe.



Projizierte Fläche

$$A_P = d_i \cdot H = 25\ \text{mm} \cdot 21{,}5\ \text{mm} = 537{,}5\ \text{mm}^2$$

Flächenpressung Lager

$$p = \frac{F_A}{A_P} = \frac{972{,}31\ \text{N}}{537{,}5\ \text{mm}^2} = 1{,}81\ \text{N/mm}^2 = 1{,}81\ \text{MPa}$$

Sicherheit

$$S = \frac{p_{zul}}{p} = \frac{80\ \text{MPa}}{1{,}81\ \text{MPa}} = 44{,}2$$

Die Gleitlagerbuchsen GFM-2528-21 aus iglidur G sind somit ausreichend dimensioniert. Bei 400 km/h Wind beträgt die Flächenpressung im stärker belasteten Lager nur 1,81 MPa. Die Sicherheit gegenüber der zulässigen Flächenpressung liegt bei **S = 44,2**.



Bild 60: Gleitlagerbuchse Iglidur G, Quelle: www.igus.ch

7.3.6 Distanzwellen

Die Distanzwellen, welche den Lagerkranz mit der Grundplatte verbinden, werden vom ursprünglichen Leitschaufelkranz in ihrer Bauform nahezu unverändert übernommen. Lediglich die Länge wurde aufgrund des veränderten Lagerkranzes um ein paar Millimeter angepasst, damit die Leitschaufeln den exakt gleichen Abstand zur Grundplatte beibehalten wie beim ursprünglichen LSK.

Im Zuge dieser Arbeit wurde jedoch für die Gewichtsersparnis ein Materialwechsel von Edelstahl 1.4404 zu Aluminium EN AW-6082 T6 geprüft.

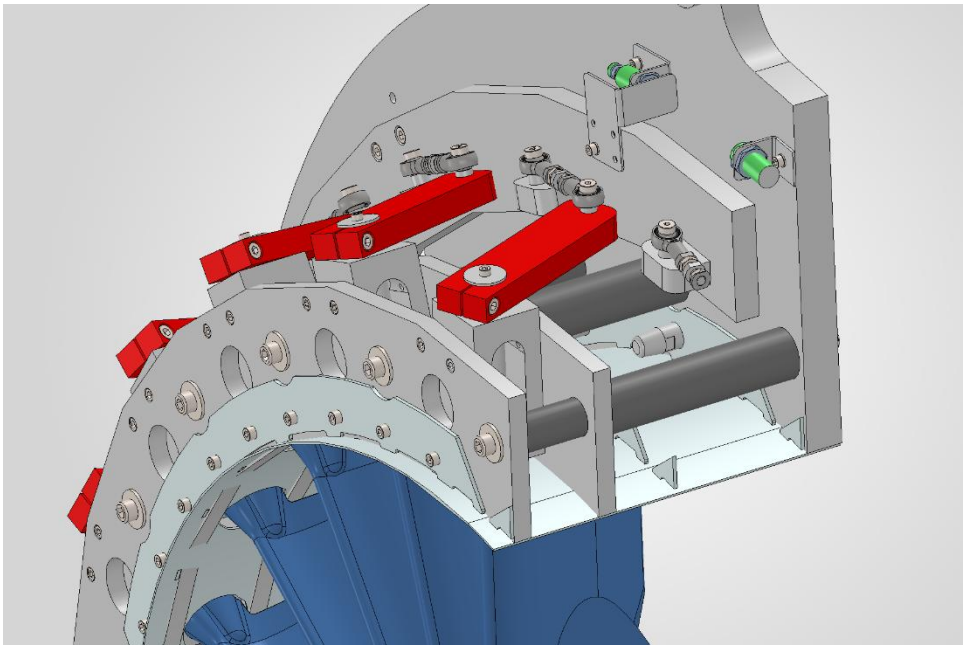


Bild 61: Distanzwellen (dunkelgrau) im CAD-Modell

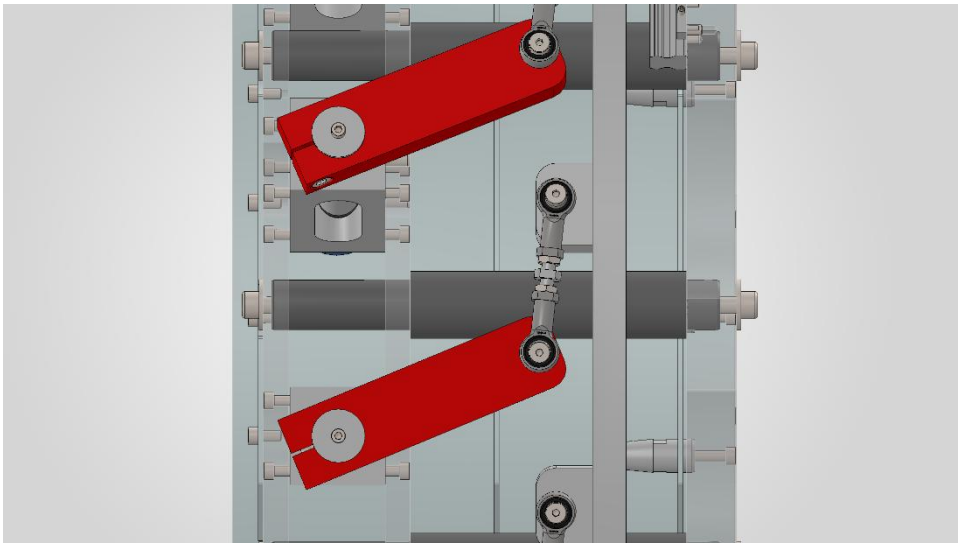


Bild 62: Einspannung der Distanzwellen im LSK

Berechnung Distanzwellen

Berechnet wurden für den Materialwechsel die Festigkeit und die Sicherheit gegen Bruch, sowohl statisch als auch dynamisch.

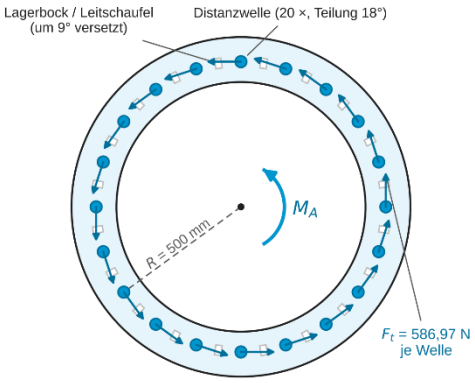
Ausgangswerte

Grösse	Zeichen	Wert	Herkunft
Antriebsmoment in 45°-Stellung	M	5869,68 Nm	Berechnung Antriebskraft
Teilkreisradius der Wellen	R	500 mm	CAD
Anzahl Distanzwellen	n	20	CAD
Freie Länge (Ø40)	L	165 mm	Zeichnung
Zapfendurchmesser / Kernloch M10	d / dK	30 mm / 8,5 mm	Zeichnung
Dehngrenze EN AW-6082 T6	Rp0,2	260 N/mm²	kloeckner.de
Zugfestigkeit EN AW-6082 T6	Rm	295 N/mm²	Kloeckner.de
Wechselfestigkeit (10^7 Zyklen)	σW	106 N/mm²	modulusmetal.com (106–124 N/mm²)
Oberflächen- / Grössenfaktor	b1 / b2	0,89 / 0,89	Diagramm Formeln und Tabellen zur technischen Mechanik (Böge)
Kerbwirkungszahl Absatz Ø40/Ø30 (r = 0,4 mm)	βk	2,2	Roloff/Matek (r/d = 0,013)

Kraft aus Antriebsmoment

Das Antriebsmoment wird gleichmässig auf die 20 Distanzwellen verteilt.

$$F = \frac{\frac{M}{R}}{n} = \frac{\frac{5869{,}68\ \text{Nm}}{0{,}5\ \text{m}}}{20} = 586{,}97\ \text{N}$$

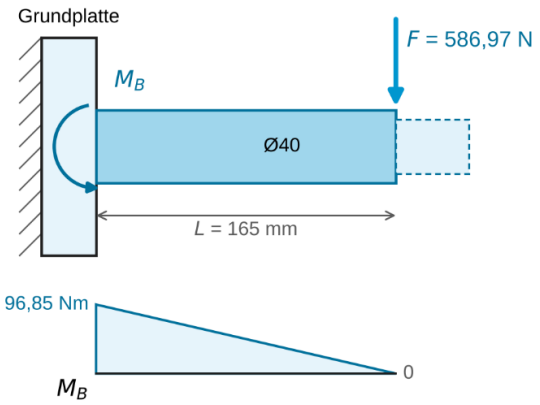


Biegemoment der Distanzwelle

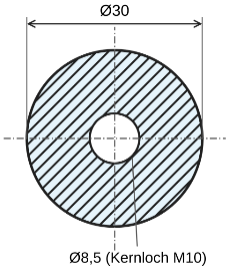
Die Welle wird konservativ als einseitig auf der Grundplatte eingespannter Kragträger gerechnet.

Das Biegemoment ist an der Einspannstelle am grössten.

$$M_B = F \cdot L = 586{,}97\ \text{N} \cdot 0{,}165\ \text{m} = 96{,}85\ \text{Nm}$$



Statische Festigkeit



Gerechnet wird mit dem Querschnitt des 30 mm Zapfens an der Einspannstelle. Mittig der Fläche befindet sich das Kernloch 8,5 mm der M10 Gewindebohrung.

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d^4 - d_K^4}{d} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(30\ \text{mm})^4 - (8{,}5\ \text{mm})^4}{30\ \text{mm}} = 2633{,}64\ \text{mm}^3$$

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W} = \frac{96850{,}1\ \text{Nmm}}{2633{,}64\ \text{mm}^3} = 36{,}77\ \text{N/mm}^2$$

$$S = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_B} = \frac{260\ \text{N/mm}^2}{36{,}77\ \text{N/mm}^2} = 7{,}07$$

Dauerfestigkeit

Spannungen

Der Wind drückt die Schaufeln immer in die gleiche Richtung, die Biegespannung schwankt deshalb zwischen 0 und der maximalen Biegespannung. Es handelt sich also um eine schwellende Belastung.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_B}{2} = \frac{36{,}77\ \text{N/mm}^2}{2} = 18{,}385\ \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_o = \sigma_B = 36{,}77\ \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_u = 0\ \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_B}{2} = \frac{36{,}77\ \text{N/mm}^2}{2} = 18{,}385\ \text{N/mm}^2$$

Smith-Diagramm

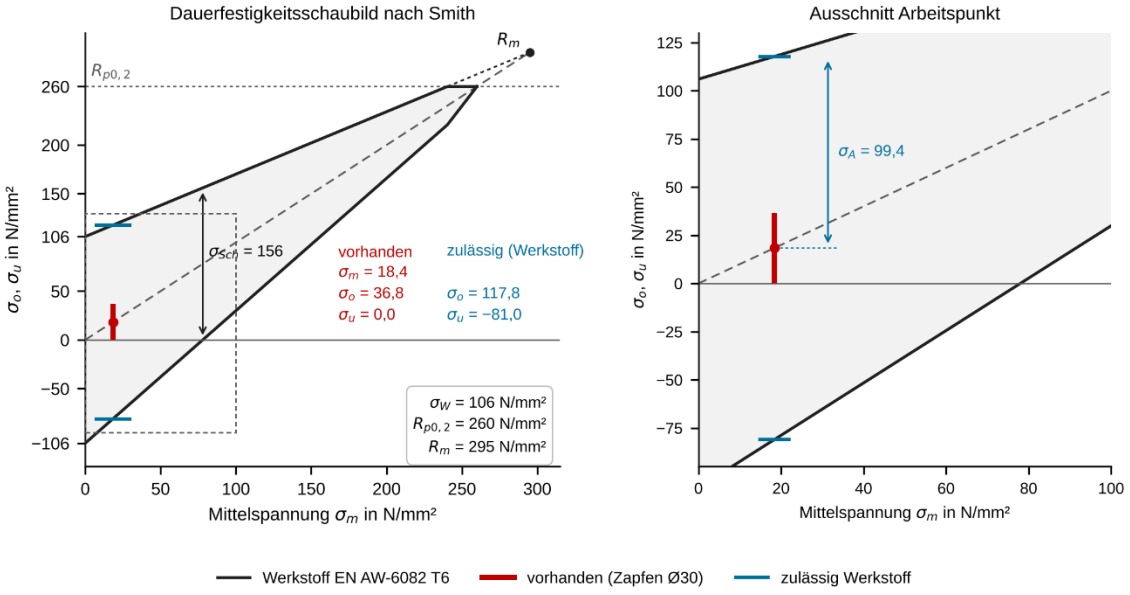


Diagramm 6: Smith-Diagramm Distanzwellen

Rechnerischer Nachweis

$$\sigma_A = \sigma_W \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m}\right) = 106\ \mathrm{N/mm^2} \cdot \left(1 - \frac{18{,}385\ \mathrm{N/mm^2}}{295\ \mathrm{N/mm^2}}\right) = 99{,}4\ \mathrm{N/mm^2}$$

$$S_D = \frac{\sigma_A \cdot b_1 \cdot b_2}{\beta_k \cdot \sigma_a} = \frac{99{,}4\ \mathrm{N/mm^2} \cdot 0{,}89 \cdot 0{,}89}{2{,}2 \cdot 18{,}385\ \mathrm{N/mm^2}} = 1{,}95$$

Ergebnis

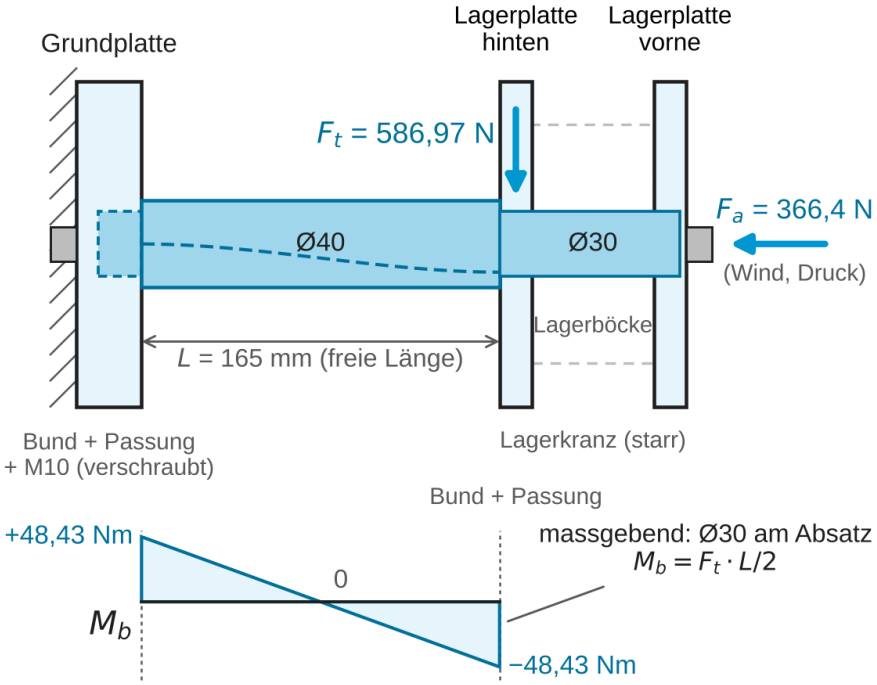
Die Distanzwellen können aus EN AW-6082 T6 gefertigt werden, als einseitig eingespannter Kragträger betrachtet, liegt die statische Sicherheit bei **S = 7,07** und die dynamische Sicherheit bei **S = 1,95**.

Durch den Wechsel des Materials von 1.4404 auf EN-AW 6082 T6 können ganze **27,7 kg** eingespart werden.

Berechnung Distanzwellen mit KI

Die Handrechnung bildet die Distanzwelle als einseitig eingespannten Kragträger ab. Dieser Fall ist so im Tabellenbuch (Böge) enthalten und liegt auf der sicheren Seite.

Korrekt betrachtet ist die Distanzwelle in der Realität ein beidseitig eingespannter Träger mit parallel verschobenem Ende. Der gesamte Lagerkranz verdreht sich durch das Antriebsmoment gegenüber der Grundplatte. Das Wellenende wird deshalb parallel verschoben, ohne sich zu drehen. Durch die beidseitige Einspannung wirkt die Biegelinie antimetrisch und das Biegemoment halbiert sich gegenüber der Handrechnung auf 48,43 Nm.



Dieser Lastfall ist jedoch in den verwendeten Unterlagen nicht enthalten, weshalb er zusätzlich zur vereinfachten Handrechnung oben von der KI Claude (Anthropic, Modell Claude Opus 5.5) ausführlich berechnet und dokumentiert wurde. Das Dokument *Berechnung Distanzwellen KI* ist im Anhang zu finden.

Zusätzlich zur Biegung wurden in dem Dokument auch noch die Schraubenvorspannung, die Windkraft, das Klaffen der Schraubverbindung, die Flächenpressung und die Steifigkeit beachtet.

Dadurch, dass der Träger als beidseitig eingespannt betrachtet wird, steigt die dynamische Sicherheit in dem Fall sogar auf **S = 3,4.**

Berechnungen durch eine KI können Fehler enthalten. Dadurch das die Festigkeit aber auch schon beim ungünstigeren Beispiel als einseitig eingespannter Kragträger oben ausreichend ist, kann die Tragfähigkeit der Distanzwellen aus Aluminium auch unabhängig des KI-berechneten Dokuments bestätigt werden.

7.3.7 Anlenkhebel und Leitschaufeln

Die Leitschaufeln werden gemäss Pflichtenheft in ihrer Geometrie unverändert übernommen. Die Anbindung von Lagerung zum Anlenkhebel wurde jedoch zum bestehenden Modell überarbeitet.

Beim ursprünglichen Modell ist sowohl das Keilwellenprofil der Leitschaufeln, sowie die Anlenkhebel als Gegenstück dazu, aus Kunststoff 3D gedruckt. Da Kunststoff bei Krafteinwirkung mit der Zeit fliesst, würde diese Verbindung im Laufe der Zeit immer mehr Spiel bekommen.

Da ein gefrästes formschlüssiges Keilwellenprofil aus Aluminium zu teuer ist, wird deshalb bei der neuen Lösung der Anlenkhebel mit einer kraftschlüssigen Klemmverbindung auf den Schaft der Leitschaufeln montiert.

Die zusätzliche Verdrehsicherung übernimmt eine Passfeder. Eine weitere axiale Absicherung übernimmt eine grosse Scheibe, die auf die Leitschaufel geschraubt wird und so ein Herausfallen dieser verhindert.

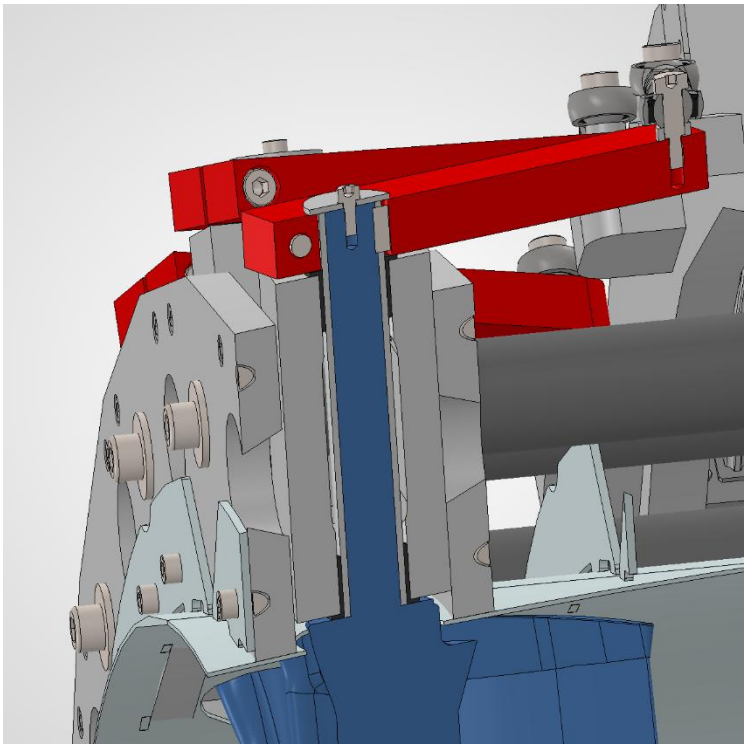


Bild 63: Schnittansicht Lagerung Leitschaufel

Die Leitschaufeln werden weiterhin aus einer Kombination von FDM-3D Druck für das Schaufelprofil und einem darin eingelegten Blech für die nötige Stabilität gefertigt. Um die Klemmwirkung auf dem Schaufel-Schaft zu verbessern und um ein Sinken dieser durch die Kriechwirkung des Kunststoffs zu verhindern, wird auf den gedruckten Schaft eine Aluminiumhülse mit Aussparung für die Passfeder geklebt.

Der Anlenkhebel wird ebenfalls aus Aluminium gefertigt und ist bei der Bohrung geschlitzt, um die benötigte Klemmwirkung auf die Leitschaufel mit der M8 Schraube aufbringen zu können.



Bild 64: Leitschaufel mit Hülse und Passfeder

7.3.8 Koppelstangen

Die Koppelstangen bestehen aus einer Welle und je zwei Igus iglubal Kugelköpfen mit der Typenbezeichnung KBLM-ST-08-G-EK.

Die Welle ist ein Drehteil aus 1.4305, hat in der Mitte eine Schlüsselweite von 13 mm angefräst und an beiden Enden einen M8 Gewindebolzen.

Die Igus Kugelköpfe bestehen aus einem Edelstahl 1.4301 Gehäuse mit einer Gelenkkugel aus Edelstahl 1.4028 und einem Iglidur G Gleitring.

Berechnung Kugelköpfe

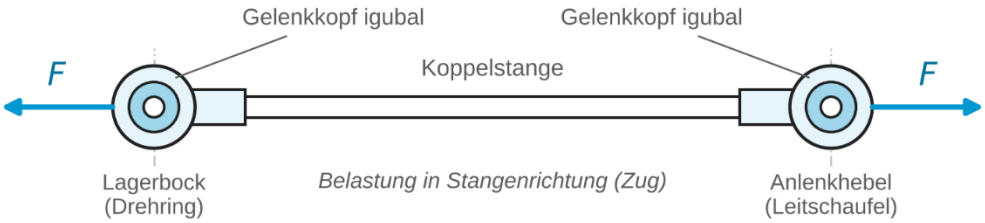
Die Tragfähigkeit der Kugelköpfe wird mit folgender Berechnung belegt:

Ausgangswerte:

Grösse	Zeichen	Wert	Herkunft
Stangenkraft in 45°-Stellung	F	491,49 N	Berechnung Antriebskraft
Max. statische Zugbelastung, langzeitig	F_{zul}	1825 N	Datenblatt igus

Belastung der Kugelköpfe

Die Koppelstangen übertragen die Kraft vom Drehring auf die Anlenkhebel des Leitschaufelkranzes. Beide Kugelköpfe werden dabei mit der gleichen Kraft in Stangenrichtung belastet. Je nach Schaufelstellung ist das eine Zug- oder eine Druckkraft. Kritischer ist bei einem Kugelkopf die Zugkraft, weshalb Igus diese im Datenblatt als Langzeit-Zugbelastung auch angibt.



Sicherheit gegen die zulässige Zugbelastung

$$S = \frac{F_{\text{zul}}}{F} = \frac{1825\ \text{N}}{491{,}49\ \text{N}} = 3{,}71$$

Die Kugelköpfe sind somit mit dem Faktor **S = 3,71** ausreichend gross dimensioniert.

Einstellbarkeit

Durch die Verwendung eines Kugelkopfs mit Rechtsgewinde und eines mit Linksgewinde, kann durch das Drehen der Welle mit dem Gabelschlüssel die Koppelstange in ihrer Länge um + und – 8 mm verstellt werden. Die total 16 mm Verstellweg helfen beim Ausgleichen von allfälligen Winkelfehlern an den Leitschaufeln, die bei der Montage durch Fertigungstoleranzen entstehen.

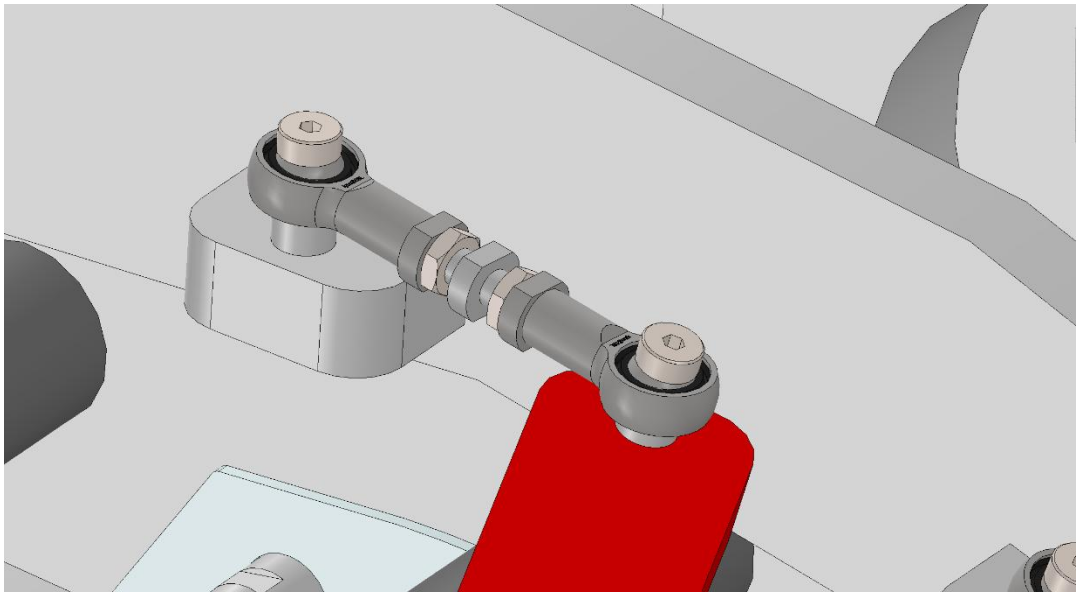


Bild 65: Koppelstange im CAD

7.3.9 Drehring und Konsolen

Der Drehring bildet die Basis des Verstellkonzepts. Er wird mit der Lagerung direkt auf der Grundplatte verschraubt. Am Drehring mit je zwei M6 Schrauben befestigt sind 20 Konsolen, welche die Anbindung für die Koppelstangen darstellen. Sowohl der Drehring als auch die Konsolen bestehen aus Aluminium.

Der Drehring ist wie die anderen drei grossen Platten des LSK als ein Teil konzipiert. Offerten für dessen Fertigung finden sich ebenfalls im Anhang.

Der grosse Aufsatz aussen am Drehring mit den acht M8 Gewindebohrungen dient als Schnittstelle für die Anbindung des Aktuators.

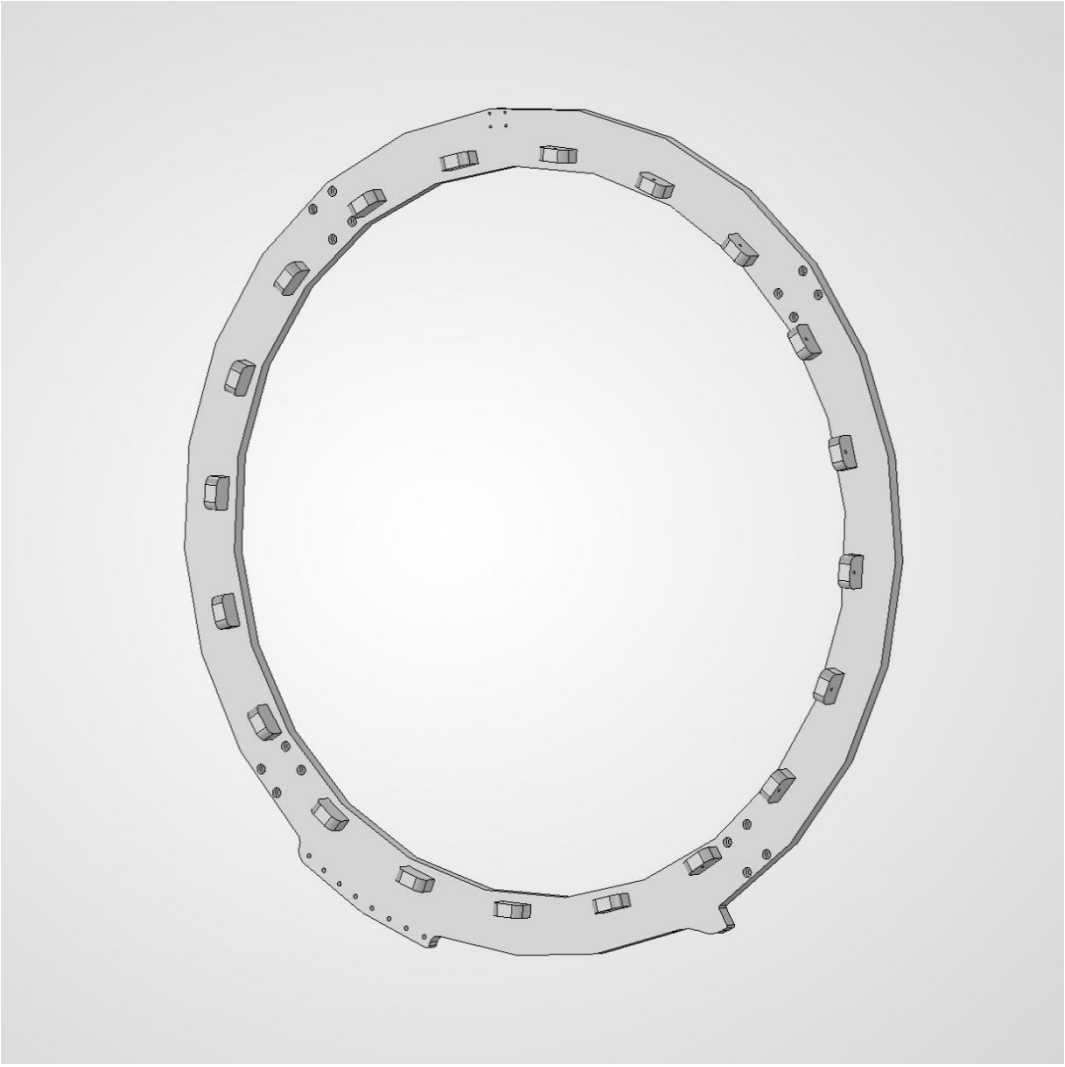


Bild 66: Drehring mit Konsolen

7.3.10 Anbindung Linearaktuator

Die Anbindung des Linearaktuators erfolgt über die beiden Adapter mit der 16 mm Querbohrung. Dazu werden anhand der Montagevorschriften von Thomson je ein Gabelkopf als Gegenstück am Leitschaufelkranz benötigt.

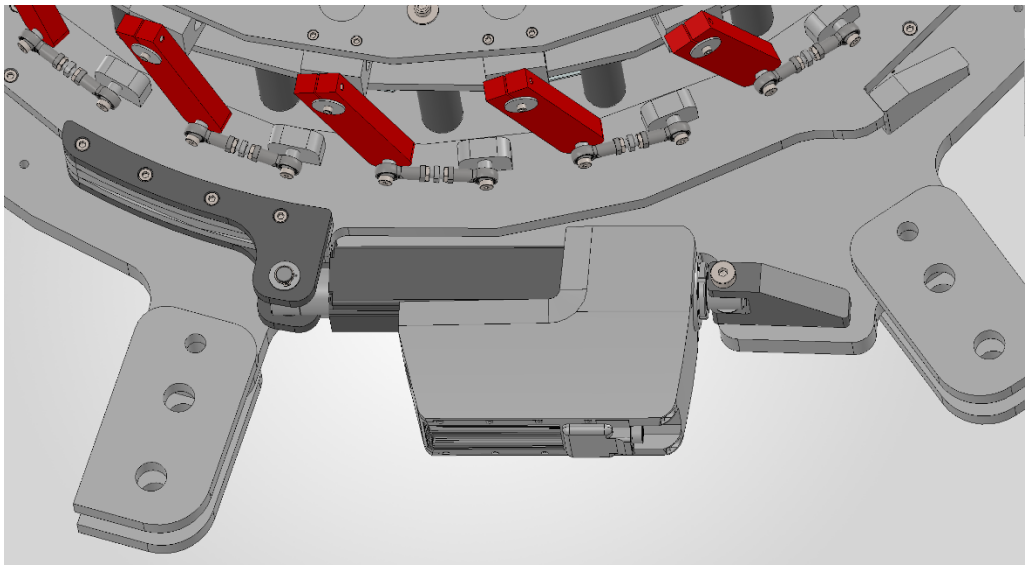


Bild 67: Anbindung Linearaktuator

Auf Seite des Drehrings werden dabei von unten und oben je eine Anbindungsplatte mit je einer Distanzplatte und je vier M8 Schrauben an diesem verschraubt. Die Platten sind alle aus Aluminium. Die Anbindungsplatten sind zusätzlich harteloxiert, um einem Einlaufen der Lagerbohrungen durch den Bolzen entgegenzuwirken.

Der Bolzen ist ein Kaufteil der Firma Misumi, er besteht aus Stahl 1.1213, ist randschichtgehärtet und hartverchromt. Gesichert wird er mit zwei Sicherungsringen, die an den Einstichen des Bolzens montiert werden.

Zwischen den Flächen, an denen der Aktuator oder die Sicherungsringe an den Anbindungsplatten aufliegen ist noch je eine Anlaufscheibe aus Iglidur G der Firma Igus angebracht.

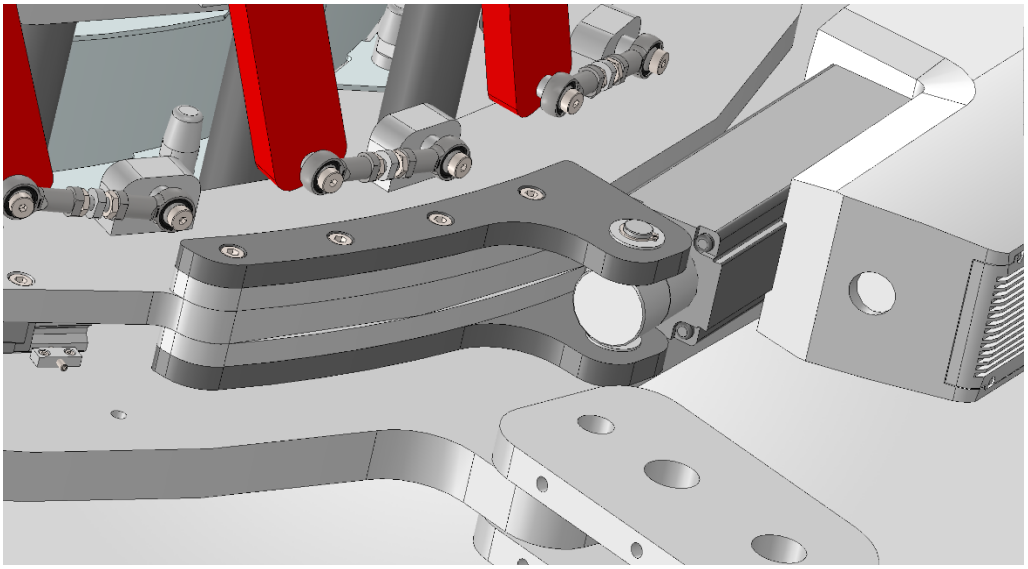


Bild 68: Anbindung Drehring

Die Anbindung auf der Seite der Grundplatte erfolgt mit einem Gabelkopf in Form eines Winkelstücks, gefräst aus Edelstahl 1.4404, welches mit drei M8 Schrauben auf die Grundplatte geschraubt wird. Gesichert wird der Linearaktuator in diesem Gabelkopf mit einer Passschulterschraube mit 16 mm Durchmesser.

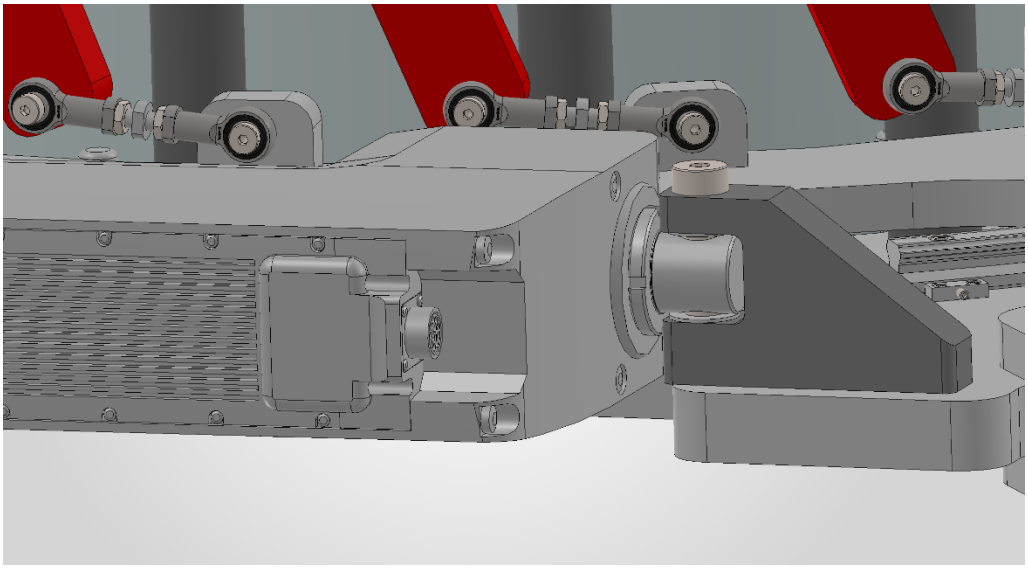


Bild 69: Anbindung Grundplatte

Da die Position des Aktuators ausserhalb der Kontur der Grundplatte liegt, wurde mit Hilfe einer von VentoStream zur Verfügung gestellten STEP-Datei der Störkonturen in diesem Bereich geprüft, ob es Kollisionen mit anderen Teilen der Turbine gibt. Dies war nicht der Fall und es ist ausreichend Platz zu anderen Komponenten vorhanden.

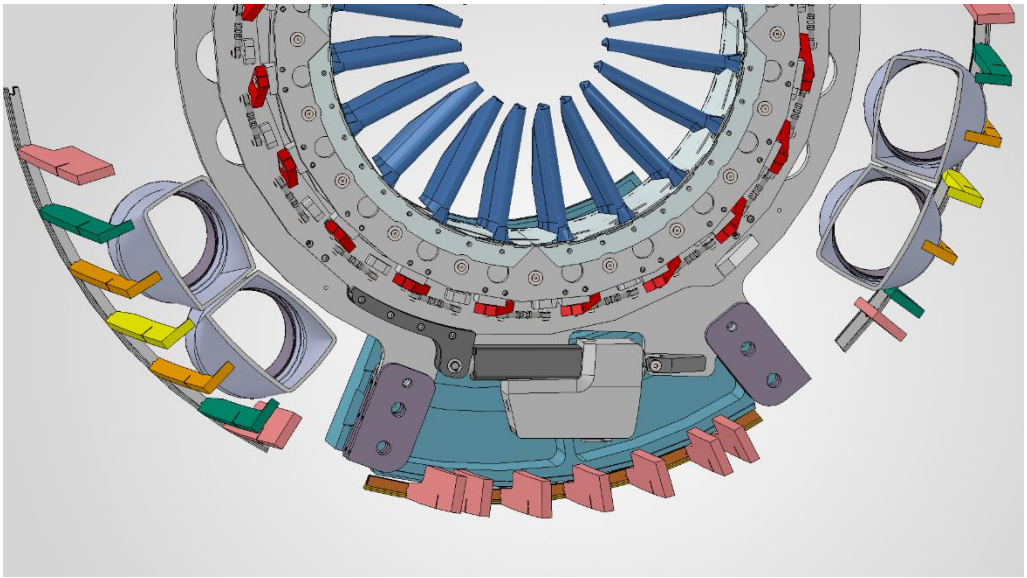


Bild 70: Störkonturen Schnittansicht

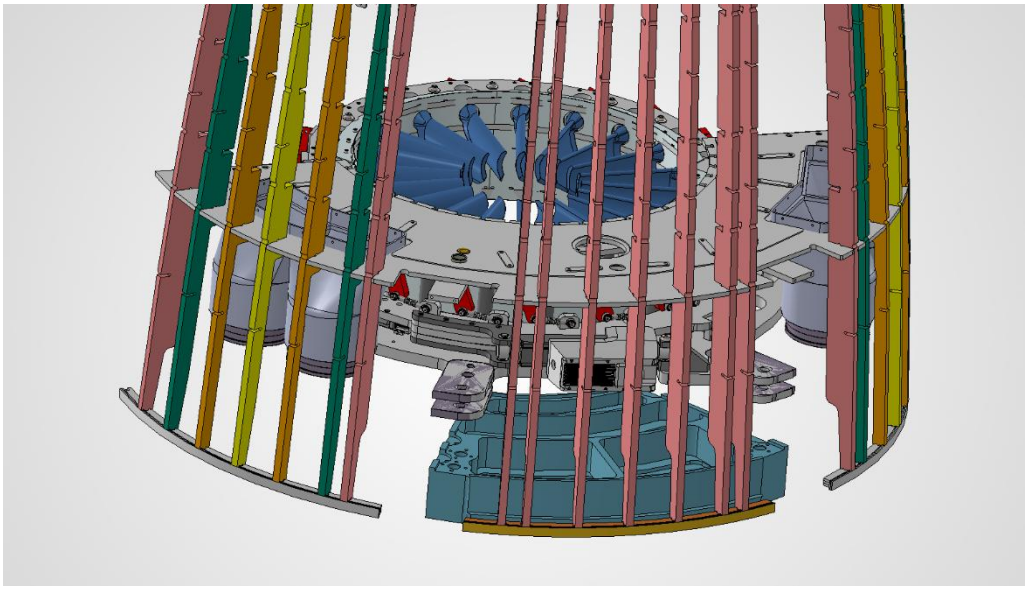


Bild 72: Störkonturen unten

Auch eine Kollision mit LSK internen Komponenten wurde auf dem ganzen Verstellweg der Schaufeln von 0 bis 45 Grad im CAD geprüft. Auch in dem Fall gibt es keine Probleme.

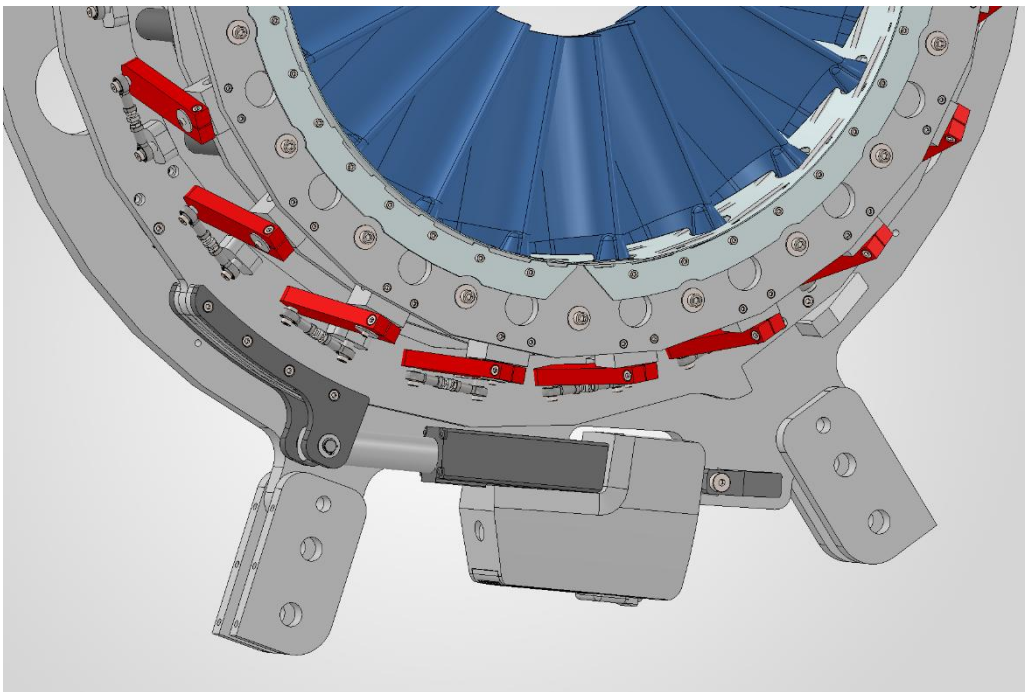


Bild 71: Linearaktuator ausgefahren

Anschlag

Um einen grösseren Schaden an der Baugruppe zu verhindern, wenn die programmierten Endlagen des Electrak XD Aktuators ausfallen sollten, wurde zusätzlich ein physischer Anschlag aus Aluminium konstruiert.

Dieser verhindert, dass die Anbindung am Drehring mit dem Gehäuse des Aktuators kollidiert. Sollte die Endlage in die andere Wirkrichtung ausfallen, könnten keine Schäden entstehen und der Aktuator fährt einfach auf seinen internen Endanschlag. Deshalb wurde in dieser Richtung auf einen zusätzlichen Anschlag verzichtet.

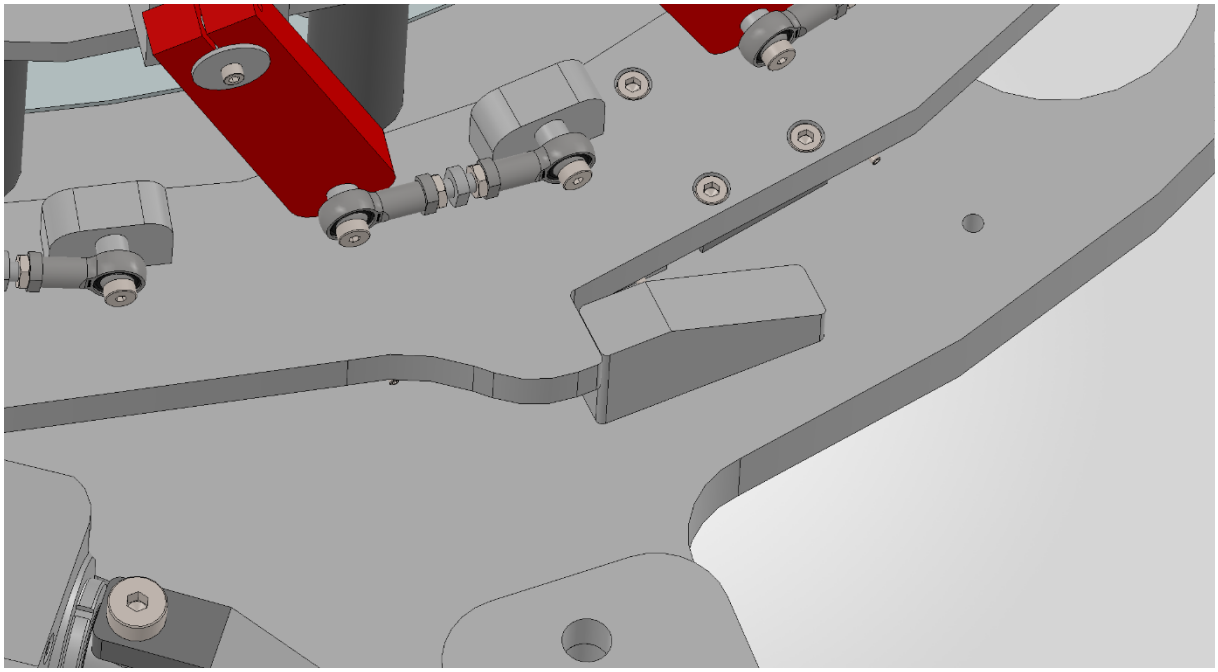


Bild 73: Anschlag auf Grundplatte

7.3.11 Lagerung Drehring

Für die Lagerung des Drehrings gibt es bei diesem Konzept zwei Optionen. Einmal den Einsatz einer Ring-Bogenführung mit V-Nut von HepcoMotion und einmal die Bogenführung mit Kugelumlaufwagen von THK.

Auswahl Variante

Beide Varianten wurden im CAD aufgebaut und miteinander nach verschiedenen Kriterien verglichen.

Kriterium	THK HCR	Hepco HDRT	Quelle
Anzahl Lager / Segmente	4	4	CAD
Gewicht	ca. 8 kg	ca. 51 kg	Hersteller
Anzahl Komponenten	21	5	CAD
Bauhöhe	56 mm	34,5 mm	Hersteller
Montagetauglichkeit	Sehr gut	Gut	Persönliche Einschätzung
Kosten	ca. 4900 CHF	ca. 6000 EUR (= ca. 5500 CHF)	Onlineshop Bachofen / Offerte Hepco

Wie man der Tabelle entnehmen kann, haben beide Varianten ihre Vor- und Nachteile.

Die HDRT-Lösung punktet mit deutlich weniger benötigten Komponenten und einer deutlich geringeren Bauhöhe. Dank des durchgehenden Lagerrings können nämlich die Konsolen für die Koppelstangen direkt auf dem Ring verschraubt werden. Das spart einen zusätzlichen Alu-Drehring und Bauhöhe. Ein Vorteil der Bauhöhe ist auch, dass längere Anlenkhebel verwendet werden können und somit die benötigte Antriebskraft sinkt (Hebelgesetz).

Die Lösung mit den HCR-Bogensegmenten und Wagen sticht jedoch zum HDRT mit einem massiv niedrigeren Gewicht und mit einem rund 600 CHF günstigeren Einkaufspreis hervor.

Wie bereits in der Präferenzmatrix der Variantenwahl in Kapitel *6.8* ermittelt, haben bei diesem Projekt der benötigte Bauraum gefolgt vom Gewicht und den Herstellkosten die grösste Gewichtung. Die benötigte Antriebskraft hat keine Relevanz.

Da der verfügbare Bauraum von beiden Lösungen eingehalten wird, wird aufgrund der Kosten und des Gewichts die Lagerung mit den THK HCR Bogensegmenten gewählt.

Die Montage auf der Grundplatte erfolgt gemäss Herstellerangaben mit Anschlagpunkten und Druckstücken für die Laufschienen.

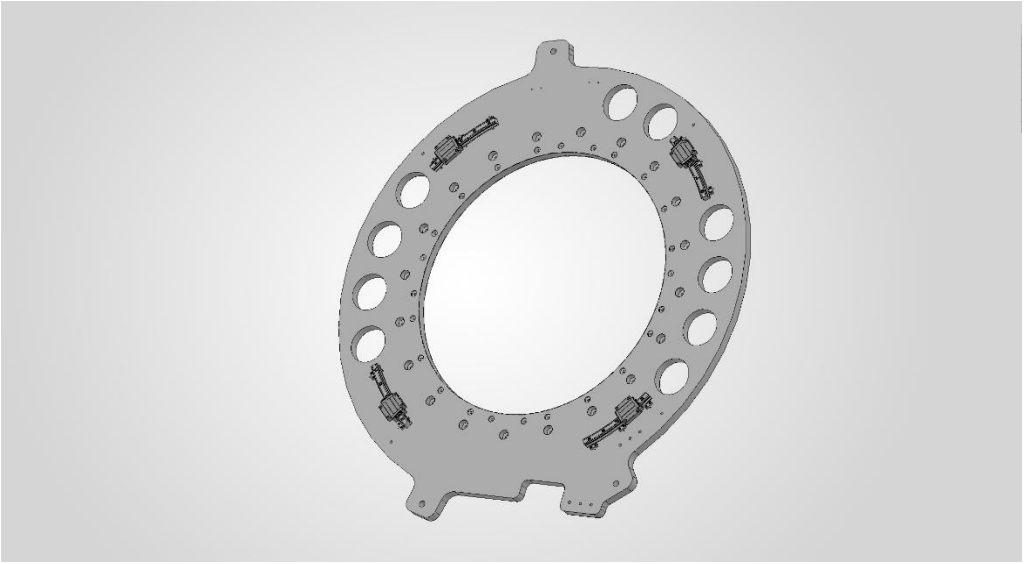


Bild 74: Anordnung Lagerung auf Grundplatte

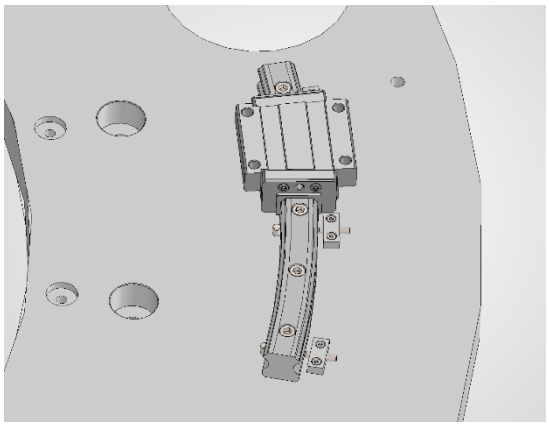


Bild 76: Bogensegment mit Laufwagen

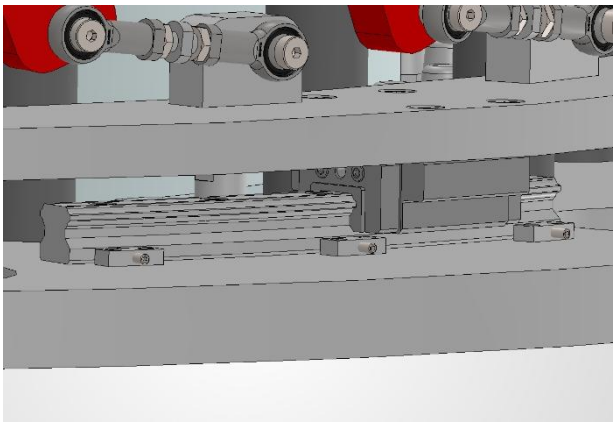


Bild 75: Ansicht verbaute Lagerung CAD

Kräfte in der Lagerung

Für die Wahl der richtigen Lagerspezifikation müssen die Belastungen auf die Lager ermittelt werden. Die Hauptbelastung ist dabei die Aktuatorkraft die am Drehring angreift.

Die 20 Koppelstangen greifen zwar ebenso am Drehring an, ihre Kräfte sind jedoch gleichmässig über den Umfang des Drehrings verteilt. Ihre Vektorsumme ist Null, sie bilden somit ausschliesslich ein Gegenmoment zum Antriebsmoment, aber keine Gegenkraft zur Antriebskraft (Aktuatorkraft).

Das Momentengleichgewicht ist somit mit den summierten Stellmomenten der Leitschaufeln geschlossen. Bei der Aktuatorkraft jedoch müssen die Lager herhalten und die Kräfte aufnehmen, um das Kräftegleichgewicht zu schliessen. Nur ein Kräftepaar, wie z.B. ein zweiter, gegenüberliegender Aktuator könnte die Lager von diesen Querkräften entlasten.

Da ein zweiter Antrieb jedoch den Kernfragen dieser Diplomarbeit widerspricht, wird darauf verzichtet und die Lager dementsprechend ausgelegt.

Im CAD aufgebauten Konzept wurden vier THK HCR25 Führungswagen eingesetzt. Mit nachfolgenden Berechnungen wird die Sicherheit gegen die auftretenden Belastungen geprüft. Berechnungsgrundlage ist die 45 Grad Stellung der Leitschaufeln, denn dort ist die benötigte Antriebskraft des Aktuators am grössten. Es werden nur die Kräfte in der Ebene beachtet, das Eigengewicht des Alu-Drehrings von 18,5 kg wird für die Berechnungen vernachlässigt. Es ist verglichen mit der Aktuatorkraft sehr klein und hat nahezu keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Ausgangswerte

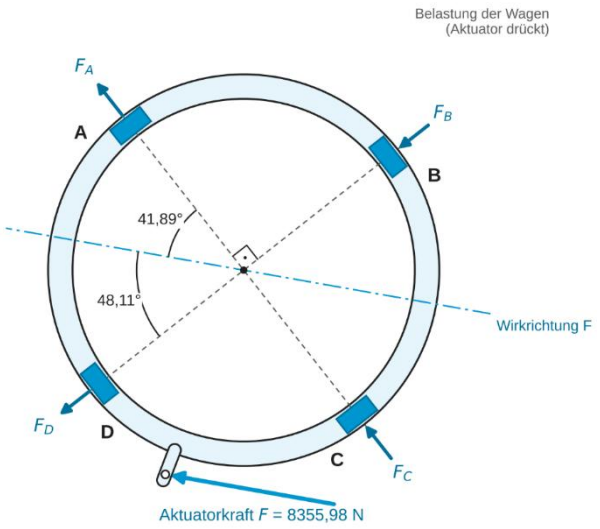
Grösse	Zeichen	Wert	Herkunft
Aktuatorkraft (Schaufelstellung 45°)	F	8355,98 N	Berechnung Antriebskraft
Winkel Wirkrichtung F zu Wagenlinie A–C	φ_{AC}	41,89°	CAD
Winkel Wirkrichtung F zu Wagenlinie B–D	φ_{BD}	48,11°	CAD
Anzahl Wagen / Teilung	n	4 / 90°	CAD
Statische Tragzahl THK HCR25	C_0	34,4 kN	Herstellerangabe THK

Lageranordnung

Die Lager sind gleichmässig um genau 90 Grad versetzt auf dem Umfang angeordnet.

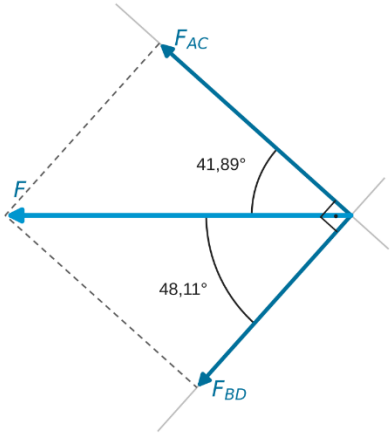
Zwei gegenüberliegende Wagen liegen exakt auf einer Linie durch den Mittelpunkt und die beiden Linien stehen senkrecht aufeinander.

Die beiden Winkel zwischen der Wirklinie der Aktuatorkraft und der Lastrichtung der Wagen stammen aus dem CAD.



Zerlegen der Aktuatorkraft

Die HCR Laufwagen können nur Kräfte quer zur Schiene, also in radialer Richtung aufnehmen. Deshalb wird die Antriebskraft auf die beiden Lagerlinien zerlegt.



$$F_{AC} = F \cdot \cos\varphi_{AC} = 8355{,}98\ \text{N} \cdot \cos 41{,}89° = 6220{,}43\ \text{N}$$
$$F_{BD} = F \cdot \cos\varphi_{BD} = 8355{,}98\ \text{N} \cdot \cos 48{,}11° = 5579{,}31\ \text{N}$$

Lagerkräfte der Wagen

Da die zwei gegenüberliegenden Wagen exakt auf der gleichen Lagerlinie liegen, teilen sie sich die jeweilige Kraftkomponente dieser je zur Hälfte.

$$F_A = F_C = \frac{F_{AC}}{2} = \frac{6220{,}43\ \text{N}}{2} = 3110{,}21\ \text{N}$$
$$F_B = F_D = \frac{F_{BD}}{2} = \frac{5579{,}31\ \text{N}}{2} = 2789{,}65\ \text{N}$$

Statische Sicherheit

Ausschlaggebend für die Berechnung der statischen Sicherheit sind die Wagen A und C, da sie den grösseren Anteil der Last übernehmen. Die statische Sicherheit wird auf die statische Tragzahl C_0 der Wagen bezogen. Der Ring bewegt sich nur etwa vier Mal pro Stunde mit langsamer Geschwindigkeit. Deshalb wird gemäss den Herstellerangaben von THK für langsame Bewegungen mit C_0 gerechnet.

$$S = \frac{C_0}{F_A} = \frac{34400\ \text{N}}{3110{,}21\ \text{N}} = 11{,}06$$

Ergebnis

Wie man dem Ergebnis entnehmen kann, sind die vier Lager mit einer Sicherheit von **S = 11,06** ausreichend dimensioniert und bieten genügend Reserven für Extremfälle und Störungen.

7.3.12 Positionsüberwachung (Sensoren)

Der Thomson XD Linearaktuator besitzt eine interne Positionsüberwachung, die mittels CANopen an die Steuerung weitergegeben wird.

Um mögliche Fehler der internen Positionsüberwachung auszuschliessen, wurde jedoch entschieden die Überwachung mit zwei zusätzlichen Sensoren redundant zu gestalten.

Dafür werden zwei Induktiv-Sensoren des Typs IFRR 18P37T1/S14L-9 der Firma Baumer Electric AG eingesetzt. Die Sensoren sind mit der Schutzart IP 68/69K komplett für den Einsatz im Aussenbereich geeignet.

Auf dem Drehring ist ein Winkelblech angebracht, welches beim Verstellen des Rings mitfährt. An der Grundplatte ist links und rechts davon ein Sensor mit einem Halteblech angebracht. Wenn der Drehring auf die Position 45 Grad oder die Position 0 Grad gestellt wird, schalten die Sensoren und geben das Signal der Steuerung weiter.

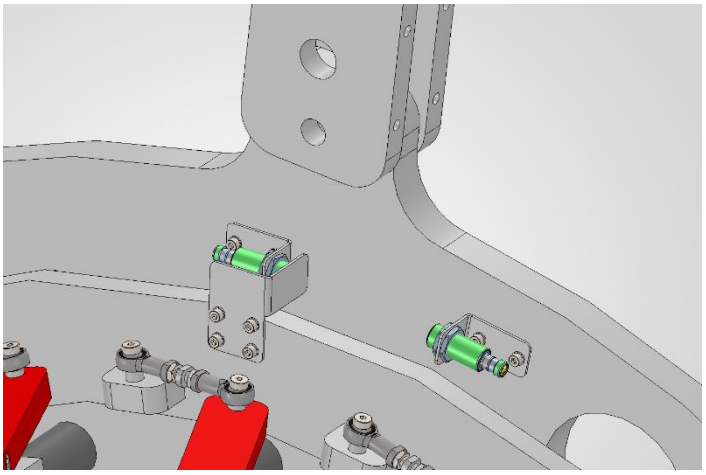


Bild 77: Induktiv-Sensoren Baumer

7.3.13 Abdeckblech

Das Abdeckblech innen wird samt den Anschlusspunkten vom bestehenden Leitschaufelkranz übernommen.

Als Material wurde jedoch Aluminium Blech EN AW-5754 gewählt und nicht wie bisher Edelstahl 1.4404. Dadurch lässt sich nochmal 10,8 kg an Gewicht einsparen.

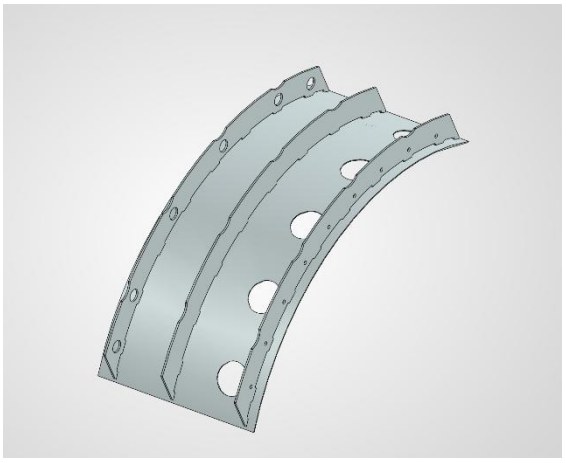


Bild 79: Abdeckblech Aluminium

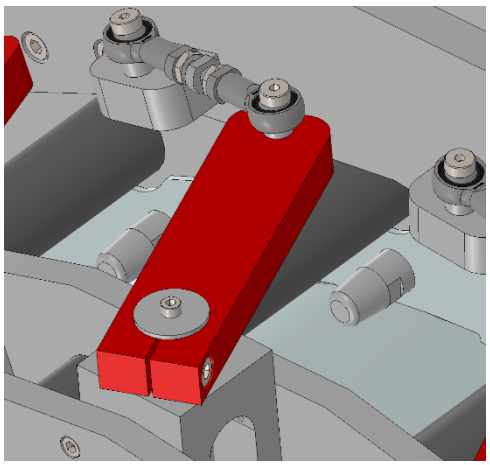


Bild 78: Aufnahme Abdeckblech Grundplatte

7.3.14 Materialwahl

Bei der Materialwahl wurde darauf geachtet, dass die verwendeten Materialien möglichst leicht, möglichst kostengünstig, korrosionsbeständig gegenüber den natürlichen Umwelteinflüssen und möglichst verträglich miteinander (Kontaktkorrosion / unterschiedliche Wärmeausdehnung) sind.

Gewählt wurden für die meisten Komponenten folgende Materialien:

Aluminium, Legierung EN AW-6082 (3.2315):

- Aushärtbare Aluminium Knetlegierung mit mittlerer bis hoher Festigkeit
- Hohe Korrosionsbeständigkeit, sogar salzwasserbeständig
- Sehr gut eloxier- und harteloxierbar
- Sehr gut schweissbar
- Sehr gut zerspanbar

Edelstahl, V4A (1.4404):

- Austenitischer, rostfreier Chrom-Nickel-Molybdän-Stahl mit mittlerer Festigkeit
- Extrem hohe Korrosionsbeständigkeit, auch gegen Salzwasser
- Hervorragende Schweissbarkeit
- Sehr mässige Zerspanbarkeit

Die grossen Hauptkomponenten bestehen alle aus Aluminium, der Edelstahl wird nur bei Schrauben und sonstigen kleineren Komponenten verwendet. Dadurch kann der Faktor der unterschiedlichen Wärmeausdehnung auf ein Minimum reduziert werden. Gerade bei kritischen Stellen wie dem Drehring, der über die Lager mit der Grundplatte verbunden wird, ist das enorm wichtig. Bei stark unterschiedlicher Ausdehnung könnten die Lager sonst bei gewissen Temperaturen klemmen.

Um die Kontaktkorrosion zwischen Aluminium und Edelstahl so gering wie möglich zu halten, sollen alle Bauteile, bei denen es von der Grösse her möglich ist, eloxiert werden. Wo es nicht möglich ist und es zu direktem Kontakt kommt, soll eine Trennschicht wie z.B. eine Dichtmasse oder eine Paste aufgebracht werden. Gerade in salzwasserhaltigen Umgebungen wird das Aluminium sonst an den Kontaktstellen regelrecht weggefressen.

Im Anhang findet sich eine ***Stückliste*** aller Komponenten der Baugruppe und aus welchen Materialien sie bestehen.

7.4 Fertigungstauglichkeit

Alle Komponenten des neuen Leitschaufelkranzes sind darauf ausgelegt, dass sie mit herkömmlichen Fertigungsverfahren hergestellt werden können.

Platten

Die vier grossen Aluminium-Platten werden in einem zweistufigen Bearbeitungsverfahren hergestellt. Zuerst wird die grobe Kontur mittels CNC-Wasserstrahlschneiden aus dem Rohmaterial ausgetrennt. Danach werden die Kontur-Rohlinge auf einer CNC-Fräsmaschine endbearbeitet.

Ein Vorteil dieser Fertigungsmethode ist, dass teure CNC-Frässtunden gespart werden können für die groben Innen- und Aussenkonturen der Teile. An diese sind keine genauen Toleranzanforderungen gestellt.

Die Bauteile sind so konstruiert, dass alle genauen, tolerierten Bearbeitungen in einer Aufspannung in der CNC-Maschine bearbeitet werden können. So wird sichergestellt, dass auch die Form- und Lagetoleranzen eingehalten werden können.

Entsprechende Richtpreisofferten, welche die Machbarkeit sowie die Kosten für diese Fertigungsmethode aufzeigen, finden sich im Anhang.

Leitschaufeln

Die Leitschaufeln werden wie bisher im FDM-3D-Druck Verfahren mit einem eingelegten Blech hergestellt. Neu erhalten die Schaufeln auf dem Schaft aber noch eine harteloxierte Aluminiumhülse, welche aufgeklebt wird. Unten sollen die Hülsen ca. 20 – 25 mm lang geschlitzt werden, um in das eingelegte Blech greifen zu können. Das bestehende Einlegeblech wird dementsprechend angepasst.

So wird die Hauptlast durch das Blech auf die Hülse geleitet und die Konturen der Schaufeln können problemlos weiterhin mittels 3D-Druck hergestellt werden, ohne ein Versagen dieser befürchten zu müssen.

Eine Anpassung der Blechkontur, sowie das Anbringen des Schlitzes in der Hülse ist nicht Bestandteil dieser Diplomarbeit, da entsprechende Daten zum eingelegten Blech nicht vorlagen. Die folgende Skizze veranschaulicht aber wie die Lösung aussehen könnte.

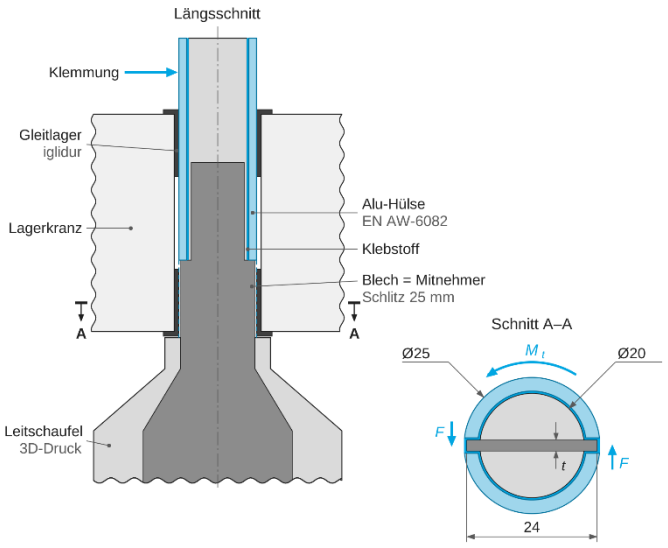


Bild 80: Skizze Fertigung Leitschaufeln, Quelle: KI-generiert

Blechteile

Die wenigen Blechteile des LSK werden von einem Blech-Bearbeitungsbetrieb Lasergeschnitten und gebogen. Beim Abdeckblech werden die Finnen auf das gebogene Grundblech aufgesteckt und miteinander verschweisst. Aluminiumblech EN AW-5754 eignet sich dafür sehr gut.

Restliche Komponenten

Die restlichen Fertigungsteile des Leitschaufelkranzes werden mit herkömmlichen CNC-Fräs- und Drehmethoden hergestellt. Die Teile sind so konstruiert, dass eine einfache Fertigung ohne komplexe Bearbeitungsschritte möglich ist.

Die Aluminiumteile werden alle eloxiert, sofern bei ihrer Baugrösse möglich.

Richtpreisofferten zur Herstellung der Teile finden sich im Anhang.

7.5 Montagetauglichkeit

Der neue Leitschaufelkranz ist einfach zu montieren. Der geschätzte mechanische Montageaufwand beträgt **25 Stunden**. Das entspricht einer Reduktion von ganzen **135 Stunden** oder **84,4%** der geschätzten 160 Stunden Montageaufwand des ursprünglichen LSK.

Montageschritte

Die Montage des LSK erfolgt durch folgende Schritte:

- Montage der Ringschrauben an der Grundplatte, anheben dieser mit dem Hallenkran, festschrauben der Distanzwellen, der Aufnahmebolzen für das Abdeckblech, der Aktuatoraufnahme und des Anschlags von hinten auf der Grundplatte
- Absenken und Positionieren der Grundplatte auf einer stabilen, ebenen Montagefläche
- Montage der Anschlagstifte für die Bogenführungen, Bogenführungen auf Platte positionieren und Schrauben leicht festziehen
- Montage der Druckstücke auf der Grundplatte, Stiftschrauben der Druckstücke festziehen, um Führungen an Anschlagstifte zu drücken, finales Festziehen der Schrauben der Führungen
- Laufwagen auf Führungen aufschieben
- Konsolen und Aktuatoraufnahme auf Drehring schrauben
- Drehring auf Laufwagen platzieren und Schrauben nach und nach über Kreuz anziehen, dabei immer wieder den Verstellweg abfahren, um ein Verklemmen der Führungen zu verhindern
- Igus Gleitlager in Lagerböcke einpressen
- Passstifte in Grundplatte Lagerkranz montieren, Lagerböcke aufsetzen und festschrauben
- Grundplatte Lagerkranz samt Lagerböcken auf Distanzwellen aufschieben
- Deckplatte Lagerkranz auf Lagerböcke und Distanzwellen aufsetzen und an Distanzwellen und Lagerböcken verschrauben
- Abdeckbleche auf Aufnahmebolzen schieben und an Lagerkranz festschrauben
- Vormontierte Leitschaufeln (Kapitel 9.4.2) in Lagerböcke schieben, Passfeder einsetzen, Anlenkhebel aufschieben

- Axialspiel der Schaufeln nach Gefühl einstellen durch Verschieben des Anlenkhebels auf dem Schaufelschaft, M8-Klemmschraube festziehen und Schraube mit Scheibe zur axialen Sicherung in Schaft einschrauben
- Koppelstangen vormontieren, alle mit einer Lehre auf das gleiche Längenmass einstellen und zusammen mit den Distanzhülsen auf Anlenkhebel und Konsolen schrauben
- Die sechs Aufnahmeplatten an der Grundplatte montieren
- Drehring gegen Verschieben sichern (Kugelverlust Laufwagen Führung!), gesamte Baugruppe mit Kran anheben und mittels Aufnahmeplatten an Turbine montieren
- Linearaktuator mit Anlaufscheiben an den beiden Aufnahmepunkten von Grundplatte und Drehring montieren
- Bleche auf Grundplatte und Drehring schrauben, Induktivsensoren in Blechen positionieren, mit Verfahrweg einstellen und festziehen
- Kabel von Linearaktuator und Induktivsensoren anschliessen und in Schaltschrank führen
- Gegebenenfalls Feineinstellung der Koppelstangen zwecks Winkelabweichungen der Leitschaufeln vornehmen

7.6 Komponentenreduktion

Der neue Leitschaufelkranz besteht aus **353 Einzelteilen** (ohne Normteile). Das entspricht einer Reduktion von **397 Teilen** oder **52,9%** gegenüber den 750 Einzelteilen des bestehenden LSK. Zusätzlich sinkt die Anzahl der Komponentenarten, also der Teile mit unterschiedlicher Bauform (gleiche Teile werden nur einmal gezählt), von 50 auf **32**. Das entspricht einer Reduktion von **18 Arten** oder **36 %**.

Alle Werte stammen aus einer Zählung im CAD und sind somit direkt vergleichbar. Die Angabe von 250 Komponenten im Pflichtenheft weicht deutlich davon ab und wird deshalb nicht als Referenz für den Vergleich verwendet.

Anzahl Fertigungsteile

Die Anzahl Fertigungsteile beim neuen LSK beträgt **259**. Das entspricht einer Reduktion von **243 Teilen** oder **48,4%** gegenüber den 502 des ursprünglichen LSK.

Anzahl Kaufteile

Der neue LSK enthält **94** Kaufteile, sprich Standardteile, die auf dem Markt erhältlich sind und unverändert verbaut werden können. Der ursprüngliche LSK enthält 248 Kaufteile. Die Reduktion von alt zu neu beträgt somit **154 Teile** oder **62,1%**.

Anzahl Antriebe

Der neue LSK hat nur noch **einen einzelnen Antrieb**, bestehend aus einem Teil. Der alte LSK hatte vier Antriebe, welche je aus drei Einzelteilen bestanden (Motor, Planetengetriebe, Spindelhubgetriebe). Von ursprünglichen 12 Einzelteilen konnte hier auf ein einziges Teil reduziert werden, in Prozent ist das eine Reduktion von **91,7%**.

7.7 Gewichtsreduktion

Das Gewicht des neuen LSK beträgt gemäss SolidWorks CAD exakt **199,721 kg**. Gegenüber den 320 kg des ursprünglichen Leitschaufelkranzes entspricht das einer Reduktion von **120,28 kg** oder **37,6%**.

Für die Ermittlung des Gewichts im CAD wurden allen Fertigungsteilen das richtige Material zugeordnet und den Kaufteilen das Gewicht aus den Herstellerangaben. Die Normteile stammen alle aus einer Standardbibliothek im CAD und haben genauso alle das passende Gewicht hinterlegt.

Die grössten Gewichtsersparnisse erfolgen durch die Reduktion der Anzahl Komponenten, dem «abspecken» des Lagerkranzes und dem Wechsel des Materials bei den Distanzwellen und den Abdeckblechen.

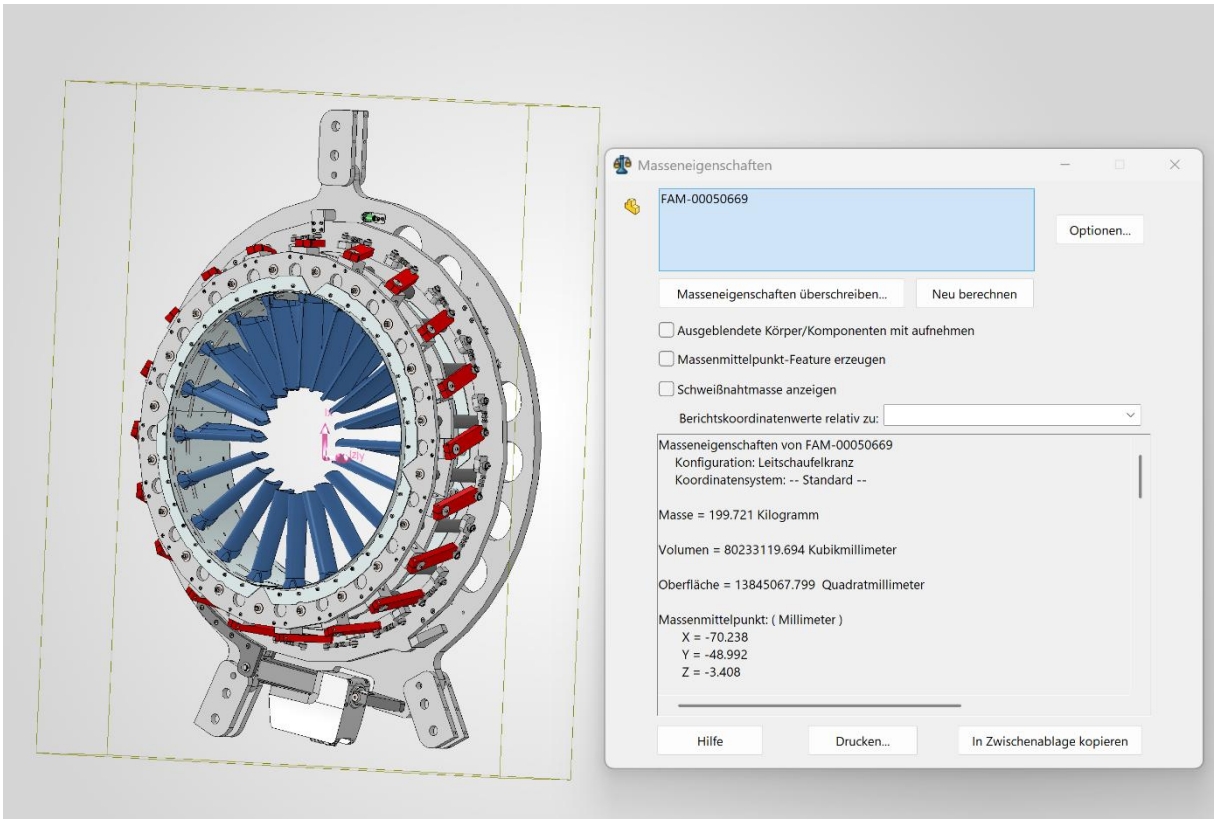


Bild 81: Masseneigenschaften Leitschaufelkranz in SolidWorks

7.8 Kostenreduktion

Die Kosten zur Herstellung und Montage des Leitschaufelkranz-Konzepts betragen anhand der Richtpreisofferten, Preisangaben aus Online-Shops und der Angabe für den VentoStream internen Stundensatz **24'583.90 CHF**. Das entspricht einer Kostenreduktion von **25'416.10 CHF** oder **50,8%** gegenüber den 50'000 CHF des ursprünglichen LSK. Die Herstellkosten für die Leitschaufeln sind unbekannt und nicht Teil dieser Arbeit.

Fertigungsteile	Kosten	Quelle
Wasserstrahlschneiden Grundplatte, Drehring, Grundplatte Lagerkranz, Deckplatte Lagerkranz inkl. Rohmaterial	*3'883.20 CHF*	[redacted]
Endbearbeitung Grundplatte, Drehring, Grundplatte Lagerkranz, Deckplatte Lagerkranz	*1'640.30 CHF*	[redacted]
Rest. CNC Fräs- und Drehteile inkl. Versand	6'782.67 USD = *5'596.25 CHF*	Preis aus Onlinekalkulator PCBWay.com
Blechteile inkl. Versand	518.72 USD = *428.- CHF*	Preis aus Onlinekalkulator PCBWay.com
Total	***11'547.80 CHF***	Summe Einzelpositionen

Kaufteile	Kosten	Quelle
Linearaktuator Electrak XD inkl. Leitungssatz	*3'013.20 CHF*	[redacted]
4x Bogenführungen THK HCR25 komplett inkl. AF-C Beschichtung	*1'733 CHF/ STK* 4x = *6'932.- CHF*	[redacted]
40x Iglubal KBLM-ST-08-G-EK Kugelköpfe	*528.40 CHF*	Preis aus Onlineshop igus.ch
40x Gleitlagerbuchsen Iglidur GFM-2528-21	*61.20 CHF*	Preis aus Onlineshop igus.ch
6x Anlaufscheiben Iglidur GTM-1630-015	*21.55 CHF*	Preis aus Onlineshop igus.ch
Welle 1.1213 16x79 PSFAREU16-79	12.10 EUR = *11.20 CHF*	Preis aus Onlineshop de.misumi-ec.com
2x Baumer IFRR 18P37T1/S14L-9 Induktivsensoren	*71.77 CHF/STK* 2x = *143.55 CHF*	Preis aus Onlineshop baumer.com/ch
Total	***10'711.10 CHF***	Summe Einzelpositionen

Normteile	Kosten	Quelle
Diverse Schrauben, Scheibe, etc. Edelstahl A4	***200.- CHF***	Schätzung Julian Blum

Montage	Kosten	Quelle
Montage mit internem Stundensatz 85.- CHF	25h x 85.- CHF = ***2'125.- CHF***	Angabe Stefan Haberthür, Montagezeit Schätzung Julian Blum

Herstellung LSK	Kosten	Quelle
Total Fertigungsteile	*11'547.80 CHF*	Gesamttotal Fertigungsteile
Total Kaufteile	*10'711.10 CHF*	Gesamttotal Kaufteile
Total Normteile	*200.- CHF*	Gesamttotal Normteile
Total Montage	*2'125.- CHF*	Gesamttotal Montage
Total	***24'583.90 CHF***	Summe Einzelpositionen

7.9 SWOT-Analyse



Stärken (Strengths):

- **Ein Antrieb statt vier:** weniger Teile, weniger Steuerungs- und Verkabelungsaufwand, alle 20 Leitschaufeln werden synchron verstellt
- **Weniger Gewicht:** 120 kg weniger, einfacheres Handling der Baugruppe, kleineres Gesamtgewicht der Turbine, geringere Belastungen auf Lager und Anbindungspunkte
- **Geringere Kosten:** Rund 50% geringere Herstellkosten, gerechnet auf eine Baugruppe, bei Serienfertigung noch grössere Kostenersparnis
- **Einfache Montage:** Montage dauert durch einfachen Aufbau nur 25 Stunden, grosse Kosten- und Zeitersparnis
- **Nachweise erbracht:** Verstellbereich 0° bis 45° im CAD geprüft, Antriebskraft berechnet, Linearaktuator, Gleitlager, Distanzwellen, Kugelköpfe und Lagerung Drehring ausgelegt, zulässige Stellzeit von 90 s eingehalten



Schwächen (Weaknesses):

- **Nur virtuell geprüft:** Funktion nur im CAD-Modell und rechnerisch nachgewiesen, kein physischer Prototyp, keine Feldtests
- **Lieferwege nicht beachtet:** Lieferwege der grossen Teile nicht beachtet, können zusätzlich auf Kosten schlagen
- **Lieferzeiten nicht beachtet:** Die Lieferzeiten einzelner Komponenten wurden nicht beachtet, kann bei Umsetzung gesamtes Projekt stark verzögern



Chancen (Opportunities):

- **Überwachung über CANopen:** Aktuator kann Position und Zustand an die Turbinensteuerung melden, Störungen früh erkennbar, Fernwartung möglich
- **Nachrüstung bestehender Prototyp:** Neuer LSK kann direkt an bestehenden Prototyp gebaut und getestet werden



Gefahren (Threats):

- **Lieferantenabhängigkeit:** Aktuator und Führung sind Kaufteile, keine Alternative und Risiko von langen Lieferzeiten und Preiserhöhungen
- **Fehler erst im Betrieb:** Ohne physische Erprobung zeigen sich Schwachstellen erst im Betrieb
- **Höhere Kosten:** Kostenreduktion basiert auf Richtpreisen, Preise in Realität möglicherweise höher
- **Spiel im Aktuator:** Wenn Belastung nicht immer in gleiche Richtung ist (Wind drückt von hinten auf Schaufeln), beeinflusst Aktuatorspiel die Positioniergenauigkeit
- **Anbindung Steuerung:** CANopen kann nicht direkt an bestehende Steuerung angebunden werden, zusätzliche Steuerkomponenten nötig oder andere Steuerungsvariante Aktuator
- **Massunterschiede Anbindungspunkte:** Masse für Anbindungspunkte stammen aus STEP-Datei, nicht aus technischen Zeichnungen, Abweichungen möglich, Baugruppe kann nicht an Turbine montiert werden

Strategien

S/O Strategie	**Nachrüstung mit wenig Aufwand:** Dank einfacher Montage und gleichen Anbindungspunkten kann der neue LSK direkt am bestehenden Turbinen-Prototyp aufgebaut und getestet werden. **CANopen nutzen:** Der Linearaktuator zeigt durch seine Positionsrückmeldung die Stellung aller 20 Leitschaufeln, nach Klärung der Steuerungsanbindung können diese Daten für Überwachung und Fernwartung genutzt werden.
S/W Strategie	**Neuen LSK aufbauen:** CAD-Konzept und Auslegungen dienen direkt als Grundlage für den Aufbau, die einfache Montage hält den Aufwand klein.
S/T Strategie	**Kosten absichern:** Ersparnis nach Eingang verbindlicher Offerten neu rechnen, die aktuell 50% Ersparnis geben noch etwas Spielraum für höhere Preise. **Ersatzteilhaltung:** Pro LSK ist nur ein Aktuator nötig, ein Ersatzaktuator an Lager überbrückt Lieferengpässe. **Steuerung festlegen:** Da nur ein Aktuator verbaut wird, vor der Umsetzung entscheiden, ob zusätzliche Steuerkomponenten für CANopen eingebaut werden oder eine andere Steuerungsvariante des Aktuators gewählt wird. **Anbindungsmasse prüfen:** Masse der Anbindungspunkte vor der Fertigung mit technischen Zeichnungen des bestehenden LSK abgleichen.
W/O Strategie	**Prototyp als Prüfstand:** Am bestehenden Prototyp Funktion, Aktuatorspiel und Anbindung prüfen. **Testdaten nutzen:** Im Test die Position und Zustand des Aktuators über CANopen aufzeichnen und mit Stellzeit und Verstellbereich aus der Auslegung vergleichen.
W/T Strategie	**Lieferkette sichern:** Vor der Umsetzung verbindliche Preise und Lieferzeiten der Kaufteile verhandeln, Logistik der grossen Teile klären. **Erprobung vor Feldeinsatz:** Funktions- und Dauertest mit Verstellzyklen durchführen, Freigabe für den Feldeinsatz erst nach bestandenem Test.

Fazit für Auftraggeber

Das Konzept ist im CAD geprüft, rechnerisch nachgewiesen und spart Gewicht, Herstellkosten und Montagezeit. Vor einer Umsetzung sind vor allem zu beachten: Anbindungsmasse mit Zeichnungen abgleichen, Belastungsrichtung Wind klären zwecks Aktuatorspiel, die Anbindung an die Steuerung klären, verbindliche Preise und Lieferzeiten der Teile verhandeln sowie die Lieferwege der grossen Teile festlegen.

7.10 Risiko-Analyse Umsetzungsvariante

Auf Basis der ermittelten Schwächen und Gefahren bei der SWOT-Analyse wird eine Risiko-Analyse für das neue Leitschaufelkranz-Konzept erstellt.

Das Vorgehen folgt dabei dem gleichen Schema wie bei der Erstellung der Risikoanalyse für die Diplomarbeit an sich bei Kapitel *5.7.*

Risikotabelle Umsetzungsvariante						
Nr.	Risiko beschreiben	Eintretenswahr-scheinlichkeit 1-4 (tief-hoch)	schlimmstmögliche Auswirkung	Schadensmass 1-4 (tief-hoch)	Massnahmen	Eintretenswahr-scheinlichkeit nach Massnahmen 1-4 (tief-hoch)
1	Lange Lieferzeiten bei Komponenten	gross (2)	Umsetzung neuer LSK verzögert sich, erste in Serie gefertigte Turbinen müssen mit altem LSK gebaut werden, teure Nachrüstung	gross (3)	Lieferzeiten vor der Umsetzung verbindlich verhandeln, rechtzeitig reagieren, Lieferfristen einplanen	gross (2)
2	Lieferwege der grossen Teile nicht berücksichtigt, Mehrkosten	ziemlich sicher (4)	Höhere Kosten, Kostenersparnis zu altem LSK sinkt	wesentlich (2)	Transport und Lieferwege der grossen Teile vor der Umsetzung klären und in Gesamtkosten einrechnen	gross (2)
3	Reale Preise liegen über den Richtpreisen, auf denen die Kostenreduktion basiert	gross (2)	Einsparung von rund 50% fällt kleiner aus	wesentlich (2)	Bessere Preise aushandeln vor Umsetzung, Spezialkonditionen für Serienfertigung	unwahrscheinlich (1)
4	Schwachstellen zeigen sich erst im Betrieb, da die Variante nur im CAD und rechnerisch geprüft ist	sehr gross (3)	Ausfall der Schaufelverstellung, Stillstand der Turbine, Nacharbeit beim Endkunden	gross (3)	Neuen LSK am bestehenden Prototyp aufbauen und testen, Funktions- und Dauertest, Freigabe für den Feldeinsatz erst nach bestandenem Test	unwahrscheinlich (1)
5	Spiel im Aktuator wenn Wind von hinten auf Schaufelblätter drückt	unwahrscheinlich (1)	Positioniergenauigkeit der Leitschaufeln sinkt, Schaufelstellung weicht vom Sollwert ab	wesentlich (2)	Klären ob Last (Wind) immer in gleicher Richtung auf Schaufeln drückt, wenn nicht: Aktuator anders anbinden um Spiel von max. 1,6 mm zu minimieren	unwahrscheinlich (1)
6	CANopen lässt sich nicht direkt an die bestehende Steuerung anbinden	sehr gross (3)	Zusätzliche Steuerkomponenten nötig, Mehrkosten durch Anpassung Steuerung und zusätzliche Teile	wesentlich (2)	Vor der Umsetzung entscheiden, ob zusätzliche Steuerkomponenten eingebaut werden oder eine andere Steuerungsvariante des Aktuators gewählt wird	unwahrscheinlich (1)
7	Masse der Anbindungspunkte stammen aus einer STEP-Datei, nicht aus technischen Zeichnungen	gross (2)	Baugruppe passt nicht an die Turbine, Nacharbeit oder Neufertigung von Teilen	sehr gross (4)	Masse vor der Fertigung an der Turbine nachmessen, mit technischen Zeichnungen abgleichen	unwahrscheinlich (1)
8	Ausfall des einzigen Aktuators im Betrieb	gross (2)	Gesamte Schaufelverstellung steht still, Turbine kann nicht mehr geregelt werden, muss abgeschaltet werden	gross (3)	Ersatzaktuator an Lager halten, Zustand des Aktuators über CANopen überwachen	unwahrscheinlich (1)
9	Verschmutzung und Feuchtigkeit aus der Aussenluft an den Lagern	gross (2)	Erhöhter Verschleiss, Verstellung wird schwergängig	sehr gross (4)	Komponenten von durchströmender Luft abkapseln, regelmässige jährliche Wartung	unwahrscheinlich (1)

Nach dem Eintragen der ermittelten Risiken mit ihrem jeweiligen Schadensmass und der Eintretenswahrscheinlichkeit in die 16er Matrix sieht man gut, dass vor allem die Risiken 2, 4, 7 und 9 besondere Aufmerksamkeit beim Definieren von entsprechenden Massnahmen zur Senkung der Eintretenswahrscheinlichkeit benötigen.

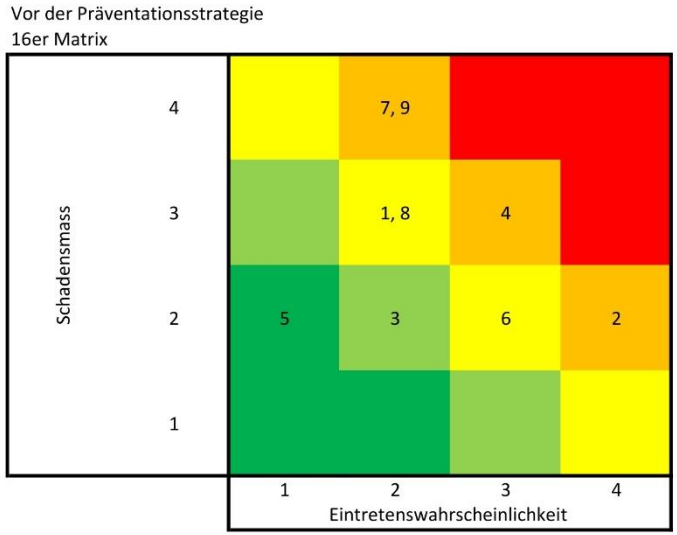


Bild 82: 16er Matrix Umsetzung vor Prävention

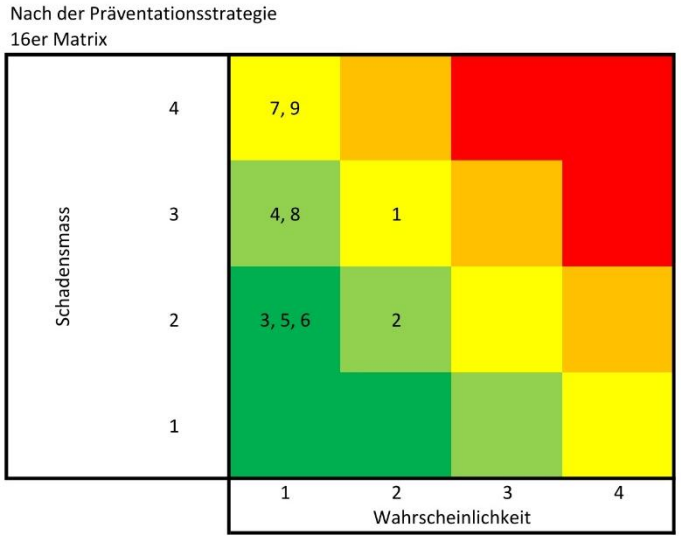


Bild 83: 16er Matrix Umsetzung nach Prävention

In der zweiten Matrix werden die Risiken nochmal neu eingetragen nach Anwendung der Präventionsstrategie in Form der definierten Massnahmen.

Es lässt sich gut erkennen, dass keines der Risiken den Erfolg des Konzepts mehr unmittelbar bedroht. Einzig die Risiken 1, 7 und 9 befinden sich noch in der gelben Zone. Während der Umsetzung sollten diese gut beobachtet und allenfalls frühzeitig weitere, zusätzliche Massnahmen ergriffen werden.

7.11 Phasenplan Umsetzung Konzept in Realität

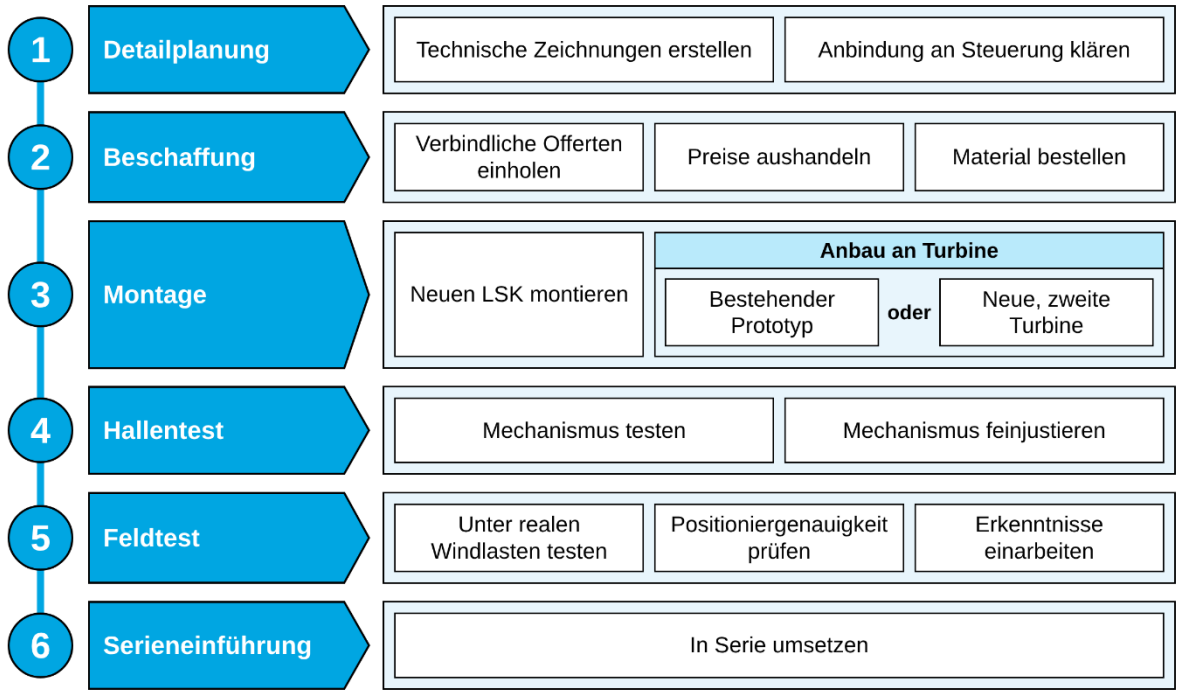


Diagramm 7: Phasenplan Umsetzung des Konzepts in die Realität

Eine Umsetzung des Lösungskonzepts erfolgt in sechs Schritten.

Zuerst müssen ausgehend vom 3D-CAD-Modell die technischen Zeichnungen für die Fertigung und die Montage erstellt werden. Parallel dazu soll die Anbindung an die Steuerung geklärt werden, ob die CANopen Steuerung des Linearaktuators in die Steuerung der Turbine direkt eingebunden werden kann oder ob noch zusätzliche Steuerungskomponenten verbaut werden müssen. Allenfalls auch ob eine komplett andere Steuerungsoption beim Aktuator benötigt wird.

Danach müssen verbindliche Offerten eingeholt und Preise ausgehandelt werden für die Fertigungsteile und die Kaufteile. Wenn das erledigt ist, kann das Material bestellt werden.

Sobald das Material eingetroffen ist, kann der neue LSK zusammengebaut und entweder am bestehenden Turbinen-Prototyp oder an einer neuen, zweiten Turbine angebaut werden.

Der nächste Schritt ist der Test und die Feinjustierung des Mechanismus in der Halle. Sobald alles funktioniert, kann die Turbine aufs Feld, wo der LSK unter Realbedingungen getestet wird. Dabei sollen wertvolle Erkenntnisse gewonnen und nach Möglichkeit direkt an der realen Baugruppe umgesetzt werden.

Wenn alles funktioniert, kann danach der neue Leitschaufelkranz in der Serienfertigung der Turbinen eingesetzt werden.

7.12 Kosten-Nutzen-Analyse

Mit der Kosten-Nutzen-Analyse wird das Lösungskonzept hinsichtlich seiner Kosten und dem zu erwartenden Nutzen für den Auftraggeber analysiert.

Kosten

Die Herstellung eines Leitschaufelkranzes kostet mit total 24'583.90 CHF genau 50,8% weniger als der ursprüngliche Leitschaufelkranz mit 50'000 CHF Herstellungskosten.

Bei einer Serienfertigung fallen die Kosten noch geringer aus, bei den Richtpreisofferten der Platten und der Führungen sind entsprechende günstigere Preise für eine Losgrösse von 20 Leitschaufelkränzen bereits vermerkt. Total ergibt sich aus den Angeboten bei diesen drei Positionen eine Ersparnis von 3'113.50 CHF. Falls man bei den restlichen Komponenten auch noch einen entsprechenden Rabatt erhält, liegt der geschätzte Herstellungspreis für einen Leitschaufelkranz in der Serienfertigung bei unter 20'000.- CHF.

Was allerdings bei einer Umsetzung des Konzepts zu den Herstellkosten noch dazu kommt, sind einmalige Kosten für das Ausarbeiten der technischen Zeichnungen, die Klärung der Anbindung an die Steuerung, das Aushandeln der Komponentenpreise, sowie für den Hallen- und Feldtest. Diese Kosten belaufen sich mit dem internen Stundensatz der VentoStream auf geschätzte 13'600.- CHF.

Arbeitsschritt	Geschätzte Stunden	Kosten
Ausarbeitung technische Zeichnungen	*40 h*	*40x 85.- CHF = 3'400.- CHF*
Anbindung Steuerung	*20 h*	*20x 85.- CHF = 1'700.- CHF*
Aushandeln Komponentenpreise	*40 h*	*40x 85.- CHF = 3'400.- CHF*
Hallentest	*20 h*	*20x 85.- CHF = 1'700.- CHF*
Feldtest	*40 h*	*40x 85.- CHF = 3'400.- CHF*
Total	***160 h***	***13'600.- CHF***

Trotz dieser Initialkosten ist die Herstellung des ersten Leitschaufelkranzes mit Total 38'183.90 CHF immer noch 11'816.10 CHF günstiger als die Herstellung eines aktuell verbauten LSK. Ab dem zweiten Leitschaufelkranz fallen die Initialkosten weg und die Ersparnis beträgt 25'416.10 CHF. Bei einer Serienfertigung von 20 Stück beläuft sich die Ersparnis pro LSK gar auf geschätzte 30'000 CHF. Hochgerechnet auf ein Jahr mit 20 hergestellten Turbinen spart die Firma so gut **600'000.- CHF**.

Nutzen

Eine Umsetzung des Konzepts bringt nebst der Kostenersparnis noch andere grosse Nutzen mit sich.

Durch die deutlich reduzierte geschätzte Montagezeit von 25 Stunden können wertvolle Mitarbeiter-Ressourcen gespart werden. Der Leitschaufelkranz ist schneller montiert und die Mitarbeiter können sich den nächsten Aufgaben widmen. Dadurch erhöht sich die Anzahl an möglichen herstellbaren Turbinen pro Jahr. Gerechnet mit 20 Turbinen werden so pro Jahr ausgehend von den ursprünglichen 160 h / LSK ganze 2'700 Stunden frei. Das entspricht 64 Arbeitswochen à 42 Stunden, also mehr als ein Jahr.

Der Leitschaufelkranz besteht aus deutlich weniger Komponenten, dadurch wird weniger Platz für die Zwischenlagerung der Komponenten vor der Montage benötigt.

Durch den im Konzept verwendeten Aktuator mit CANopen Steuerung kann eine Überwachung und Diagnose bei allfälligen Störungen aus der Ferne erfolgen. Dadurch kann in einzelnen Fällen der Einsatz eines Technikers zur Behebung der Störung vermieden oder sicherlich das Problem vor seinem Einsatz eingegrenzt werden.

Das geringere Gewicht wirkt sich auf das Handling der Baugruppe während der Montage und natürlich auf das Gesamtgewicht der ganzen Turbine aus. Durch ein geringeres Gesamtgewicht ist ein einfacherer und günstigerer Transport, sowie eine einfachere Montage oder Aufstellen der Turbine am Einsatzort möglich.

7.13 Expertenbericht

Stefan hat die Ergebnisse der Analysen der Fertigungstauglichkeit, der Montagetauglichkeit, sowie die Gewichts- und Kostenreduktion geprüft und mit einer kurzen Antwortmail am 04.11.2026 bestätigt. Er beurteilt die Einschätzungen aus heutiger Sicht als realistisch und nachvollziehbar und ist mit den Analysen und Schlussfolgerungen einverstanden.

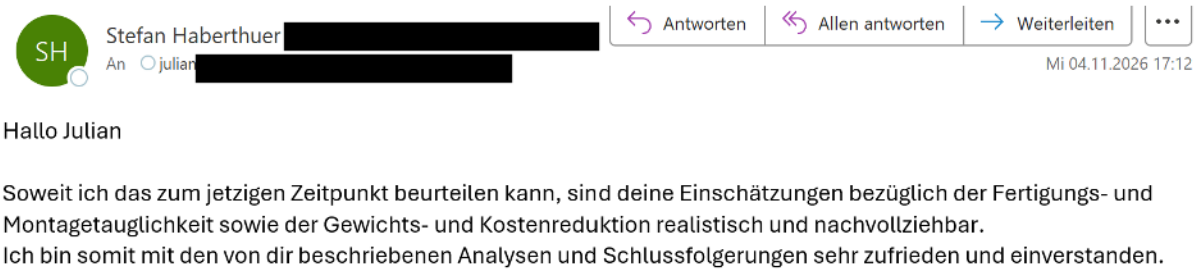


Bild 84: Screenshot E-Mail vom 04.11.2026

8 Projektabschluss

8.1 Projektüberwachung

Im Laufe des Projekts konnten alle Termine eingehalten werden. Die zeitliche Überwachung erfolgte dabei mittels Projektablaufplan, sowie einem eigens für die Diplomarbeit gebauten, digitalen Dashboard.

Einzelne zeitliche Engpässe zeichneten sich zwischenzeitlich nur bei der Beschaffung der Richtpreisofferten ab. Einige Unternehmen lieferten keine Offerte aus für sie wirtschaftlichen Gründen und einige Offerten bedurften längerer Abklärungen. Gerade die Offerte für die THK-Führungen mit dem Spezialradius liessen auf sich warten.

Vermeiden konnte man das bei solch einer Diplomarbeit innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit fast nicht. Bevor die finale Auslegung und Konstruktion nicht fertig waren, konnten noch keine aussagekräftigen Offerten angefragt werden. In Zukunft nehme ich aber für mich mit, dass Teile, bei denen sich längere Wartezeiten abzeichnen könnten (z.B. Spezialanfertigungen), priorisiert bearbeitet und anfragefertig gemacht werden sollten.

Zeiteinsparungen konnten bei dieser Arbeit vor allem durch den gezielten Einsatz von künstlicher Intelligenz gemacht werden. Fleissarbeiten wie das Digitalisieren von Handrechnungen für dieses Dokument, sprich das Abschreiben der Formeln in Microsoft Word oder das Erstellen von Skizzen, wurden von der KI Claude innert weniger Minuten erledigt. Händisch hätte dieser Prozess für alle Rechnungen mehrere Stunden in Anspruch genommen.

Der vollständige *Projektablaufplan IST-Werte* ist im Anhang zu finden.

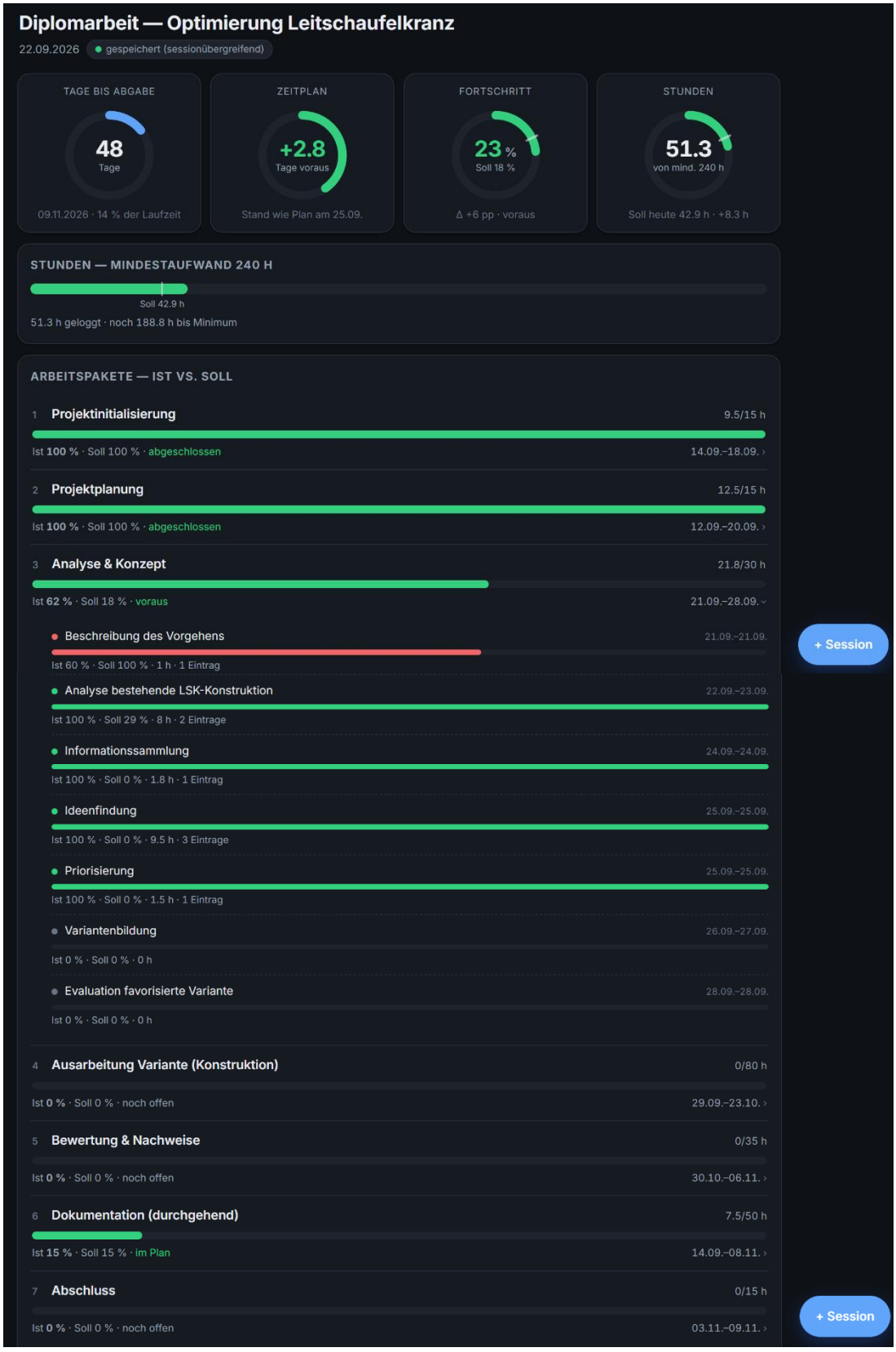
Dashboard Projektüberwachung

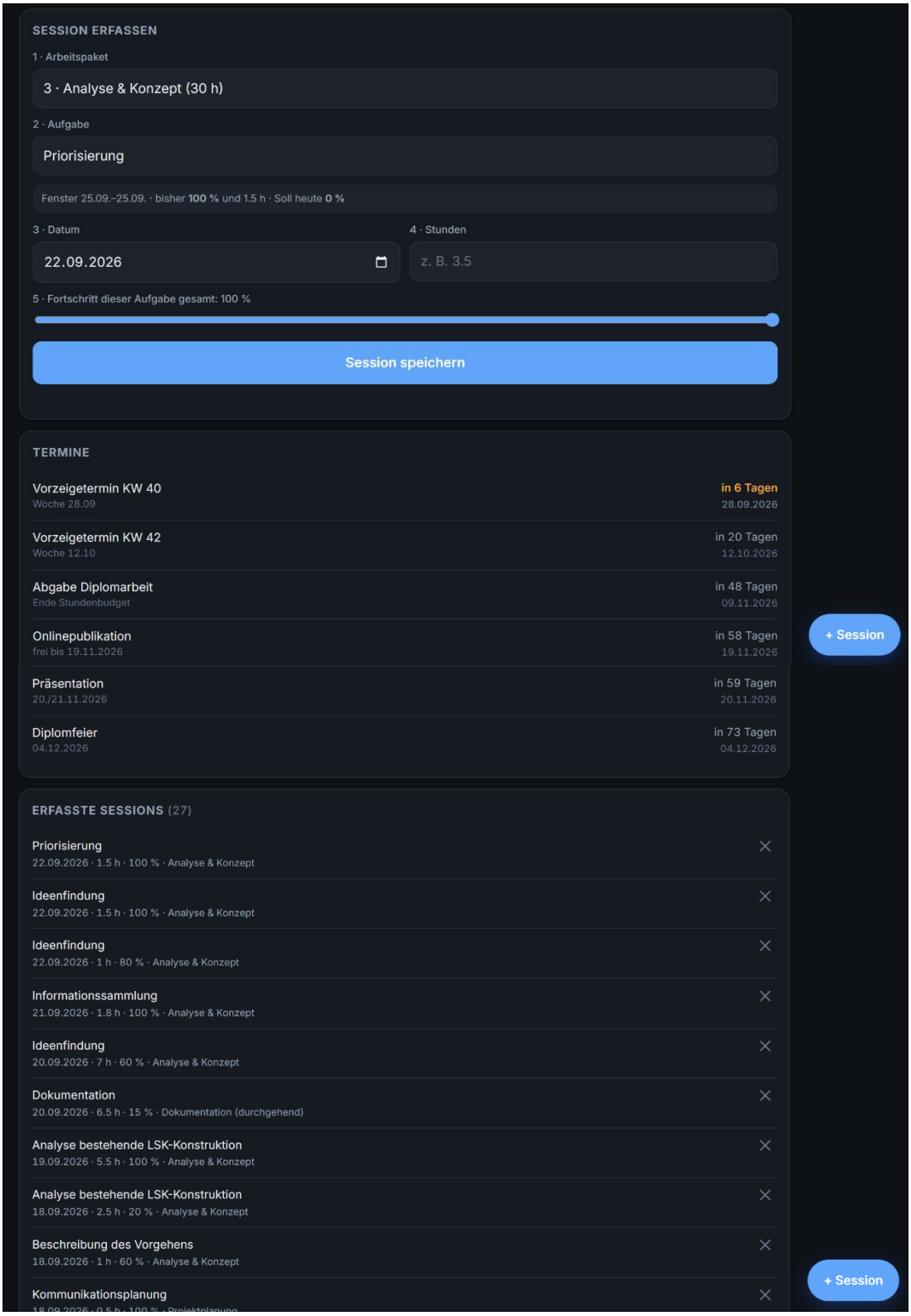
Mithilfe der KI Claude von Anthropic wurde zusätzlich zum Projektablaufplan ein digitales Projektüberwachungs-Dashboard aufgebaut. Das Dashboard zeigt live die verbleibenden Tage bis zur Abgabe, den Vorsprung oder Rückstand gegenüber dem Soll-Plan in Tagen, den Gesamtfortschritt in Prozent, sowie die aufgebrachten Stunden.

Nach jedem Arbeitseinsatz an dieser Diplomarbeit werden im Dashboard manuell Sessions erfasst. Beim Erfassen einer Session wählt man das Arbeitspaket (z.B. Projektinitialisierung) und die Aufgabe (z.B. Stakeholder-Analyse) per Dropdown-Menü aus, wählt danach das Datum, an dem die Aufgabe ausgeführt wurde, wie viele Stunden daran gearbeitet wurde und wie weit man den Gesamtfortschritt der Aufgabe in Prozent einschätzt.

Dadurch hat man durchgehend einen sehr guten Überblick, wo man bei der Arbeit steht, und kann frühzeitig reagieren.

Insgesamt wurden für die Diplomarbeit 304,3 Stunden aufgewendet.


Diplomarbeit — Optimierung Leitschaufelkranz
22.09.2026
gespeichert (sessionübergreifend)
TAGE BIS ABGABE
48
Tage
09.11.2026 · 14 % der Laufzeit
ZEITPLAN
+2.8
Tage voraus
Stand wie Plan am 25.09.
FORTSCHRITT
23 %
Soll 18 %
Δ +6 pp · voraus
STUNDEN
51.3
von mind. 240 h
Soll heute 42.9 h · +8.3 h
STUNDEN — MINDESTAUFWAND 240 H
Soll 42.9 h
51.3 h geloggt · noch 188.8 h bis Minimum
ARBEITSPAKETE — IST VS. SOLL
1 Projektinitialisierung 9.5/15 h
Ist 100 % · Soll 100 % · abgeschlossen 14.09.–18.09.
2 Projektplanung 12.5/15 h
Ist 100 % · Soll 100 % · abgeschlossen 12.09.–20.09.
3 Analyse & Konzept 21.8/30 h
Ist 62 % · Soll 18 % · voraus 21.09.–28.09.
Beschreibung des Vorgehens 21.09.–21.09.
Ist 60 % · Soll 100 % · 1 h · 1 Eintrag
Analyse bestehende LSK-Konstruktion 22.09.–23.09.
Ist 100 % · Soll 29 % · 8 h · 2 Eintrage
Informationssammlung 24.09.–24.09.
Ist 100 % · Soll 0 % · 1.8 h · 1 Eintrag
Ideenfindung 25.09.–25.09.
Ist 100 % · Soll 0 % · 9.5 h · 3 Eintrage
Priorisierung 25.09.–25.09.
Ist 100 % · Soll 0 % · 1.5 h · 1 Eintrag
Variantenbildung 26.09.–27.09.
Ist 0 % · Soll 0 % · 0 h
Evaluation favorisierte Variante 28.09.–28.09.
Ist 0 % · Soll 0 % · 0 h
4 Ausarbeitung Variante (Konstruktion) 0/80 h
Ist 0 % · Soll 0 % · noch offen 29.09.–23.10.
5 Bewertung & Nachweise 0/35 h
Ist 0 % · Soll 0 % · noch offen 30.10.–06.11.
6 Dokumentation (durchgehend) 7.5/50 h
Ist 15 % · Soll 15 % · im Plan 14.09.–08.11.
7 Abschluss 0/15 h
Ist 0 % · Soll 0 % · noch offen 03.11.–09.11.
+ Session
+ Session


SESSION ERFASSEN
1 · Arbeitspaket
3 · Analyse & Konzept (30 h)
2 · Aufgabe
Priorisierung
Fenster 25.09.–25.09. · bisher 100 % und 1.5 h · Soll heute 0 %
3 · Datum
22.09.2026
4 · Stunden
z. B. 3.5
5 · Fortschritt dieser Aufgabe gesamt: 100 %
Session speichern
TERMINE
Vorzeigetermin KW 40
Woche 28.09
in 6 Tagen
28.09.2026
Vorzeigetermin KW 42
Woche 12.10
in 20 Tagen
12.10.2026
Abgabe Diplomarbeit
Ende Stundenbudget
in 48 Tagen
09.11.2026
Onlinepublikation
frei bis 19.11.2026
in 58 Tagen
19.11.2026
Präsentation
20./21.11.2026
in 59 Tagen
20.11.2026
Diplomfeier
04.12.2026
in 73 Tagen
04.12.2026
+ Session
ERFASSTE SESSIONS (27)
Priorisierung
22.09.2026 · 1.5 h · 100 % · Analyse & Konzept
Ideenfindung
22.09.2026 · 1.5 h · 100 % · Analyse & Konzept
Ideenfindung
22.09.2026 · 1 h · 80 % · Analyse & Konzept
Informationssammlung
21.09.2026 · 1.8 h · 100 % · Analyse & Konzept
Ideenfindung
20.09.2026 · 7 h · 60 % · Analyse & Konzept
Dokumentation
20.09.2026 · 6.5 h · 15 % · Dokumentation (durchgehend)
Analyse bestehende LSK-Konstruktion
19.09.2026 · 5.5 h · 100 % · Analyse & Konzept
Analyse bestehende LSK-Konstruktion
18.09.2026 · 2.5 h · 20 % · Analyse & Konzept
Beschreibung des Vorgehens
18.09.2026 · 1 h · 60 % · Analyse & Konzept
Kommunikationsplanung
+ Session

8.2 Evaluation der Zielerreichung

In diesem Kapitel werden die Ziele aus der Zielscheibe und dem Pflichtenheft mit dem Ist-Zustand verglichen und bewertet, ob das Ziel erreicht wurde oder nicht. Anschliessend wird der Erfüllungsgrad ermittelt und kritisch hinterfragt, wieso ein Ziel nicht erreicht werden konnte.

Ziel	Soll	Ist	Erreicht
Richtziel			
Vollständiges 3D-CAD-Konzept, dokumentiert	Abgabe 09.11.2026, 18:00 Uhr	Abgabe 09.11.2026, 17:50 Uhr	✓
Erfolgskriterien LSK Lösungskonzept			
Ein Antrieb statt vier	1 zentraler Antrieb	1 Linearaktuator, Electrak XD	✓
Herstellkosten pro Baugruppe	max. 20'000 CHF	24'583.90 CHF	✘
Anzahl Komponenten	max. 150	353 einzelne Komponenten	✘
Gewicht	max. 120 kg	199,72 kg	✘
Stellzeit voller Verstellweg	unter 90 s	4,6 s bei 25 mm/s	✓
Verstellbereich Leitschaufeln	0° bis 45°	0° bis 45°, im CAD geprüft	✓
Positioniergenauigkeit und Winkelabweichung Schaufel - Schaufel	± 1°	theoretisch 0° bei gleichbleibender Wirkrichtung Windlast und durch einstellbare Koppelstangen	✓
Stellmoment pro Schaufel	min. 55 Nm	Aktuator kann Stellmoment von 55 Nm mit genug Reserve aufbringen	✓
Schnittstellen zur Turbine	Unverändert	Schnittstellen unverändert übernommen	✓
Schaufelprofil	Unverändert	Schaufelprofil unverändert übernommen, Anbindung angepasst	✓
Einbauraum	Unverändert	Einbauraum bleibt unverändert, mit Störkonturen in CAD geprüft	✓
Fertigungstauglichkeit	Serientaugliche Verfahren	Die Fertigungsteile wurden so konstruiert, dass sie sich mit einfachen, herkömmlichen Verfahren herstellen lassen und serientauglich sind	✓
Montageaufwand	max. 60 h	Montage ca. 25 h	✓
Detaillierungsgrad	Baugruppenmodell ohne Einzelzeichnungen	Ein komplettes Baugruppenmodell des Konzepts liegt vor	✓
Temperaturbeständigkeit Komponenten	-30° bis +80°	Alle gewählten Komponenten sind für den Outdooreinsatz bei diesen Temperaturen geeignet	✓
Komponentenwahl	Normteile sind zu bevorzugen	Überall wo möglich wurden Normteile und bereits auf dem Markt erhältliche Lösungen und Kaufteile verwendet	✓

Ziel	Soll	Ist	Erreicht
Erfolgskriterien Dokumentation			
Analyse bestehender LSK	min. 1 A4 Seite	8 A4 Seiten	✓
Definition Anforderungen und Randbedingungen	Im Pflichtenheft definiert, von Auftraggeber unterschrieben	Unterschriebenes Pflichtenheft liegt im Anhang	✓
Technische Berechnungen	min. 2 Berechnungen	6 technische Berechnungen (Auslegen von Komponenten)	✓
Nachvollziehbarer Variantenvergleich	min. 10 Bewertungskriterien	15 Bewertungskriterien	✓
Auswahl und Begründung Variante	min. halbe A4 Seite	4 A4 Seiten	✓
Lösungsvarianten	min. 2	2 Varianten	✓
Fertigungs- und Montagetauglichkeit	Vom Fachexperten schriftlich bestätigt	Auf 2,5 A4 Seiten dokumentiert, vom Fachexperten schriftlich am 04.11.26 bestätigt	✓
Beurteilung Gewichts- und Kostenreduktion	Vergleich Soll/Ist, vom Fachexperten schriftlich bestätigt, Kostenreduktion abgeschätzte Werte	Auf 2 A4 Seiten dokumentiert, Kostenreduktion grossteils reale Werte aus Richtpreisofferten, vom Fachexperten schriftlich am 04.11.26 bestätigt	✓
Variantenbewertung	Präferenzmatrix, Nutzwert-, Sensitivitätsanalyse	Präferenzmatrix und Nutzwertanalyse vorhanden, technische Machbarkeit statt Sensitivitätsanalyse	✓ / ✘
Ausarbeitung der Variante	Dokumentation beschreibt Ausarbeitung der Variante	Ausarbeitung der Variante vollständig beschrieben	✓
Beurteilung favorisierte Variante	SWOT-Analyse, Risiko-Analyse, Kosten-Nutzen-Analyse, Expertenbericht	SWOT-Analyse, Risiko-Analyse und Kosten-Nutzen-Analyse liegt vor, ein Expertenbericht genauso	✓

Erfüllungsgrad

✓ = 1 Punkt
✘ = 0 Punkte
✓ / ✘ = 0,5 Punkte

$$Erfüllungsgrad = \left(\frac{24{,}5\ Punkte\ Ist}{28\ Punkte\ Soll}\right) \cdot 100 = 87{,}5\%$$

Bewertung Zielerreichung

Der Grossteil der Ziele, die zu Beginn dieser Diplomarbeit gesetzt und vereinbart wurden, sind erreicht worden.

Bei der Variantenbewertung wurde auf eine Sensitivitätsanalyse verzichtet und stattdessen die technische Machbarkeit überprüft, deshalb wurde hier das Ziel nicht 100% erreicht.

Das Ziel der Herstellkosten der Baugruppe wurde auch nicht ganz erreicht, bei einer allfälligen Serienproduktion würde der Wert von unter 20'000 CHF schätzungsweise knapp erreicht werden, für einen einzelnen Leitschaufelkranz jedoch nicht.

Die Anzahl Komponenten wurde nicht erreicht, da eine Nachzählung im CAD ergab, dass der ursprüngliche Leitschaufelkranz aus 750 einzelnen Komponenten besteht, statt wie angegeben 250. Würde man die Senkung prozentual betrachten, wäre das Ziel erreicht worden. Von 250 auf 150 Komponenten wäre eine Senkung von 40%, ich habe ausgehend von den 750 Komponenten eine Senkung um 52,9% erreicht.

Das Zielgewicht wurde auch nicht erreicht, das zeichnete sich jedoch schon früh im Verlauf der Diplomarbeit ab. Eine Senkung von 320 kg auf 120 kg war schlicht nicht machbar.

Zu den obigen drei Zielen, die nicht erreicht wurden, schrieb Stefan noch folgendes in einer E-Mail vom 28.08.2026 bei der Übergabe der Zielvorgaben:

Eine Ergänzung möchte ich noch anbringen, da ich diesen Punkt bisher nicht eindeutig spezifiziert habe: Die angegebenen Zielkosten beziehen sich auf die Herstellung von ein bis maximal zwei Stück und nicht auf eine Serienfertigung.
Mir ist bewusst, dass die Zielvorgaben sehr ambitioniert sind, sowohl hinsichtlich der Kosten als auch der deutlichen Gewichtsreduktion. Sieh diese Vorgaben daher als Challenge.
Solltest du die definierten Zielwerte nicht vollständig erreichen, aber dennoch eine deutliche Reduktion erzielen, ist das bereits sehr wertvoll. Mit einer entsprechenden Begründung wird sich dies nicht oder nur geringfügig auf die Bewertung auswirken.

Bild 85: Screenshot E-Mail vom 28.08.2026

So bin ich dann bei der Erarbeitung auch vorgegangen, ich nahm die Vorgaben als persönliche Challenge. Obwohl ich schlussendlich die Ziele nicht ganz erreicht habe, konnte ich die Kosten, die Komponenten und das Gewicht deutlich senken und bin mit dem Ergebnis zufrieden.

8.3 Reflexion Weg zum Ziel

Für mich persönlich waren die Rahmenbedingungen, in denen sich die Diplomarbeit abspielte, nicht ganz einfach. Die rund acht Wochen sind ein kurzes Zeitfenster für die Erarbeitung einer Diplomarbeit. Es war grosses Glück, dass ich bei meinem Arbeitgeber während eines Grossteils des Zeitraumes Zeit zur Verfügung gestellt bekam. Ansonsten wäre es für mich kaum möglich gewesen eine unbezahlte Diplomarbeit eines externen Auftraggebers, nebst der beruflichen Tätigkeit beim Arbeitgeber, während des vorgegebenen Zeitraums zu erarbeiten. Zudem fand während zwei Wochen des Zeitraums noch Unterricht statt.

Förderlich war während der Erarbeitung der Diplomarbeit sicherlich auch der Zugang zu künstlicher Intelligenz. Durch die Abgabe von mühseligen Fleissarbeiten konnte ich mich auf die Hauptarbeit, die Ausarbeitung des Lösungskonzepts und das Schreiben der Dokumentation, konzentrieren und dort die gewonnene Zeit für ein möglichst gutes Ergebnis einsetzen.

Gut für die Zusammenarbeit mit den verschiedenen Akteuren für das Projekt war sicherlich, dass ich möglichst frühzeitig versuchte Termine zu vereinbaren. Sei es für Besprechungen, Nutzung von Ressourcen oder Offerten Anfragen. So konnten Engpässe oder Totzeiten während der Arbeit vermieden werden.

8.4 Lessons learnt / Reflexion

Für mich war es ein spannendes Projekt, das ich im Rahmen dieser Diplomarbeit erarbeiten durfte. Die Optimierung einer bestehenden Baugruppe zur Senkung der Kosten und des Gewichts, bei gleichbleibender Funktionalität war eine gute Herausforderung. Mit dem entstandenen Ergebnis bin ich sehr zufrieden und ich habe meiner Meinung nach das Beste mit den verfügbaren Mitteln und der Zeit aus der Baugruppe herausgeholt.

Zeitlich ist es trotz den deutlich mehr aufgewendeten Stunden als den vorgegebenen 240 sehr gut aufgegangen mit der Planung. Das gebaute Claude-Dashboard war sicherlich auch ein grosser Motivationsfaktor dafür mit dem angezeigten Vorsprung. Diesen versuchte ich während der Arbeit ständig ein wenig mehr auszubauen gegen Ende einen Puffer, statt Stress zu haben. Das ist auch sehr gut aufgegangen, das war die erste Arbeit, die ich ohne Schlussspurt-Stress fertigstellen konnte. Einzig gewisse Schreibblockaden und Fehler im CAD waren etwas hinderlich beim Arbeiten, vermeiden lässt sich so etwas aber leider nie ganz.

Bezüglich des Ergebnisses war ich vor allem erstaunt, wie viel Gewicht ich durch den Materialwechsel von Edelstahl auf Aluminium bei den Distanzwellen einsparen konnte. Ein Materialwechsel dieser Bauteile brachte prozentual deutlich mehr Gewichtsersparnis als z.B. Ausschnitte in den Bauteilen.

Ich finde auch gut, dass das Ergebnis dieser Arbeit ein reales CAD-Konzept ist und nicht nur eine theoretische Auslegung. Der Auftraggeber kann die CAD-Modelle direkt nutzen, um die technischen Zeichnungen daraus abzuleiten und das Konzept in die Realität umzusetzen.

Was ich für mich persönlich noch als Verbesserung mitnehme, dass man die Ist-Daten noch früh selbst verifizieren sollte (250 vs. 750 Komponenten) und dann nachfragen, woher die Abweichungen stammen (andere Zählweise o.Ä.). Teile mit langen Lieferzeiten müssen bei einem Projekt früh anfragefertig gemacht werden, eine zu lange Lieferzeit, wie es heutzutage oft vorkommen kann, kann den ganzen Erfolg eines Projekts gefährden.

KI werde ich auch zukünftig mehr für Fleissarbeiten einsetzen, die Möglichkeiten zum heutigen Zeitpunkt sind schon wahnsinnig gut.

8.5 Ausblicke

Während des Ausarbeitens des Konzepts ist mir vor allem aufgefallen, dass der Leitschaufelkranz immer noch sehr massiv aufgebaut ist. Anhand der Berechnungen, die von den angegebenen Lasten ausgehen, muss er es aber auch.

Meines Erachtens lohnt es sich sicherlich noch, die realen Lasten am Prototyp zu ermitteln, wenn er in den Feldtest geht. Fallen die Lasten deutlich kleiner aus kann das von mir erarbeitete Lösungskonzept nochmal mit den realen Lasten durchgerechnet und angepasst werden. Es könnte z.B. ein weniger starker Aktuator verwendet werden, kleinere Führungen oder aber auch viele Fertigungsteile weniger massiv ausgelegt werden. Dadurch liesse sich noch mal deutlich Gewicht und auch Kosten sparen.

8.6 Schluss

Rekapitulation Auftrag und Anforderungen

Im Auftrag der VentoStream AG wurde der Leitschaufelkranz eines Windkraftturbinen-Prototyps konstruktiv optimiert. Es wurde ein 3D-CAD-Lösungskonzept erstellt, das die Herstellkosten, die Anzahl Komponenten und das Gewicht deutlich senkt. Die Funktion, die Schnittstellen zur Turbine und der vorhandene Einbauraum mussten dabei unverändert bestehen bleiben. Zielwerte waren unter anderem Herstellkosten von max. 20'000 CHF, max. 150 Komponenten und max. 120 kg Gesamtgewicht.

Spezifische Fragestellung und Hypothese

Lässt sich die Baugruppe konstruktiv so vereinfachen, dass Kosten, Teilezahl und Gewicht deutlich sinken, ohne dass sie in ihrer Funktion verändert wird? Die Hypothese ist, dass dafür ein einzelner Antrieb statt vier eingesetzt werden kann.

Zusammenfassung und Endergebnisse

Ein einzelner Thomson Electrak XD Linearaktuator verstellt über einen Drehring und 20 Koppelstangen alle Leitschaufeln synchron von 0° bis 45°. Die rechnerisch maximal benötigte Antriebskraft liegt bei 8'355,98 N, ein voller Verstellweg dauert ca. 4,6 s.

Die Lagerung des Drehrings ist mit THK HCR25 Bogenführungen umgesetzt. Die Lagerung des Drehrings, die Gleitlager, Distanzwellen, Kugelköpfe und der Linearaktuator sind rechnerisch ausgelegt.

Eigenschaft	Bestehender LSK	Neuer LSK	Reduktion
Einzelteile der Antriebe	12 (4 Antriebe)	1 (1 Antrieb)	91,7%
Einzelteile ohne Normteile	750	353	52,9%
Gewicht	320 kg	199,72 kg	37,6%
Herstellkosten inkl. Montage	50'000 CHF	24'583.90 CHF	50,8%
Montageaufwand (geschätzt)	160 h	25 h	84,4%

Wie bei der Kosten-Nutzen-Analyse beschrieben ist der neue Leitschaufelkranz bereits beim ersten Stück trotz Initialkosten um 11'816.10 CHF günstiger als der bestehende LSK. Mit Mengenrabatten bei Serienfertigung ergibt sich bei 20 Turbinen pro Jahr eine Ersparnis von rund 600'000 CHF.

Bewertung der Ergebnisse

Die Hypothese wird bestätigt, die Baugruppe lässt sich mit einem einzelnen Antrieb realisieren. Die Kosten und die Anzahl Komponenten wurden um gut die Hälfte reduziert, das Gewicht um gut einen Drittel. Die Schnittstellen und der Einbauraum bleiben dabei unverändert.

Der Erfüllungsgrad der Zielerreichung liegt bei 87,5%. Nicht erreicht wurden die vorgegebenen Zielwerte für die Kosten, die Komponenten und das Gewicht. Ein weiteres Ziele, das nur zur Hälfte erreicht wurde, betrifft die Dokumentation. Grund dafür ist der bewusste Verzicht einer Sensitivitätsanalyse.

Alle Ergebnisse sind nur im CAD und rechnerisch nachgewiesen, es erfolgte kein Aufbau eines Prototyps. Die ermittelten Kosten beruhen auf Richtpreisofferten.

Fazit und Ausblick

Eine Realisierung des LSK-Konzepts lohnt sich. Ein Aufbau kann entweder am bestehenden Turbinen-Prototyp oder bereits an einer zweiten, neuen Turbine erfolgen.

Vor der Umsetzung müssen die technischen Zeichnungen erstellt, die Steuerungsanbindung geklärt und verbindliche Offerten ausgehandelt werden.

8.7 Persönliches Schlusswort

Mit dieser Diplomarbeit schliesse ich mein Studium zum Maschinenbautechniker HF ab. Es waren harte, aber auch lehrreiche drei Jahre neben der normalen Berufstätigkeit.

Umso mehr freut es mich, dass ich mit der Optimierung des Leitschaufelkranzes ein anspruchsvolles, aber angemessenes Projekt für meinen Abschluss bearbeiten durfte. Das Projekt zeigt gut auf, wie viel Potential sich mit gezielten Analysen und einem strukturierten Vorgehen aus einer bestehenden Baugruppe herausholen lässt. Besonders wertvoll ist für mich, dass meine Arbeit ein echtes Problem löst und der Auftraggeber mein Konzept direkt weiterverwenden kann.

Nach meinem Abschluss freue ich mich besonders auf die wiedergewonnene Freizeit, die Restauration meines VW Golf 2 fertigzustellen und auch mal wieder ausserhalb der Schulferienzeit verreisen zu können. 😉

8.8 Danksagungen

Ein besonderes Dankeschön geht an:

- **Die Asytec AG**, für die Unterstützung meines Studiums, bei Problemen während der Diplomarbeit, sowie die zur Verfügung gestellten Ressourcen und das Know-How für meinen erfolgreichen Abschluss
- **Stefan Haberthür**, VentoStream AG, für das spannende Thema, die zeitlichen Aufwände und die rasche und kompetente Unterstützung als Fachexperte während der Diplomarbeit
- **Patrick Baumann**, TEKO Olten, für die Betreuung als Diplomlehrer, die rasche Beantwortung von Fragen und die hilfreichen Rückmeldungen
- [redacted] für die Vermittlung des Kontakts zur VentoStream AG, ohne die diese Diplomarbeit nicht zustande gekommen wäre.
- [redacted] meine Freundin, für das Verständnis und die Unterstützung während dieser intensiven Zeit

9 Eigenständigkeitserklärung

Der Verfasser bestätigt mit seiner Unterschrift, dass die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als die angegebenen Hilfsmittel erstellt wurde.

Die aus fremden Quellen (einschliesslich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Inhalte sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht vorgelegt worden.

Ort / Datum: Reiden, 09.11.2026

[redacted]

Julian Blum

10 Verzeichnisse

10.1 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AC	Alternating Current, Wechselstrom
CAD	Computer-Aided Design, rechnergestütztes Konstruieren
CANopen	Kommunikationsprotokoll auf Basis des CAN-Bus (Controller Area Network)
CHF	Schweizer Franken
CNC	Computerized Numerical Control, computergestützte numerische Steuerung
EN AW	Europäische Norm, Bezeichnung für Aluminium-Knetlegierungen nach EN 573, z. B. EN AW-6082
EUR	Euro
FDM	Fused Deposition Modeling, 3D-Druck im Schmelzschichtverfahren
HF	Höhere Fachschule
IP	International Protection, Schutzart gegen Fremdkörper und Wasser, z. B. IP66
KI	Künstliche Intelligenz
LSK	Leitschaufelkranz
PDM	Produktdatenmanagement für CAD
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data, neutrales CAD-Austauschformat nach ISO 10303
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats (Stärken, Schwächen, Chancen, Gefahren)
S/O, S/T, S/W, W/O, W/T	Strategien der SWOT-Analyse aus der Kombination von Stärken (S), Schwächen (W), Chancen (O) und Gefahren (T)
T6	Werkstoffzustand bei Aluminium: lösungsgeglüht und warmausgelagert
USD	US-Dollar
V4A	Handelsbezeichnung für säurebeständigen Chrom-Nickel-Molybdän-Stahl, hier 1.4404
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VTG	Variable Turbinengeometrie

10.2 Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Verstellmechanismus Kraftwerk Sylvenstein I, Quelle: www.landeskraftwerke.bayern 16
Bild 2: Verstellmechanismus Flusskraftwerk Matte, Quelle: www.ewb.ch 16
Bild 3: Visualisierung Wasserfall-Modell, Quelle: www.gpm-ipma.de 20
Bild 4: 16er Matrix vor Prävention 25
Bild 5: 16er Matrix nach Prävention 26
Bild 6: Bestehender Leitschaufelkranz 28
Bild 7: Funktionsprinzip LSK 29
Bild 8: Antrieb LSK 30
Bild 9: Verstelleinheit LSK 31
Bild 10: Lagerböcke Leitschaufeln 32

Bild 11: Schnittansicht Lagerung 32
Bild 12: Distanzwellen LSK....32
Bild 13: Stabilisierungswelle 33
Bild 14: Induktivsensoren LSK....33
Bild 15: Abdeckbleche....34
Bild 16: Aufhängungsplatten unten 34
Bild 17: Irisblende-Mechanik,....36
Bild 18: Electrak Linearaktuator, Quelle: www.produktion.de....36
Bild 19: Rollenkette und Zahnriemen, Quelle: www.club.auto-doc.at 37
Bild 20: Franke Drehverbindung Typ LVE, Quelle: www.franke-gmbh.de 37
Bild 21: Winkelgetriebe, Quelle: www.shop.ketterer.de....38
Bild 22: Bogenführung THK HCR, Quelle: www.bachofen.ch 38
Bild 23: Bogenführung Hepco PRT2, Quelle: www.hepcomotion.com 38
Bild 24: Mindmap LSK....39
Bild 25: Lösungsskizze 1 Drehring....40
Bild 26: Lösungsskizze 2 Drehkranz....41
Bild 27: Lösungsskizze 3 Schubstangen 42
Bild 28: Lösungsskizze 4 Kettentrieb 43
Bild 29: Lösungsskizze 5 Iris-Ring....44
Bild 30: LSK mit Drehring 48
Bild 31: Drehring Schaufeln offen 48
Bild 32: Drehring Schaufeln zu 48
Bild 33: Ansicht Drehring und Anlenkhebel seitlich 48
Bild 34: LSK mit Schubstangen 50
Bild 35: Schubstangen Schaufeln offen 50
Bild 36: Schubstangen Schaufeln zu 50
Bild 37: Ansicht Anlenkhebel Schubstangen seitlich....50
Bild 38: Messung Drehring Schaufelstellung 22.5 Grad....55
Bild 39: Messung Drehring Schaufelstellung 0 Grad....55
Bild 40: Messung Mitte Schaufelstellung 45 Grad....56
Bild 41: Messung Mitte Schaufelstellung 22.5 Grad....56
Bild 42: Messung Oben-Oben Schaufel 45 Grad 57
Bild 43: Messung Oben-Oben Schaufel 22.5 Grad 57
Bild 44: Messung Unten-Oben Schaufel 22.5 Grad 58
Bild 45: Messung Unten-Oben Schaufel 45 Grad 58
Bild 46: Skizze Ursache Unterschied Länge, Quelle: KI-generiert 59
Bild 47: Finales CAD-Modell des Leitschaufelkranzes....62
Bild 48: Ansicht LSK seitlich links 63
Bild 49: Seitenprofil LSK....63
Bild 50: Ansicht LSK hinten 63
Bild 51: Ansicht LSK mit Schaufelstellung 45 Grad....64
Bild 52: Stellung 45 Grad....64
Bild 53: Stellung 22,5 Grad....64
Bild 54: Stellung 0 Grad....64
Bild 55: Lagerkranz mech. Prototyp....65
Bild 56: CAD-Modell Grundplatte....73
Bild 57: Aufhängungsplatten....74
Bild 58: CAD-Modell Lagerkranz 74
Bild 59: Detailansicht Lagerkranz 74
Bild 60: Gleitlagerbuchse Iglidur G, Quelle: www.igus.ch 77
Bild 61: Distanzwellen (dunkelgrau) im CAD-Modell....78

Bild 62: Einspannung der Distanzwellen im LSK 78
Bild 63: Schnittansicht Lagerung Leitschaufel 82
Bild 64: Leitschaufel mit Hülse und Passfeder 83
Bild 65: Koppelstange im CAD 84
Bild 66: Drehring mit Konsolen 85
Bild 67: Anbindung Linearaktuator 86
Bild 68: Anbindung Drehring 86
Bild 69: Anbindung Grundplatte 87
Bild 70: Störkonturen Schnittansicht 87
Bild 71: Linearaktuator ausgefahren 88
Bild 72: Störkonturen unten 88
Bild 73: Anschlag auf Grundplatte 89
Bild 74: Anordnung Lagerung auf Grundplatte 90
Bild 75: Ansicht verbaute Lagerung CAD 90
Bild 76: Bogensegment mit Laufwagen 90
Bild 77: Induktiv-Sensoren Baumer 93
Bild 78: Aufnahme Abdeckblech Grundplatte 93
Bild 79: Abdeckblech Aluminium 93
Bild 80: Skizze Fertigung Leitschaufeln, Quelle: KI-generiert 95
Bild 81: Masseneigenschaften Leitschaufelkranz in SolidWorks 98
Bild 82: 16er Matrix Umsetzung vor Prävention 103
Bild 83: 16er Matrix Umsetzung nach Prävention 103
Bild 84: Screenshot E-Mail vom 04.11.2026 106
Bild 85: Screenshot E-Mail vom 28.08.2026 112

10.3 Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Projektstrukturplan 21
Diagramm 2: Gantt-Diagramm Projektablaufplan Soll-Werte 22
Diagramm 3: Projektrealisierungsplan 27
Diagramm 4: Stärkediagramm nach VDI 2225 46
Diagramm 5: Phasenplan Umsetzung Variante Drehring 61
Diagramm 6: Smith-Diagramm Distanzwellen 80
Diagramm 7: Phasenplan Umsetzung des Konzepts in die Realität 104

10.4 Literatur und Quellenverzeichnis

Literatur

- Alfred Böge, Wolfgang Böge: Formeln und Tabellen zur Technischen Mechanik. 28. Auflage
- Christian Spura, Bernhard Fleischer, Herbert Wittel, Dieter Jannasch: Roloff/Matek Maschinenelemente, Normung, Berechnung, Gestaltung. 27. Auflage

Herstellerunterlagen und Datenblätter

- Baumer Electric AG: Induktiver Sensor IFRR 18P37T1/S14L-9, www.baumer.com
- HepcoMotion: Ringführung HDRT, www.hepcomotion.com
- igus: Gelenkkopf igubal KBLM-ST-08-G-EK, Mail von Kilian Näf, Technischer Verkaufsberater igus
- igus: Gleitlager iglidur G GFM-2528-21, www.igus.ch
- THK: Bogenführung HCR, www.thk.com
- Thomson: Linearaktuatoren Electrak XD und Electrak HD, www.thomsonlinear.com
- Schneider Electric: Motoren und Getriebe BMH / GBX, www.se.com

Internetquellen

- Werkstoffdaten Aluminium EN AW-6082 T6, www.kloeckner.de
- Werkstoffdaten EN AW-6082 T6, Wechselfestigkeit, www.modulusmetal.com
- Luftdichte, de.wikipedia.org/wiki/Luftdichte

Unterlagen VentoStream AG

- Projektbeschrieb Optimierung LSK (Datei 20260810_Projektbeschrieb_Optimierung LSK_Julian Blum)
- STEP-Modell der bestehenden LSK-Baugruppe
- STEP-Datei der Störkonturen im Bereich des Linearaktuators
- Angaben zu Windgeschwindigkeit und internem Stundensatz, Stefan Haberthür
- E-Mail-Verkehr mit den Zielvorgaben und Fragen, Stefan Haberthür

Unterlagen TEKO Olten

- Beurteilung Diplomarbeit Olten 2024
- Datenplan Herbst 2026, alle Studienrichtungen
- Richtlinien Diplomarbeit 2025, alle Studienrichtungen
- TEKO_MTE_Skript_pb20231116

KI-Hilfsmittel

- Anthropic Claude, Modell Claude Opus 5.5, Einsatz deklariert unter Kapitel 1.3
- Chat GPT, Free-Version, Einsatz deklariert unter Kapitel 1.3

11 Anhang

11.1 Projektstatusberichte

Projekt: Diplomarbeit – Optimierung Leitschaufelkranz (LSK) **Stautsbericht: KW 38**

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Julian Blum (Diplomand)	Konstruktive Optimierung des bestehenden LSK: Herstellkosten, Teilezahl und Gewicht senken, Serientauglichkeit erhöhen. Ergebnis: 3D-CAD-Konzept (SolidWorks)	Patrick Baumann (Diplomlehrer) Stefan Haberthür (Fachexperte)

Gesamt-beurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
	■ □ □	■ □ □	■ □ □	■ □ □	■ □ □
Tendenz	⇨	⇨	⇨	⇨	⇨

Aktueller Projektstand

KW 38 · Berichtsperiode 14.09.–20.09.2026 · Berichtsdatum 20.09.2026 · 50 Tage bis Abgabe

Gesamtfortschritt bei ca. 19%

Erledigt

- Projektinitialisierung komplett
- Projektplanung komplett
- Analyse bestehende Konstruktion

In Arbeit

- Dokumentation (Gesamtfortschritt ca. 15%)

Was läuft gut?

- Projektinitalisierung und Projektplanung bereits komplett abgeschlossen im geschätzten zeitlichen Rahmen. Analyse bestehender LSK auch komplett. Komme gut voran und kann mir so einen kleinen Puffer erarbeiten.

Was läuft nicht gut?

- 1-2 mal kleinere Schreibblockaden gehabt, ansonsten keine Probleme

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen

Nächste Woche im Rahmen der Phase der Projektrealisierung das Beschreiben des Vorgehens, Informationssammlung, Ideenfindung, Priorisierung, Variantenbildung und die Evaluation der favorisierten Variante komplett abschliessen, um dann spätestens KW 40 mit der Ausarbeitung des Konzepts beginnen zu können.

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

Projekt: Diplomarbeit – Optimierung Leitschaufelkranz (LSK) Stautsbericht: KW 39

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Julian Blum (Diplomand)	Konstruktive Optimierung des bestehenden LSK: Herstellkosten, Teilezahl und Gewicht senken, Serientauglichkeit erhöhen. Ergebnis: 3D-CAD-Konzept (SolidWorks)	Patrick Baumann (Diplomlehrer) Stefan Haberthür (Fachexperte)

Gesamt-beurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
Tendenz	⇨	⇨	⇨	⇨	⇨

Aktueller Projektstand

KW 39 · Berichtsperiode 21.09.–27.09.2026 · Berichtsdatum 27.09.2026 · 43 Tage bis Abgabe

Gesamtfortschritt bei ca. 35%

Erledigt

- Projektrealisierung bis zur Ausarbeitung der Variante
- Dokumentation bis zum aktuellen Stand nachgetragen

In Arbeit

- Konstruktion im CAD, Stand ca. 5%

Was läuft gut?

- Projektrealisierung bis zur Ausarbeitung der Variante bereits abgeschlossen und mit der Ausarbeitung des Lösungskonzepts im CAD begonnen. Dadurch dem Zeitplan ein paar Tage voraus.

Was läuft nicht gut?

- Die Variantenbildung und die Wahl der favorisierten Variante hat deutlich mehr Zeit in Anspruch genommen als gedacht, durch die Überprüfung der mechanischen Machbarkeit an den CAD-Mockups, die ich zusätzlich noch gemacht habe.
- Das vorgegebene Gewichtsziel einzuhalten stellt sich jetzt schon als sehr schwierig heraus.

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen

Das Ziel der nächsten Woche ist es, das CAD Modell soweit aufzubauen, dass alle nötigen Komponenten verbaut sind und der Mechanismus funktioniert. Dann kann ich eine erste Zwischenbilanz ziehen, wie weit ich von den Optimierungszielen im Pflichtenheft noch entfernt bin. Anhand der Ergebnisse der Zwischenbilanz werden dann die nächsten Schritte zur Optimierung der Baugruppe auf diese Ziele hin eingeleitet. Um Gewicht zu sparen evtl. eine Zusammenarbeit mit bechtle-plm suchen für eine fundierte FEM-Analyse im SolidWorks. Da fehlt es mir an genügend Kompetenz zur Bedienung des Simulation-Programms.

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

Projekt: Diplomarbeit – Optimierung Leitschaufelkranz (LSK) Statusbericht: KW 40

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Julian Blum (Diplomand)	Konstruktive Optimierung des bestehenden LSK: Herstellkosten, Teilezahl und Gewicht senken, Serientauglichkeit erhöhen. Ergebnis: 3D-CAD-Konzept (SolidWorks)	Patrick Baumann (Diplomlehrer) Stefan Haberthür (Fachexperte)

Gesamt-beurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
	■ □ □	■ □ □	■ □ □	□ ■ □	■ □ □
Tendenz	⇨	⇨	⇨	⇨	⇨

Aktueller Projektstand

KW 39 · Berichtsperiode 21.09.–27.09.2026 · Berichtsdatum 27.09.2026 · 43 Tage bis Abgabe

Gesamtfortschritt bei ca. 40%

Erledigt

- Mechanischer Prototyp im CAD aufgebaut
- Messungen durchgeführt und Antriebskraft und Lagerkraft berechenet

In Arbeit

- Dokumentation bis zum aktuellen Stand nachtragen
- Optimierung des Prototyps zum finalen Produkt

Was läuft gut?

- Der mechanische Prototyp ist fertig und belegt, dass der Mechanismus so funktioniert.

Was läuft nicht gut?

- Der Aufbau im CAD war nicht einfach, vorallem für die Verknüpfungen mit den vielen Freiheitsgraden (Kugelkopf) haben viel Zeit gefressen, waren aber nötig zur Überprüfung der Funktion.
- Dokumentation konnte ich noch nicht ganz auf den aktuellen Stand nachtragen
- Optimierungen führen manchmal in eine Sackgasse und versanden viel Zeit
- Zielgewicht werde ich nicht erreichen können.

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen

Ziel der kommenden Woche ist es, das CAD-Modell soweit mal fertig zu machen bis auf die FEM Analyse und die Gewichtsreduktion. Wichtig ist, dass die Lagerung und der Antrieb berechnet und ausgelegt sind. Die FEM-Analyse des Modells zur Gewichtsersparnis einzeler Komponenten wird nur durchgeführt, wenn die verbleibende Zeit noch reicht. Die Dokumentation soll auch auf den aktuellen Stand nachgetragen werden.

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

Projekt: Diplomarbeit – Optimierung Leitschaufelkranz (LSK) Statusbericht: KW 41

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Julian Blum (Diplomand)	Konstruktive Optimierung des bestehenden LSK: Herstellkosten, Teilezahl und Gewicht senken, Serientauglichkeit erhöhen. Ergebnis: 3D-CAD-Konzept (SolidWorks)	Patrick Baumann (Diplomlehrer) Stefan Haberthür (Fachexperte)

Gesamtbeurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
	■ □ □	■ □ □	■ □ □	□ ■ □	■ □ □
Tendenz	⇨	⇨	⇨	⇨	⇨

Aktueller Projektstand

KW 39 · Berichtsperiode 05.10.–11.10.2026 · Berichtsdatum 11.10.2026 · 29 Tage bis Abgabe

Gesamtfortschritt bei ca. 56%

Erledigt

- CAD Modell nahezu fertig
- Finale Antriebskraft berechnet
- Erste Offerten eingeholt

In Arbeit

- Berechnungen durchführen für Lager etc.
- Offerten einholen

Was läuft gut?

- Das CAD Modell ist so gut wie fertig und schaut gut aus. Auch die Preise für die ersten Offerten sind sehr vielversprechend

Was läuft nicht gut?

- Die Offerte von Bachofen für THK lässt auf sich warten, ohne diese Offerte kann das CAD Modell noch nicht beendet werden. Sie entscheidet ob 3 oder 4 Bogenführungen verbaut werden und somit auf einen Ring als Verstärkungsrippe gegen Biegung auf dem Drehring verzichtet werden kann.

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen

Ziel der nächsten Woche ist das CAD Modell komplett fertig zu machen, sobald die nötige Offerte da ist. Alle Berechnungen sollen durchgeführt sein.

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

Projekt: Diplomarbeit – Optimierung Leitschaufelkranz (LSK) Statusbericht: KW 42

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Julian Blum (Diplomand)	Konstruktive Optimierung des bestehenden LSK: Herstellkosten, Teilezahl und Gewicht senken, Serientauglichkeit erhöhen. Ergebnis: 3D-CAD-Konzept (SolidWorks)	Patrick Baumann (Diplomlehrer) Stefan Haberthür (Fachexperte)

Gesamt-beurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
	■ □ □	■ □ □	■ □ □	■ □ □	■ □ □
Tendenz	⇗	⇨	⇗	⇨	⇨

Aktueller Projektstand

KW 42 · Berichtsperiode 12.10.–18.10.2026 · Berichtsdatum 18.10.2026 · 22 Tage bis Abgabe

Gesamtfortschritt bei ca. 72%

Erledigt

- CAD Modell komplett fertig
- Alle rechnerischen Nachweise erbracht

In Arbeit

- Dokumentation nachtragen, Gesamtfortschritt ca. 65%
- Offerten einholen

Was läuft gut?

- Das CAD-Modell der neuen Leitschaufelkranzes ist komplett fertig und funktioniert so. Alle rechnerischen Nachweise sind erbracht.

Was läuft nicht gut?

- Richtpreisofferten lassen teils lange auf sich warten, mehrmaliges nachhaken nötig.
- Dokumentation hinkt dem eigentlichen Stand der Arbeit etwas hintendrein.
- CAD hat schlussendlich deutlich mehr Zeit gefressen als gedacht

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen

Ziel der kommenden Woche ist es die Dokumentation komplett auf den Stand der Arbeit zu bringen und mit den ganzen Analysen (Fertigungstauglichkeit, Montagetauglichkeit, Kosten-Nutzen etc.) anzufangen. Bei immer noch offenen Offertenanfragen nochmals nachhaken.

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

Projekt: Diplomarbeit – Optimierung Leitschaufelkranz (LSK) Statusbericht: KW 43

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Julian Blum (Diplomand)	Konstruktive Optimierung des bestehenden LSK: Herstellkosten, Teilezahl und Gewicht senken, Serientauglichkeit erhöhen. Ergebnis: 3D-CAD-Konzept (SolidWorks)	Patrick Baumann (Diplomlehrer) Stefan Haberthür (Fachexperte)

Gesamtbeurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
	■ □ □	■ □ □	■ ■ □	■ □ □	■ □ □
Tendenz	⇗	⇨	⇨	⇨	⇨

Aktueller Projektstand

KW 43 · Berichtsperiode 19.10.–25.10.2026 · Berichtsdatum 26.10.2026 · 14 Tage bis Abgabe

Gesamtfortschritt bei ca. 83%

Erledigt

- Ausarbeitung Hauptteil
- Doku ist auf aktuellem Stand der Arbeit
- Analysen LSK (Montagetauglichkeit, Fertigungstauglichkeit etc. fertig)

In Arbeit

- Risikoanalyse, Kosten-Nutzen-Analyse

Was läuft gut?

- Ich komme gut voran mit der Arbeit, spätestens Ende Woche wird der erste Entwurf der Doku fertig sein.

Was läuft nicht gut?

- Die ganze Arbeit hat deutlich mehr Zeit eingenommen als geplant.

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen

Diese Woche muss der erste Entwurf der Dokumentation fertig sein, damit der Expertenbericht von Stefan erstellt werden kann und die Dokumentation in der letzten Woche noch abgabebereit überarbeitet werden kann.

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

Projekt: Diplomarbeit – Optimierung Leitschaufelkranz (LSK) Statusbericht: KW 44

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Julian Blum (Diplomand)	Konstruktive Optimierung des bestehenden LSK: Herstellkosten, Teilezahl und Gewicht senken, Serientauglichkeit erhöhen. Ergebnis: 3D-CAD-Konzept (SolidWorks)	Patrick Baumann (Diplomlehrer) Stefan Haberthür (Fachexperte)

Gesamtbeurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
	■ □ □	■ □ □	■ ■ □	■ □ □	■ □ □
Tendenz	⇗	⇨	⇨	⇨	⇨

Aktueller Projektstand

KW 44 · Berichtsperiode 26.10.–01.11.2026 · Berichtsdatum 03.11.2026 · 6 Tage bis Abgabe

Gesamtfortschritt bei ca. 92%

Erledigt

- Risikoanalyse und Kosten-Nutzen-Analyse
- Projektüberwachung
- Evaluation Zielerreichung

In Arbeit

- Dokumentation, Schlussteil der Arbeit

Was läuft gut?

- Ich bin gut vorangekommen, die fünf Tage Urlaub haben etwas Puffer aufgefressen, aber ich bin dennoch nicht im Stress und werde rechtzeitig fertig.

Was läuft nicht gut?

- Hatte viele Schreibblockaden diese Woche

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen

Bis Mittwoch, 04.11.26 will ich die Dokumentation fertig haben, so dass ich sie Stefan zuschicken kann für die Freigabe zur Abgabe seitens der VentoStream AG. Sobald alles fertig ist werde ich bereits die Präsentation erstellen.

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

Projekt: Diplomarbeit – Optimierung Leitschaufelkranz (LSK) Statusbericht: KW 45

Projektleiter	Projektziele	Verteiler
Julian Blum (Diplomand)	Konstruktive Optimierung des bestehenden LSK: Herstellkosten, Teilezahl und Gewicht senken, Serientauglichkeit erhöhen. Ergebnis: 3D-CAD-Konzept (SolidWorks)	Patrick Baumann (Diplomlehrer) Stefan Haberthür (Fachexperte)

Gesamtbeurteilung	Projektverlauf	Projektklima	Termine	Risiken	Ressourcen
	■ □ □	■ □ □	■ □ □	■ □ □	■ □ □
Tendenz	↗	↗	↗	→	→

Aktueller Projektstand

KW 45 · Berichtsperiode 02.11.–09.11.2026 · Berichtsdatum 09.11.2026 · 0 Tage bis Abgabe

Gesamtfortschritt bei 100%

Erledigt

- Dokumentation komplett fertig
- Freigabe von VentoStream erteilt worden
- Diplomarbeit eingereicht

In Arbeit

- Onlinepublikation, Präsentation

Was läuft gut?

- Bin gut vorangekommen im Schlussspurt und konnte die Arbeit rechtzeitig und ohne Stress abgeben.

Was läuft nicht gut?

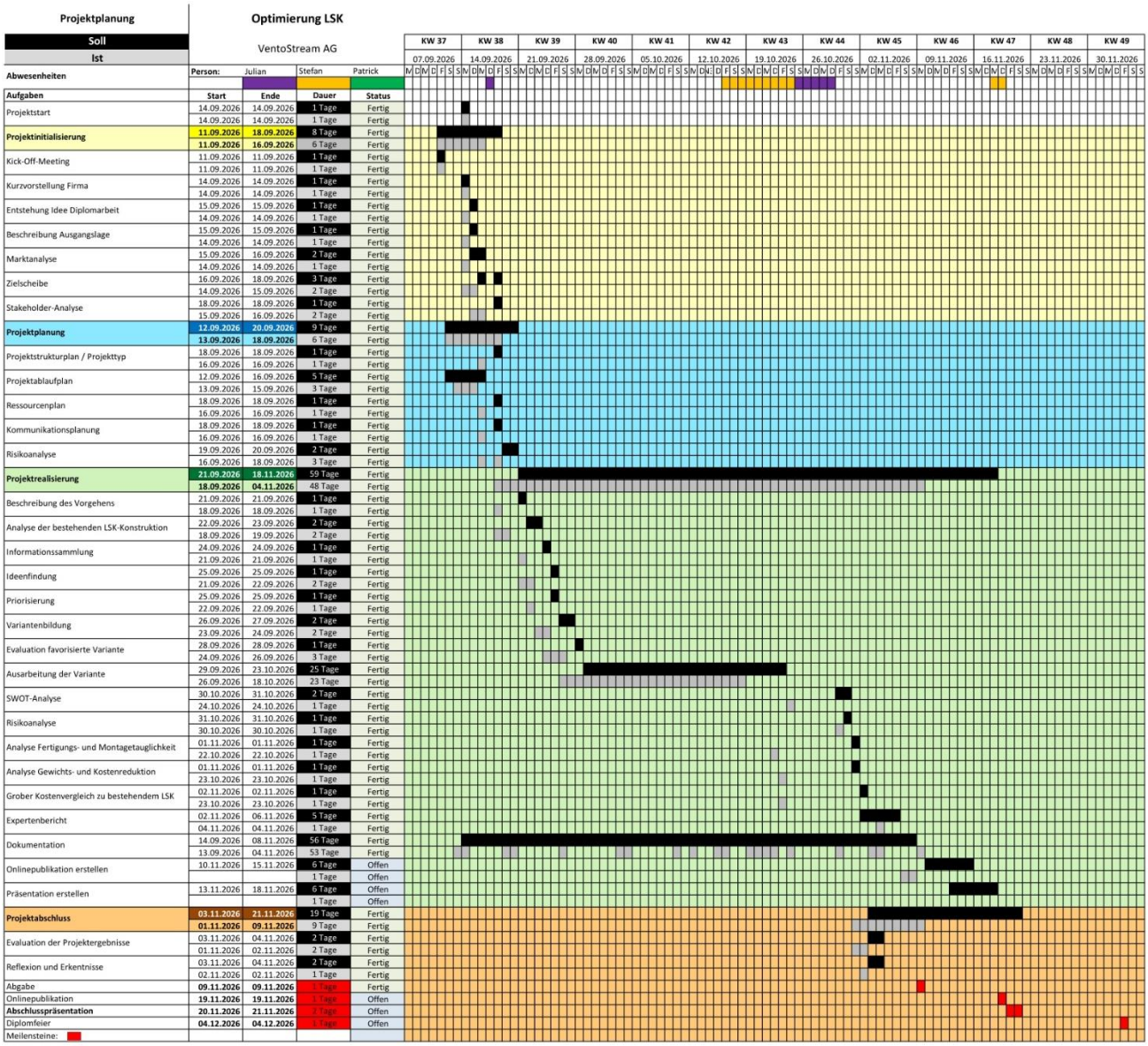
- Korrigieren und Schluss der Arbeit brauchten mehr Zeit als gedacht, zum Glück hatte ich aber genug Zeitpuffer aufgebaut.

Geplante nächste Schritte / getroffene Massnahmen

Aktuell bin ich noch am erstellen der Onlinepublikation, welche ich im Verlauf der Woche an Stefan schicken will, um sie zu prüfen und dann bereits zu veröffentlichen. An der Präsentation arbeite ich auch parallel dazu.

Projekt-Statusbericht; Stefan Thöni, Josef Räber

11.4 Projektablaufplan IST-Werte



Projektplanung	Optimierung LSK			
Soll	VentoStream AG			
Ist				
Abwesenheiten	Person:	Julian	Stefan	Patrick
Aufgaben	Start	Ende	Dauer	Status
Projektstart	14.09.2026	14.09.2026	1 Tage	Fertig
	14.09.2026	14.09.2026	1 Tage	Fertig
Projektinitialisierung	**11.09.2026**	**18.09.2026**	8 Tage	Fertig
	11.09.2026	**16.09.2026**	6 Tage	Fertig
Kick-Off-Meeting	11.09.2026	11.09.2026	1 Tage	Fertig
	11.09.2026	11.09.2026	1 Tage	Fertig
Kurzvorstellung Firma	14.09.2026	14.09.2026	1 Tage	Fertig
	14.09.2026	14.09.2026	1 Tage	Fertig
Entstehung Idee Diplomarbeit	15.09.2026	15.09.2026	1 Tage	Fertig
	14.09.2026	14.09.2026	1 Tage	Fertig
Beschreibung Ausgangslage	15.09.2026	15.09.2026	1 Tage	Fertig
	14.09.2026	14.09.2026	1 Tage	Fertig
Marktanalyse	15.09.2026	16.09.2026	2 Tage	Fertig
	14.09.2026	14.09.2026	1 Tage	Fertig
Zielscheibe	16.09.2026	18.09.2026	3 Tage	Fertig
	14.09.2026	15.09.2026	2 Tage	Fertig
Stakeholder-Analyse	18.09.2026	18.09.2026	1 Tage	Fertig
	15.09.2026	16.09.2026	2 Tage	Fertig
Projektplanung	**12.09.2026**	**20.09.2026**	9 Tage	Fertig
	13.09.2026	**18.09.2026**	6 Tage	Fertig
Projektstrukturplan / Projekttyp	18.09.2026	18.09.2026	1 Tage	Fertig
	16.09.2026	16.09.2026	1 Tage	Fertig
Projektablaufplan	12.09.2026	16.09.2026	5 Tage	Fertig
	13.09.2026	15.09.2026	3 Tage	Fertig
Ressourcenplan	18.09.2026	18.09.2026	1 Tage	Fertig
	16.09.2026	16.09.2026	1 Tage	Fertig
Kommunikationsplanung	18.09.2026	18.09.2026	1 Tage	Fertig
	16.09.2026	16.09.2026	1 Tage	Fertig
Risikoanalyse	19.09.2026	20.09.2026	2 Tage	Fertig
	16.09.2026	18.09.2026	3 Tage	Fertig
Projektrealisierung	**21.09.2026**	**18.11.2026**	59 Tage	Fertig
	18.09.2026	**04.11.2026**	48 Tage	Fertig
Beschreibung des Vorgehens	21.09.2026	21.09.2026	1 Tage	Fertig
	18.09.2026	18.09.2026	1 Tage	Fertig
Analyse der bestehenden LSK-Konstruktion	22.09.2026	23.09.2026	2 Tage	Fertig
	18.09.2026	19.09.2026	2 Tage	Fertig
Informationssammlung	24.09.2026	24.09.2026	1 Tage	Fertig
	21.09.2026	21.09.2026	1 Tage	Fertig
Ideenfindung	25.09.2026	25.09.2026	1 Tage	Fertig
	21.09.2026	22.09.2026	2 Tage	Fertig
Priorisierung	25.09.2026	25.09.2026	1 Tage	Fertig
	22.09.2026	22.09.2026	1 Tage	Fertig
Variantenbildung	26.09.2026	27.09.2026	2 Tage	Fertig
	23.09.2026	24.09.2026	2 Tage	Fertig
Evaluation favorisierte Variante	28.09.2026	28.09.2026	1 Tage	Fertig
	24.09.2026	26.09.2026	3 Tage	Fertig
Ausarbeitung der Variante	29.09.2026	23.10.2026	25 Tage	Fertig
	26.09.2026	18.10.2026	23 Tage	Fertig
SWOT-Analyse	30.10.2026	31.10.2026	2 Tage	Fertig
	24.10.2026	24.10.2026	1 Tage	Fertig
Risikoanalyse	31.10.2026	31.10.2026	1 Tage	Fertig
	30.10.2026	30.10.2026	1 Tage	Fertig
Analyse Fertigungs- und Montagetauglichkeit	01.11.2026	01.11.2026	1 Tage	Fertig
	22.10.2026	22.10.2026	1 Tage	Fertig
Analyse Gewichts- und Kostenreduktion	01.11.2026	01.11.2026	1 Tage	Fertig
	23.10.2026	23.10.2026	1 Tage	Fertig
Grober Kostenvergleich zu bestehendem LSK	02.11.2026	02.11.2026	1 Tage	Fertig
	23.10.2026	23.10.2026	1 Tage	Fertig
Expertenbericht	02.11.2026	06.11.2026	5 Tage	Fertig
	04.11.2026	04.11.2026	1 Tage	Fertig
Dokumentation	14.09.2026	08.11.2026	56 Tage	Fertig
	13.09.2026	04.11.2026	53 Tage	Fertig
Onlinepublikation erstellen	10.11.2026	15.11.2026	6 Tage	Offen
			1 Tage	Offen
Präsentation erstellen	13.11.2026	18.11.2026	6 Tage	Offen
			1 Tage	Offen
Projektabschluss	**03.11.2026**	**21.11.2026**	19 Tage	Fertig
	01.11.2026	**09.11.2026**	9 Tage	Fertig
Evaluation der Projektergebnisse	03.11.2026	04.11.2026	2 Tage	Fertig
	01.11.2026	02.11.2026	2 Tage	Fertig
Reflexion und Erkentnisse	03.11.2026	04.11.2026	2 Tage	Fertig
	02.11.2026	02.11.2026	1 Tage	Fertig
Abgabe	**09.11.2026**	**09.11.2026**	1 Tage	Fertig
Onlinepublikation	**19.11.2026**	**19.11.2026**	1 Tage	Offen
Abschlusspräsentation	**20.11.2026**	**21.11.2026**	2 Tage	Offen
Diplomfeier	**04.12.2026**	**04.12.2026**	1 Tage	Offen
Meilensteine:				

11.5 Präferenzmatrix

Präferenzmatrix

Die mit dieser Farbe hinterlegten Zellen werden automatisch berechnet

als / wichtiger	Anzahl Komponenten Total	Anzahl Kaufteile	Anzahl Fertigungsteile	Konstruktive Komplexität	Anzahl Antriebe	Herstellkosten Baugruppe	Fertigungskosten	Kaufteilkosten	Gewicht	Montageaufwand	Stellzeit	Antriebskraft	Bauraum	Wartungstauglichkeit	Wartungsintervall	Summe	%
Anzahl Komponenten Total		1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	9	9%
Anzahl Kaufteile	0		1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	2%
Anzahl Fertigungsteile	0	0		1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	2%
Konstruktive Komplexität	0	1	0		0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	2%
Anzahl Antriebe	0	1	1	1		0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	8	8%
Herstellkosten Baugruppe	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	0	1	1	13	12%
Fertigungskosten	0	1	1	1	0	0		0	0	0	0	1	0	1	1	6	6%
Kaufteilkosten	1	1	1	1	0	0	1		0	0	0	1	0	1	1	8	8%
Gewicht	1	1	1	1	1	0	1	1		1	1	1	0	1	1	12	11%
Montageaufwand	1	1	1	1	1	0	1	1	0		1	1	0	0	0	9	9%
Stellzeit	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0		1	0	1	1	8	8%
Antriebskraft	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0%
Bauraum	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	14	13%
Wartungstauglichkeit	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0		1	7	7%
Wartungsintervall	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0		5	5%
															Prüfsumme		100%

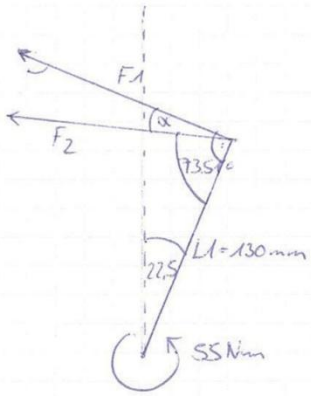
Bewertung 1 bedeutet im Beispiel Kriterium 1 ist wichtiger als Kriterium 2

11.6 Handrechnungen

Betreff: Datum:

Schaufelstellung 0°

1. Kraft Anlenkhebel

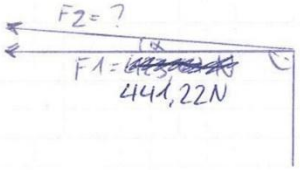


$\alpha = 90° - 73,51° = 16,49°$

$F_1 = \frac{55Nm}{0,13m} = 423,07N$

$F_2 = \frac{423,07N}{\cos(16,49°)} = 441,22N$

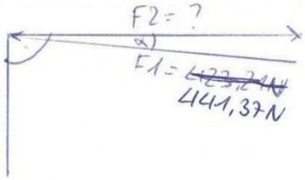
2. Kraft Anlenkhebel - Koppelstange



$\alpha = 1,49°$

$F_2 = \frac{441,22N}{\cos(1,49°)} = 441,37N$

3. Kraft Koppelstange - Konsole



$\alpha = 5,61°$

$F_2 = 441,37N \cdot \cos(5,61°) = 439,25N$

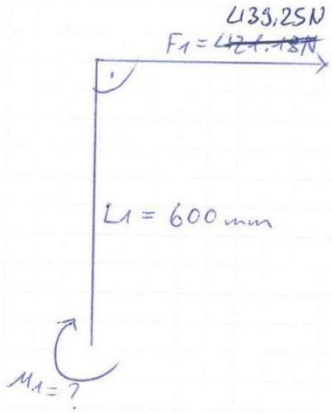
bechtle plm

bechtle-plm.ch

Betreff:

Datum:

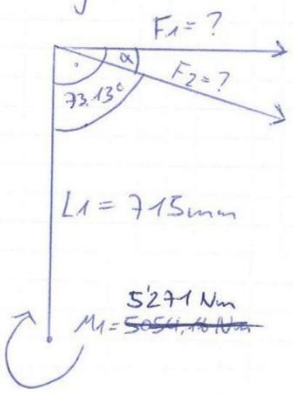
4. Drehmoment Ring



$M_1 = 439{,}25\,N \cdot 0{,}6\,m = 263{,}55\,Nm$

$M_{Total} = 20 \times 263{,}55\,Nm = 5'271\,Nm$

5. benötigte Antriebskraft



$\alpha = 90° - 73{,}13° = 16{,}87°$

$F_1 = \frac{5'271\,Nm}{0{,}715\,m} = 7'372{,}03\,N$

$F_2 = \frac{7372{,}03\,N}{\cos(16{,}87°)} = 7703{,}55\,N$

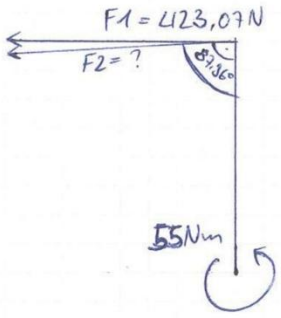
bechtle plm

bechtle-plm.ch

Betreff: Datum:

Schaufelstellung 22,5°

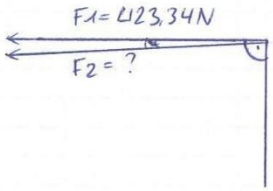
1. Kraft Anlenkhebel



$\alpha = 90° - 87,96° = 2,040$

$F2 = \frac{423,07N}{\cos(2,040)} = 423,34N$

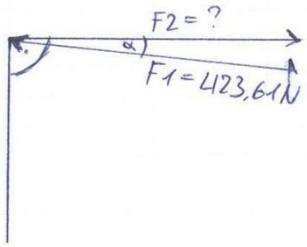
2. Kraft Anlenkhebel-Koppelstange



$\alpha = 2,040$

$F2 = \frac{423,34N}{\cos(2,040)} = 423,61N$

3. Kraft Koppelstange - Konsole



$\alpha = 6,93°$

$F2 = 423,61N \cdot \cos(6,93°) =$

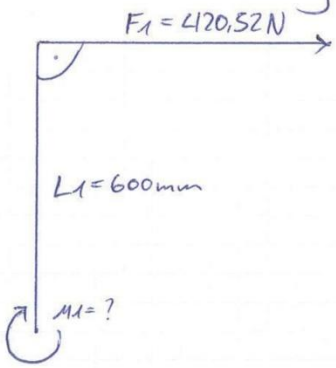
$420,52\,N$

bechtle plm

bechtle-plm.ch

Betreff: Datum:

4. Drehmoment Ring



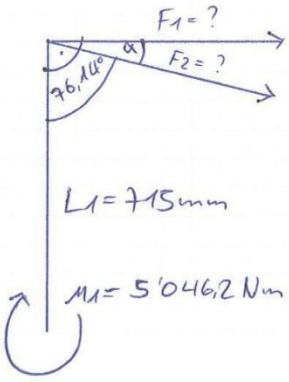
$M_1 = 420{,}52\,N \cdot 0{,}6\,m =$

$252{,}31\,Nm$

$M_{Total} = 20 \times 252{,}31\,Nm =$

$5'046{,}2\,Nm$

5. benötigte Antriebskraft



$\alpha = 90° - 76{,}14° = 13{,}86°$

$F_1 = \frac{5'046{,}2\,Nm}{0{,}715\,m} = 7'057{,}62\,N$

$F_2 = \frac{7'057{,}62\,N}{\cos(13{,}86°)} = 7'269{,}27\,N$

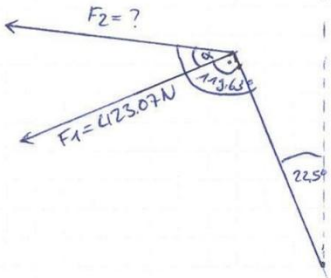
bechtle plm

bechtle-plm.ch

Betreff: Datum:

Schaufelstellung 45°

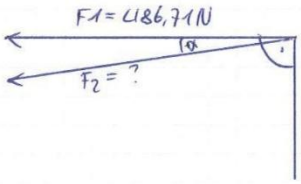
1. Kraft Anlenkhebel



$\alpha = 119{,}63° - 90° = 29{,}63°$

$F_2 = \frac{423{,}07\,N}{\cos(29{,}63°)} = \underline{486{,}71\,N}$

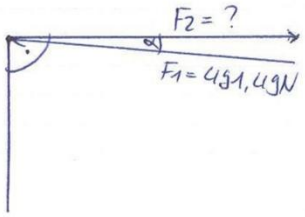
2. Kraft Anlenkhebel – Koppelstange



$\alpha = 8°$

$F_2 = \frac{486{,}71\,N}{\cos(8°)} = \underline{491{,}49\,N}$

3. Kraft Koppelstange – Konsole



$\alpha = 5{,}61°$

$F_2 = 491{,}49\,N \cdot \cos(5{,}61°) =$

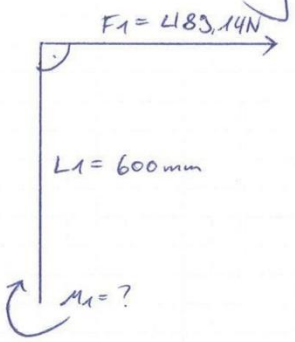
$\underline{489{,}14\,N}$

bechtle plm

bechtle-plm.ch

Betreff: Datum:

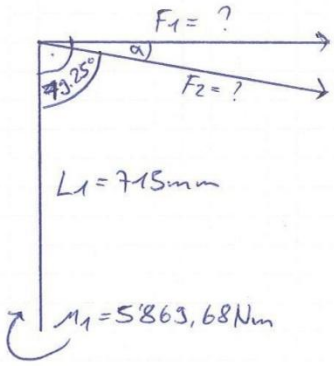
4. Drehmoment Ring



$M_1 = 489{,}14\,N \cdot 0{,}6\,m = 293{,}48\,Nm$

$M_{Total} = 20 \times 293{,}48\,Nm = 5'869{,}68\,Nm$

5. benötigte Antriebskraft



$\alpha = 90° - 79{,}25° = 10{,}75°$

$F_1 = \frac{5'869{,}68\,Nm}{0{,}715\,m} = 8'209{,}34\,N$

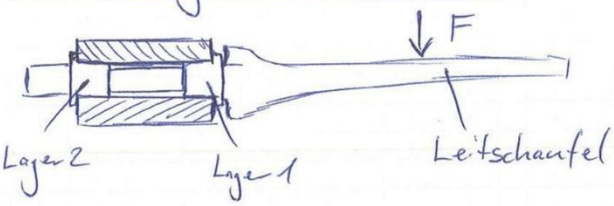
$F_2 = \frac{8'209{,}34\,N}{\cos(10{,}75°)} = 8'355{,}98\,N$

bechtle plm

bechtle-plm.ch

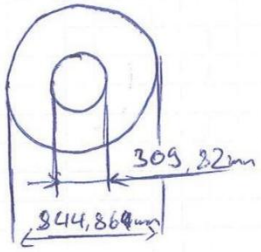
Betreff: Datum:

Gleitlagerbuchsen



- Kraft F auf Leitschaufel bei 400 km/h Wind

Ringfläche 20 Schaufeln



Lager Abstand aussen: 113 mm
Lagerhöhe: 71,5mm
Länge Leitschaufel-Lager 2 aussen: 410,44mm
Dichte Luft 15°: 1,225 kg/m³
Wiederstandsbeiwert Ringfläche $c_w = 2{,}0$

- Windgeschwindigkeit

$$v = \frac{400\,km/h}{3.6} = 111{,}1\,m/s$$

- Standdruck

$$q = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = \frac{1{,}225\,kg/m^3}{2} \cdot (111{,}1\,m/s)^2 = 7560{,}2\,Pa$$

- Ringfläche

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (0{,}844\,m^2 - 0{,}309\,m^2) = 0{,}4845\,m^2$$

- Windkraft

$$F = q \cdot A \cdot c_w = 7560{,}2\,Pa \cdot 0{,}4845\,m^2 \cdot 2{,}0 = 7325{,}83\,N$$

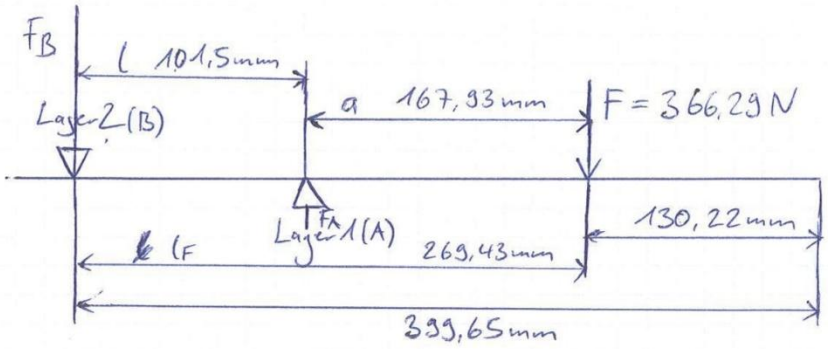
Pro Schaufel: $\frac{7325{,}83\,N}{20} = 366{,}29\,N$

bechtle plm

bechtle-plm.ch

Betreff: Datum:

Biegeträger Stützkräfte



$$F_A = F\left(1+\frac{a}{l}\right) = 366{,}29N \cdot \left(1+\frac{167{,}93mm}{101{,}5mm}\right) = \cancel{594{,}59N} \; 972{,}31N$$

$$F_B = F\cdot\left(\frac{a}{l}\right) = 366{,}29N \cdot \left(\frac{167{,}93mm}{101{,}5mm}\right) = \cancel{228{,}3N} \; 606{,}02N$$

~~Kontrolle: $F = -F_B + F_A = -228{,}3N + 594{,}59N = 366{,}29N$~~

Kontrolle mit Momentensatz:

$$-F\cdot l_F = -F_B\cdot 0 + F_A\cdot l$$

$$-F = \frac{-F_B\cdot 0 + F_A\cdot l}{l_F} = \frac{-606{,}02N\cdot 0 + 972{,}31N\cdot 101{,}5mm}{-269{,}43mm} =$$

$$-366{,}29N$$

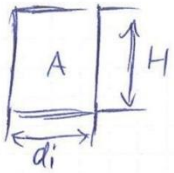
bechtle plm

bechtle-plm.ch

Betreff: Datum:

Flächenpressung in Gleitlagern

Projezierte Fläche A: $d_i \cdot H = 25\,mm \cdot 21{,}5\,mm = 537{,}5\,mm^2$



Kraft F Lager 1: 972,51N

Flächenpressung $p = \frac{F}{A} = \frac{972{,}51\,N}{537{,}5\,mm^2} = 1{,}81\,N/mm^2 = 1{,}81\,MPa$

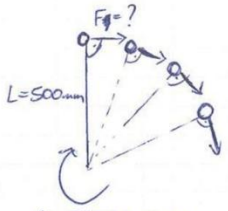
Zulässige Flächenpressung GFM-2528-21 Iglidur G = 80 MPa

Sicherheit $S = \frac{p_{zul}}{p} = \frac{80\,MPa}{1{,}81\,MPa} = 44{,}2$

bechtle plm
bechtle-plm.ch

Betreff: Datum:

1. Kraft auf Stangen aus Drehmoment



$$F_B = \frac{5'869{,}68\,Nm}{0{,}5\,m} = 586{,}97\,N$$

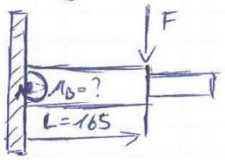
$$\frac{}{20}$$

o = 20Stk.

↓

Aus Berechnung Antriebskraft 45° Stellung

2. Biegemoment Stange



~~M_B F L = 0,165m~~

$M_B = F \cdot L = 586{,}97N \cdot 0{,}165m = 96{,}85\,Nm$

3. Statische Festigkeit



Querschnitt Einspannstelle

Ø=8,5mm (Kernloch M10)

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(30mm)^4 - (8{,}5mm)^4}{30mm} = 2633{,}64\,mm^3$$

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W} = \frac{36'850{,}1\,Nmm}{2633{,}64\,mm^3} = 36{,}77\,N/mm^2$$

Dehngrenze Alu-6082-T6: $R_{p0,2} = 260\,N/mm^2$ → kloeckner.de

Sicherheit $S = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_B} = \frac{260\,N/mm^2}{36{,}77\,N/mm^2} = 7{,}07$

bechtle plm

bechtle-plm.ch

Betreff:

Datum:

4. Dauerfestigkeit

Mittelspannung: $\sigma_m = \frac{\sigma_B}{2} = \frac{36,77 N/mm^2}{2} = 18,385 N/mm^2$

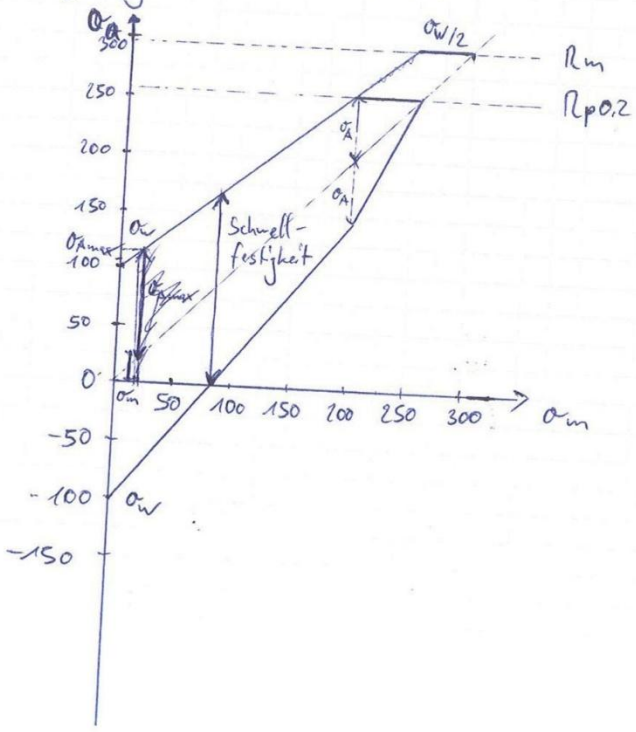
Oberspannung: $\sigma_o = \sigma_B = 36,77 N/mm^2$

Unterspannung: $\sigma_u = 0 N/mm^2$

Ausschlagsspannung: $\sigma_a = \frac{\sigma_B}{2} = \frac{36,77 N/mm^2}{2} = 18,385 N/mm^2$

Wechselfestigkeit $\sigma_{w6082T6}$ bei 10^7 Zyklen: 106-124 N/mm^2 modulusmetal.com

Zugfestigkeit: $R_m = 295 N/mm^2$



bechtle plm

bechtle-plm.ch

Betreff:

Datum:

~~Rechnerisch~~

Rechnerisch

b_1 = ca. 0,89 -> Diagramm

b_2 = ca. 0,89 -> Diagramm

β_K = ~~4,5~~ 2,2

$$\sigma_A = \sigma_W \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m}\right) = 106\,N/mm^2 \cdot \left(1 - \frac{18,385\,N/mm^2}{295\,N/mm^2}\right) = 99,4\,N/mm^2$$

$$S_D = \frac{\sigma_A \cdot b_1 \cdot b_2}{\beta_K \cdot \sigma_m} = \frac{99,4\,N/mm^2 \cdot 0,89 \cdot 0,89}{\frac{4,5}{2,2} \cdot 18,385\,N/mm^2} = 1,95$$

~~Sicherheit dynamisch~~

Sicherheit dynamisch: ~~2,25~~ 1,95

bechtle plm

bechtle-plm.ch

Betreff: Datum:

Sicherheit bei Iglubal Gelenkköpfen

F = 491,49 N → Aus 45° Stellung berechnung Antriebskraft

Fzul = 1'825 N → Aus Angabe Igus für max. Zugbelastung Langzeitig

$$S = \frac{F_{zul}}{F} = \frac{1'825\,N}{491.49\,N} = 3,71$$

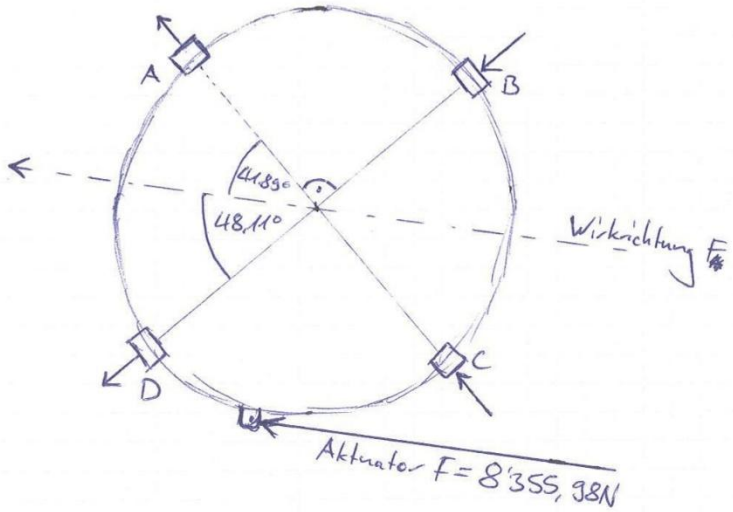
bechtle plm

bechtle-plm.ch

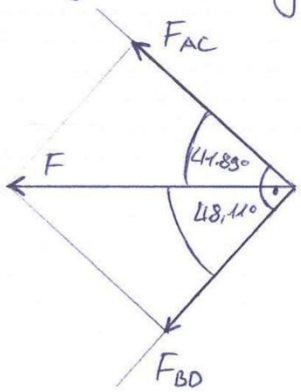
Betreff: GAGA HHAG

Datum:

Lagerkräfte 45 Grad Stellung



- Zerlegen auf Lager C_0 HCR25 = 34,4 kN



$F_{AC} = F \cdot \cos(41.89°) = 8'355,98N \cdot \cos(41,89°)$

$= \underline{6'220,43\,N}$

$F_{BD} = F \cdot \cos(48,11°) = 8'355,98N \cdot \cos(48,11°)$

$= \underline{5'579,31\,N}$

$F_A = F_C = \frac{F_{AC}}{2} = \underline{3'110,21\,N}$

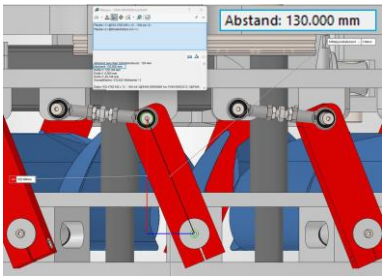
$F_B = F_D = \frac{F_{BD}}{2} = \underline{2'789,65N}$

Sicherheit: $S = \frac{C_0}{F} = \frac{34'400N}{3'110,21N} = \underline{11,06}$

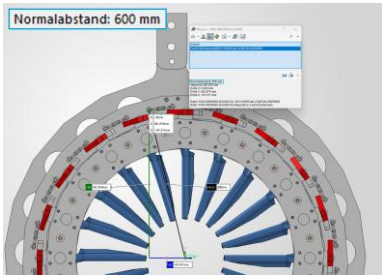
bechtle plm

bechtle-plm.ch

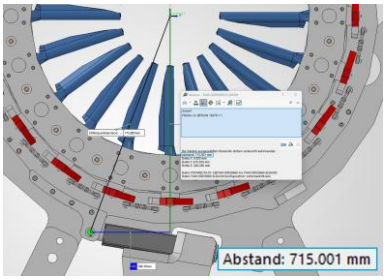
11.7 CAD-Messungen



Hebellänge Anlenkhebel: 130 mm

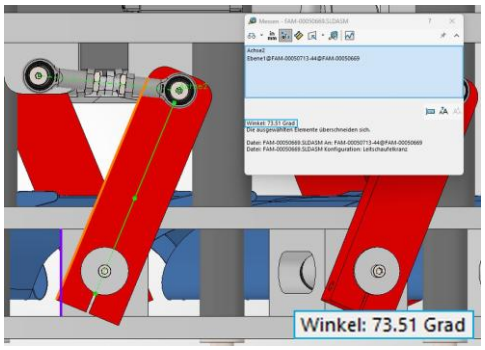


Radius Mitte LSK zu Anbindung Koppelstange an der Konsole: 600 mm

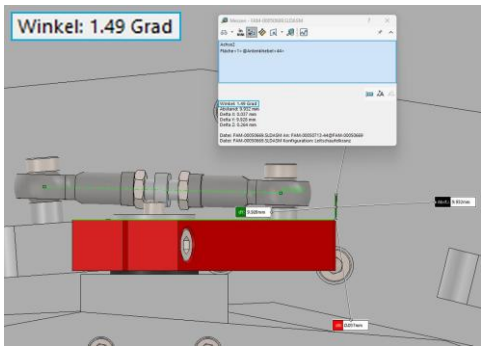


Radius Mitte LSK zu Anbindung Linearaktuator: 715 mm

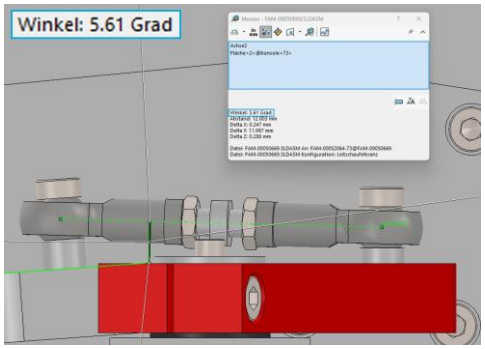
Schaufelstellung 0 Grad



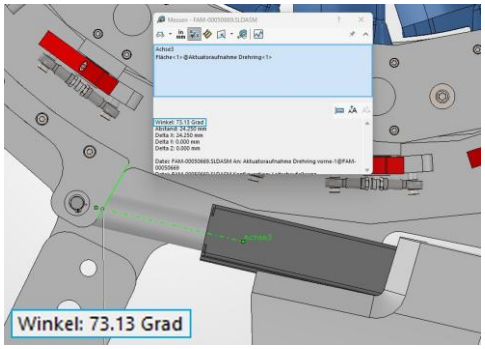
Winkel Mittelachse Anlenkhebel zu Koppelstange: 73,51°



Winkel Fläche Anlenkhebel zu Koppelstange: 1,49°



Winkel Koppelstange zu Konsole: 5,61°

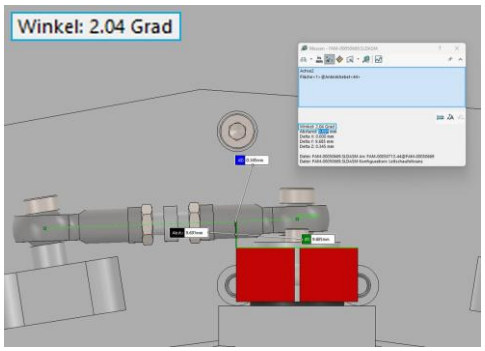


Winkel Linearaktuator zu Mittelachse Drehring: 73,13°

Schaufelstellung 22,5 Grad



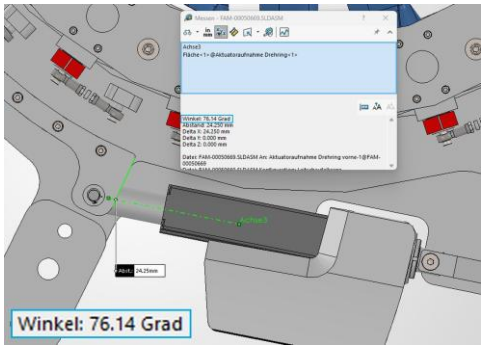
Winkel Mittelachse Anlenkhebel zu Koppelstange: 87,96°



Winkel Fläche Anlenkhebel zu Koppelstange: 2,04°

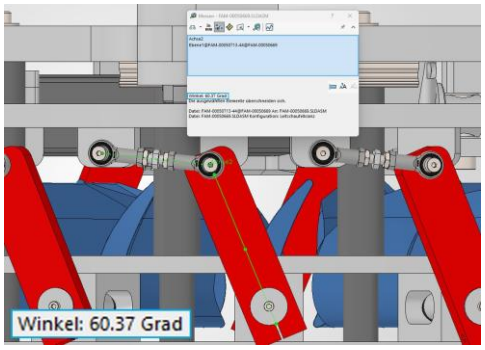


Winkel Koppelstange zu Konsole: 6,93°

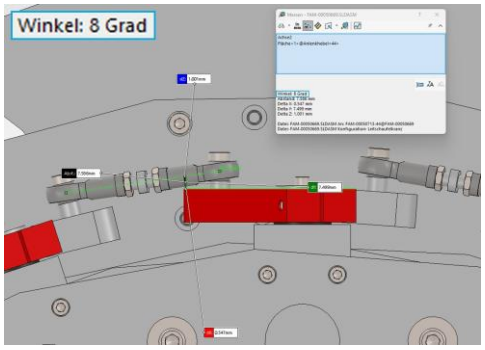


Winkel Linearaktuator zu Mittelachse Drehring: 76,14°

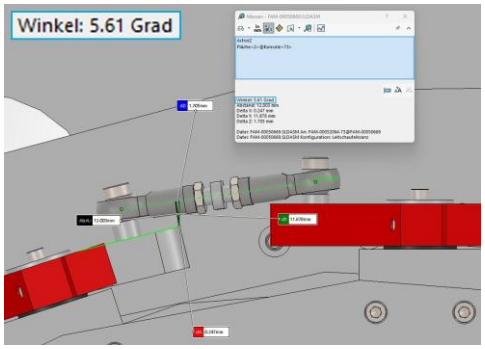
Schaufelstellung 45 Grad



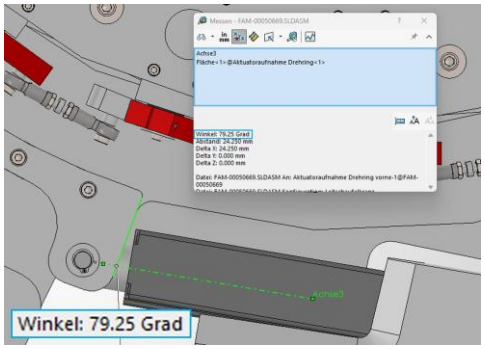
Winkel Mittelachse Anlenkhebel zu Koppelstange: 60,37° (entspricht 119,63°)



Winkel Fläche Anlenkhebel zu Koppelstange: 8°

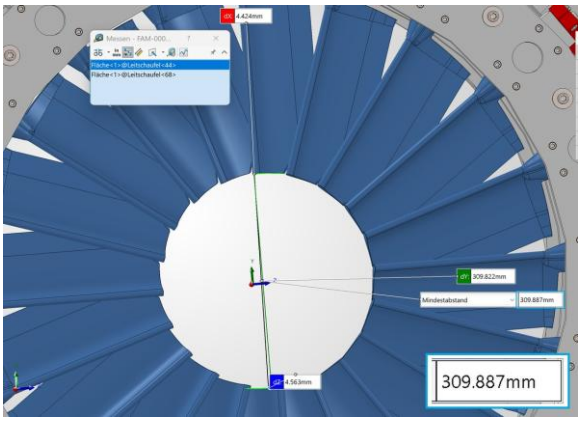


Winkel Koppelstange zu Konsole: 5,61°

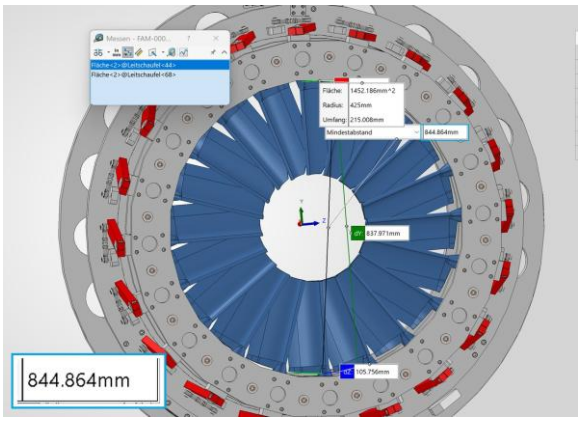


Winkel Linearaktuator zu Mittelachse Drehring: 79,25°

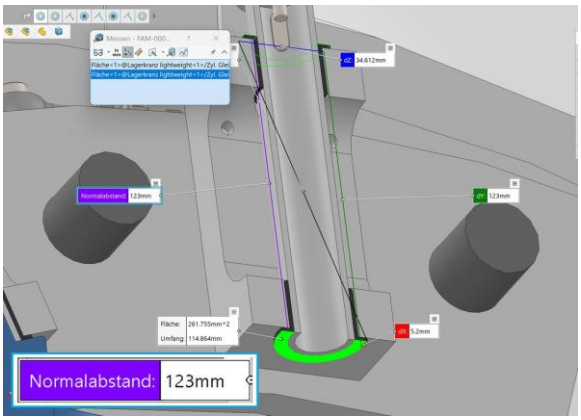
Gleitlager



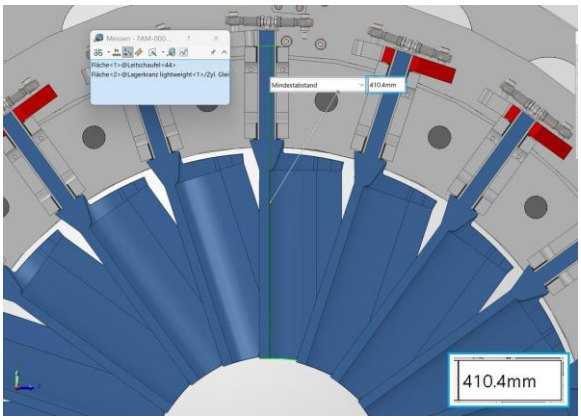
Mindestabstand Innenflächen gegenüberliegender Leitschaufeln: 309,887 mm (Innendurchmesser, gerechnet mit 309 mm)



Mindestabstand Aussenflächen gegenüberliegender Leitschaufeln: 844,864 mm (Aussendurchmesser, gerechnet mit 844 mm)

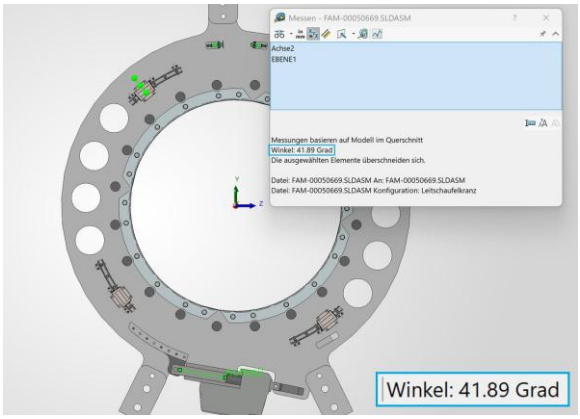


Abstand Aussenflächen der beiden Gleitlagerbuchsen: 123 mm (Mitte zu Mitte: 123 − 21,5 = 101,5 mm)

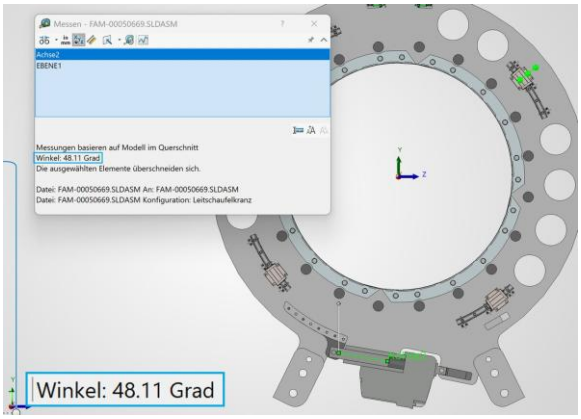


Abstand Aussenfläche Buchse Lager 2 bis Schaufelende: 410,4 mm (ab Lagermitte: 399,65 mm)

Lagerung 45 Grad Stellung

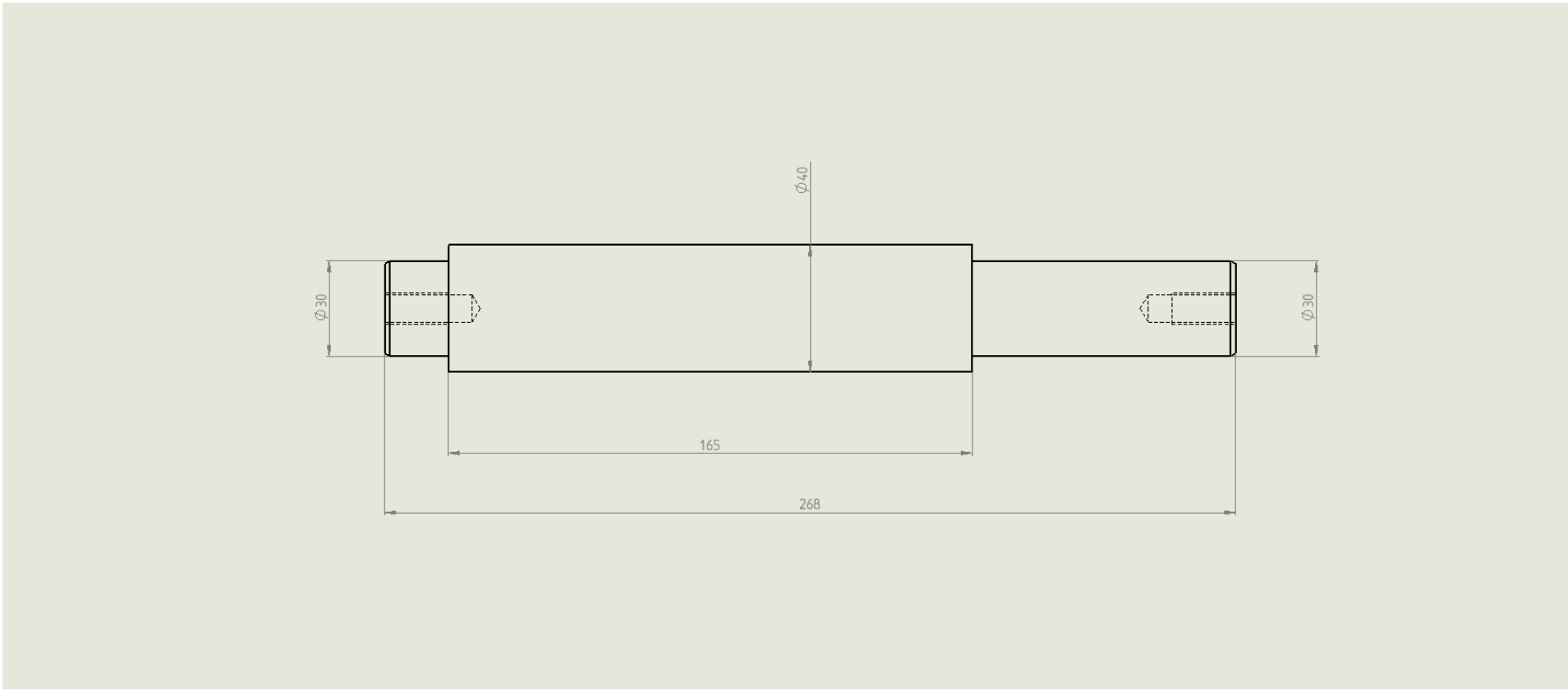


Winkel Aktuatorachse (Wirkrichtung F) zu Wagenlinie A–C, Wagen A grün markiert: 41,89°



Winkel Aktuatorachse (Wirkrichtung F) zu Wagenlinie B–D, Wagen B grün markiert: 48,11°

Distanzwelle



11.8 Berechnung Distanzwellen KI

Ausführliche Berechnung der Distanzwellen

Diplomarbeit – Konstruktive Optimierung Leitschaufelkranz | Ergänzende Berechnung, erstellt mit KI-Unterstützung (Claude, Anthropic)

1 Zweck und Abgrenzung

Diese Berechnung ergänzt die Handrechnung im Hauptteil. Dort wird die Distanzwelle konservativ als Kragträger und nur auf Biegung gerechnet. Hier wird die tatsächliche Einspannung an beiden Enden berücksichtigt: Das Wellenende am Lagerkranz wird parallel verschoben, ohne sich zu verdrehen. Zusätzlich nachgewiesen werden die Zugspannung aus der Schraubenvorspannung, die Windkraft, das Klaffen der Schraubverbindung, die Flächenpressung in den Passbohrungen und die Steifigkeit.

Alle Ausgangswerte entsprechen denjenigen der Handrechnung. Antriebsmoment und Windkraft wirken gleichzeitig. Nicht Teil dieser Berechnung sind das Eigengewicht, das Drallmoment aus der Strömungsumlenkung und der Störfall eines blockierten Aktuators.

2 Ausgangsgrössen und Annahmen

2.1 Ausgangsgrössen

Tabelle 1: Ausgangsgrössen der Berechnung

Grösse	Zeichen	Wert	Herkunft
Antriebsmoment in 45°-Stellung	MA	5869,68 Nm	Berechnung Antriebskraft
Anzahl Distanzwellen	n	20	CAD
Teilkreisradius der Wellen	R	500 mm	CAD
Freie Länge (Ø40-Teil)	L	165 mm	Zeichnung
Wellen- / Zapfendurchmesser	D / d	40 mm / 30 mm	Zeichnung
Kernlochdurchmesser M10 im Zapfen	dK	8,5 mm	Zeichnung
Zapfenlänge Grundplatte / Dicke Lagerplatte	tGP / tLP	20 mm / 15 mm	Zeichnung / CAD
Abstand Lagerplatten (Mitte–Mitte)	a	71 mm	CAD
Windgeschwindigkeit	v	400 km/h	Fachexperte
Luftdichte	ρ	1,225 kg/m³	Normatmosphäre
Widerstandsbeiwert	cw	2,0	Annahme (konservativ)
Schaufelring aussen / innen	Da / Di	844 mm / 309 mm	CAD
Konsolenradius / Hebelarm	RK / rH	596,5 mm / 151,5 mm	CAD
Montagevorspannkraft M10 A4-80	FM	27,8 kN	Tabellenwert, μG = 0,12

2.2 Werkstoffkennwerte EN AW-6082 T6

Tabelle 2: Werkstoffkennwerte und Faktoren (wie Handrechnung)

Grösse	Zeichen	Wert	Herkunft
Dehngrenze	Rp0,2	260 N/mm²	kloeckner.de
Zugfestigkeit	Rm	295 N/mm²	EN 755-2
Wechselfestigkeit (10^7 Zyklen)	σW	106 N/mm²	modulusmetal.com (106–124 N/mm²)
Elastizitätsmodul	E	70 000 N/mm²	Werkstoffdatenblatt
Oberflächen- / Grössenfaktor	b1 / b2	0,89 / 0,89	Diagramm Roloff/Matek
Kerbwirkungszahl Absatz Ø40/Ø30 (r = 0,4 mm)	βk	2,2	Roloff/Matek (r/d = 0,013)

14.10.2026 Julian Blum Seite 1

2.3 Annahmen

- Lagerkranz und Grundplatte sind starr. Alle 20 Wellen tragen gleich viel.
- Der Wind wirkt gleichmässig von vorne auf die geschlossene Schaufelfläche (ungünstigster Fall).
- Die Welle ist an beiden Enden eingespannt: an der Grundplatte über Bund, Passung und M10, am Lagerkranz über Bund und Passung durch beide Lagerplatten. Der Drehring ist mit den Wellen nicht verbunden.
- Der Zapfen Ø30 trägt das volle Biegemoment, die Klemmung der Bundfläche wird vernachlässigt. Am Absatz liegt die Gewindebohrung M10, gerechnet wird deshalb mit dem Ringquerschnitt Ø30/Ø8,5.
- Die Biegebelastung ist schwellend. Die Schraubenvorspannung wirkt als zusätzliche ruhende Mittelspannung.

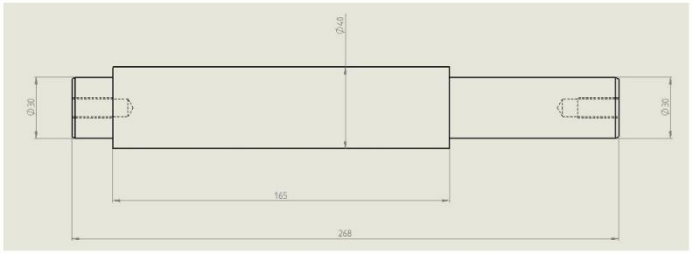


Abbildung 1: Geometrie der Distanzwelle (Ø40 × 165 mm, Zapfen Ø30 × 20 mm und Ø30 × 83 mm, Gewinde M10 beidseitig)

3 Äussere Lasten

3.1 Antriebsmoment

Das Antriebsmoment entspricht dem Moment, mit dem die Leitschaufeln über Anlenkhebel, Koppelstangen und Drehring gegen den Wind gehalten werden. Es stützt sich über die Distanzwellen an der Grundplatte ab. Gemäss Berechnung der Antriebskraft beträgt es in der massgebenden 45°-Stellung MA = 5869,68 Nm.

3.2 Windkraft von vorne

$$v = \frac{400\ \text{km/h}}{3{,}6} = 111{,}1\ \text{m/s}$$

$$q = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = \frac{1{,}225\ \text{kg/m}^3}{2} \cdot (111{,}1\ \text{m/s})^2 = 7562\ \text{Pa}$$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (D_a^2 - D_i^2) = \frac{\pi}{4} \cdot \left(0{,}844^2 - 0{,}309^2\right)\ \text{m}^2 = 0{,}4845\ \text{m}^2$$

$$F_W = q \cdot A \cdot c_w = 7562\ \text{Pa} \cdot 0{,}4845\ \text{m}^2 \cdot 2{,}0 = 7327\ \text{N}$$

4 Kräfte pro Welle

Das Antriebsmoment verdreht den Lagerkranz als Ganzes gegenüber der Grundplatte. Jede Welle wird dabei gleich weit tangential verschoben und trägt denselben Anteil. Die Windkraft wirkt auf die Schaufelblätter und wird über die Schaufellager in den Lagerkranz geleitet. Die Axialkräfte addieren sich und verteilen sich als Druckkraft gleichmässig auf alle Wellen.

$$F_t = \frac{M_A}{n \cdot R} = \frac{5869{,}68\ \text{Nm}}{20 \cdot 0{,}5\ \text{m}} = 586{,}97\ \text{N}$$

$$F_a = \frac{F_W}{n} = \frac{7327\ \text{N}}{20} = 366{,}4\ \text{N}$$

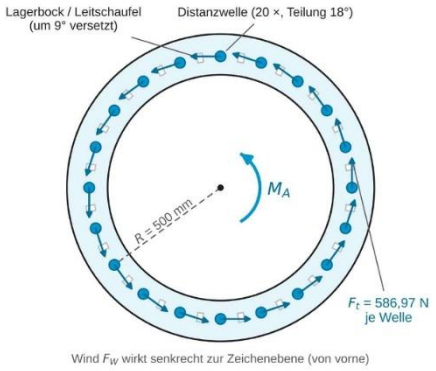


Abbildung 2: Draufsicht – Verteilung des Antriebsmoments auf die 20 Distanzwellen

5 Ersatzmodell und Biegemoment

Da sich der Lagerkranz als starrer Körper verdreht, wird das Wellenende am Lagerkranz parallel verschoben, ohne sich zu verdrehen. Die Biegelinie ist antimetrisch, der Wendepunkt liegt bei L/2. Jede Wellenhälfte wirkt damit als Kragträger der Länge L/2 mit der Kraft Ft am freien Ende. Das Biegemoment ist an beiden Enden gleich gross und halb so gross wie beim Kragträger der vollen Länge:

$$M_b = F_t \cdot \frac{L}{2} = 586{,}97\ \text{N} \cdot 82{,}5\ \text{mm} = 48{,}43\ \text{Nm}$$

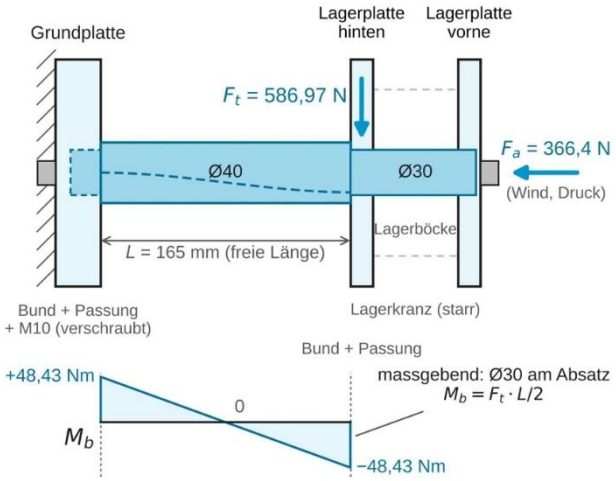


Abbildung 3: Ersatzmodell der Distanzwelle mit Biegelinie (gestrichelt, überhöht) und Momentenverlauf

6 Statischer Festigkeitsnachweis

Massgebend ist der Zapfen Ø30 am Absatz. Er hat dasselbe Moment wie der Ø40-Teil, aber einen kleineren Querschnitt, eine Kerbe und die Gewindebohrung M10 (Kernloch dK = 8,5 mm). Zusätzlich ist er durch die Schraubenvorspannung auf Zug belastet.

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d^4 - d_K^4}{d} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(30\ \text{mm})^4 - (8{,}5\ \text{mm})^4}{30\ \text{mm}} = 2633{,}64\ \text{mm}^3$$

$$A_Z = \frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - d_K^2) = \frac{\pi}{4} \cdot \left(30^2 - 8{,}5^2\right)\ \text{mm}^2 = 650{,}1\ \text{mm}^2$$

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} = \frac{48425\ \text{Nmm}}{2633{,}64\ \text{mm}^3} = 18{,}39\ \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_V = \frac{F_M}{A_Z} = \frac{27800\ \text{N}}{650{,}1\ \text{mm}^2} = 42{,}8\ \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{max} = \sigma_V + \sigma_b = 42{,}8\ \text{N/mm}^2 + 18{,}39\ \text{N/mm}^2 = 61{,}2\ \text{N/mm}^2$$

$$S_F = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{max}} = \frac{260\ \text{N/mm}^2}{61{,}2\ \text{N/mm}^2} = 4{,}25 \geq 1{,}5$$

Die Druckspannung aus dem Wind im Ø40-Teil und die Schubspannung aus der Querkraft sind vernachlässigbar:

$$\sigma_d = \frac{F_a}{A_{40}} = \frac{366{,}4\ \text{N}}{1256{,}6\ \text{mm}^2} = 0{,}3\ \text{N/mm}^2$$

$$\tau = \frac{4}{3} \cdot \frac{F_t}{A_Z} = \frac{4}{3} \cdot \frac{586{,}97\ \text{N}}{650{,}1\ \text{mm}^2} = 1{,}2\ \text{N/mm}^2$$

7 Dauerfestigkeit nach Smith

7.1 Spannungen im Zapfen

Bei schwellender Biegung schwankt die Biegespannung zwischen null und σb. Die Schraubenvorspannung σV wirkt dauernd und verschiebt die Mittelspannung:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_b}{2} = \frac{18{,}39\ \mathrm{N/mm^2}}{2} = 9{,}19\ \mathrm{N/mm^2}$$

$$\sigma_m = \sigma_V + \frac{\sigma_b}{2} = 42{,}8\ \mathrm{N/mm^2} + 9{,}19\ \mathrm{N/mm^2} = 52{,}0\ \mathrm{N/mm^2}$$

$$\sigma_o = \sigma_m + \sigma_a = 52{,}0\ \mathrm{N/mm^2} + 9{,}19\ \mathrm{N/mm^2} = 61{,}2\ \mathrm{N/mm^2}$$

$$\sigma_u = \sigma_m - \sigma_a = 52{,}0\ \mathrm{N/mm^2} - 9{,}19\ \mathrm{N/mm^2} = 42{,}8\ \mathrm{N/mm^2}$$

7.2 Dauerfestigkeitsschaubild

Das Schaubild wird wie in der Handrechnung konstruiert: Die Oberspannungslinie verläuft von σW bei σm = 0 zum Punkt (Rm; Rm) und wird durch Rp0,2 begrenzt. Für das Bauteil wird der Spannungsausschlag mit b1 · b2 / βk abgemindert.

$$\sigma_A = \sigma_W \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m}\right) = 106\ \mathrm{N/mm^2} \cdot \left(1 - \frac{52{,}0}{295}\right) = 87{,}3\ \mathrm{N/mm^2}$$

$$\sigma_{GA} = \frac{\sigma_A \cdot b_1 \cdot b_2}{\beta_k} = \frac{87{,}3\ \mathrm{N/mm^2} \cdot 0{,}89 \cdot 0{,}89}{2{,}2} = 31{,}4\ \mathrm{N/mm^2}$$

$$S_D = \frac{\sigma_{GA}}{\sigma_a} = \frac{31{,}4\ \mathrm{N/mm^2}}{9{,}19\ \mathrm{N/mm^2}} = 3{,}4\ \geq\ 1{,}5$$

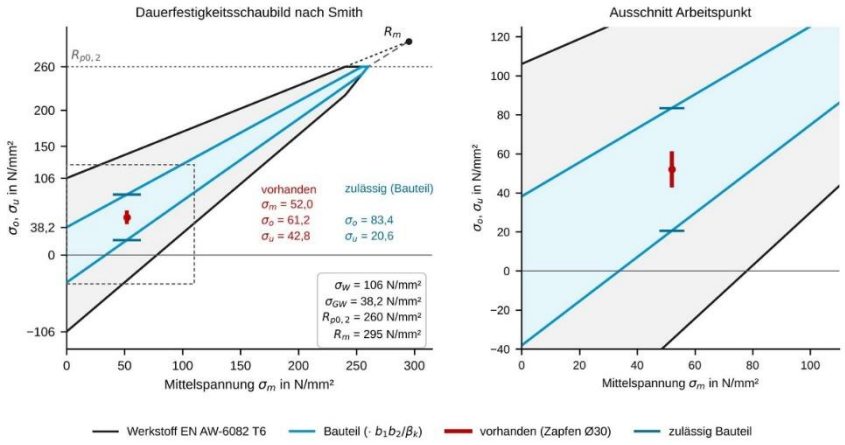


Abbildung 4: Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith für EN AW-6082 T6 mit Spannungszustand im Zapfen Ø30

Die vorhandene Oberspannung σo = 61,2 N/mm² liegt unter der zulässigen Oberspannung des Bauteils von 83,4 N/mm². Der Nachweis ist erfüllt.

8 Nachweis der Verbindungen

8.1 Klaffen der Bundfläche an der Grundplatte

Die Bundfläche (Kreisring Ø40/Ø30) darf unter dem Biegemoment nicht einseitig abheben. Angesetzt sind ein Anziehfaktor αA = 1,6 (Drehmomentschlüssel) und ein Setzverlust FZ ≈ 1 kN.

$$A_R = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (40^2 - 30^2)\ \text{mm}^2 = 549{,}8\ \text{mm}^2$$

$$W_R = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{32 \cdot D} = \frac{\pi \cdot (40^4 - 30^4)}{32 \cdot 40}\ \text{mm}^3 = 4295\ \text{mm}^3$$

$$F_{V,min} = \frac{F_M}{\alpha_A} - F_Z = \frac{27{,}8\ \text{kN}}{1{,}6} - 1{,}0\ \text{kN} = 16{,}38\ \text{kN}$$

$$M_{kl} = F_{V,min} \cdot \frac{W_R}{A_R} = 16380\ \text{N} \cdot 7{,}81\ \text{mm} = 127{,}9\ \text{Nm}$$

$$S_K = \frac{M_{kl}}{M_b} = \frac{127{,}9\ \text{Nm}}{48{,}43\ \text{Nm}} = 2{,}64\ \geq\ 1{,}0$$

Die Druckkraft aus dem Wind presst die Fuge zusätzlich zusammen. Sie wird nicht angerechnet.

8.2 Flächenpressung in den Passbohrungen

Die Querkraft wird über die Passungen formschlüssig übertragen. An der Lagerplatte hinten kommt die Kraft aus dem Einspannmoment hinzu, das sich über die beiden Lagerplatten abstützt:

$$p_{GP} = \frac{F_t}{d \cdot t_{GP}} = \frac{586{,}97\ \text{N}}{30\ \text{mm} \cdot 20\ \text{mm}} = 1{,}0\ \text{N/mm}^2$$

$$F_B = F_t + \frac{M_b}{a} = 586{,}97\ \text{N} + \frac{48425\ \text{Nmm}}{71\ \text{mm}} = 1269\ \text{N}$$

$$p_{LP} = \frac{F_B}{d \cdot t_{LP}} = \frac{1269\ \text{N}}{30\ \text{mm} \cdot 15\ \text{mm}} = 2{,}8\ \text{N/mm}^2$$

Beide Werte liegen weit unter der zulässigen Flächenpressung von Aluminium.

8.3 Gewinde

M10 im Aluminium mit einer Einschraubtiefe von mindestens 2 · d = 20 mm. Das ist gemäss Zeichnung erfüllt. Alternativ kann ein Gewindeeinsatz (Helicoil) verwendet werden.

9 Steifigkeit

Die Verformung der Wellen verdreht den Lagerkranz gegenüber dem Drehring und damit die Leitschaufeln. Der daraus entstehende Schaufelwinkelfehler ist vernachlässigbar:

$$I = \frac{\pi \cdot D^4}{64} = \frac{\pi \cdot (40\ \text{mm})^4}{64} = 125664\ \text{mm}^4$$

$$\delta = \frac{F_t \cdot L^3}{12 \cdot E \cdot I} = \frac{586{,}97\ \text{N} \cdot (165\ \text{mm})^3}{12 \cdot 70000\ \text{N/mm}^2 \cdot 125664\ \text{mm}^4} = 0{,}025\ \text{mm}$$

$$\Delta\varphi = \frac{\delta \cdot R_K}{R \cdot r_H} = \frac{0{,}025\ \text{mm} \cdot 596{,}5\ \text{mm}}{500\ \text{mm} \cdot 151{,}5\ \text{mm}} = 2{,}0 \cdot 10^{-4}\ \text{rad} = 0{,}011°$$

10 Ergebnis und Vergleich mit dem Hauptteil

Tabelle 3: Nachweise mit beidseitiger Einspannung (20 Wellen aus EN AW-6082 T6)

Nachweis	Anforderung	Vorhanden	Ergebnis
SF statisch	≥ 1,5	4,25	erfüllt
SD Dauerfestigkeit (Smith)	≥ 1,5	3,4	erfüllt
SK Klaffen (M10 A4-80)	≥ 1,0	2,64	erfüllt
Flächenpressung Passbohrungen	–	≤ 2,8 N/mm²	unkritisch
Schaufelwinkelfehler	–	0,011°	vernachlässigbar
Masse aller Wellen	–	15,0 kg (Ist 44,1 kg)	−29,1 kg

Tabelle 4: Vergleich der Rechenmodelle

Modell	Mb	σb	SF	SD	SK
Hauptteil: Kragträger, nur Biegung	96,85 Nm	36,77 N/mm²	7,07	1,95	–
Kragträger mit Vorspannung (Grenzfall)	96,85 Nm	36,77 N/mm²	3,27	1,65	1,32
Anhang: beidseitig eingespannt, mit Vorspannung	48,43 Nm	18,39 N/mm²	4,25	3,4	2,64

Die Schraubenvorspannung senkt die Sicherheiten gegenüber der Handrechnung, weil sie den Zapfen zusätzlich auf Zug belastet. Alle Werte bleiben über den Mindestwerten, auch im Grenzfall Kragträger. Gegenüber M10 A4-70 (FM = 20,8 kN) sinken SF und SD durch die höhere Vorspannung leicht (A4-70: SF = 5,2, SD = 3,6). Dafür steigt die Sicherheit gegen Klaffen deutlich: Mit A4-70 läge SK im Grenzfall Kragträger bei 0,97 und damit knapp unter 1,0, mit A4-80 bei 1,32.

Die Distanzwellen können aus EN AW-6082 T6 gefertigt werden. Mit der tatsächlichen Einspannung sind alle Nachweise mit Reserve erfüllt. Das Gewicht der 20 Wellen sinkt von 44,1 kg auf 15,0 kg (−29,1 kg).

10.1 Konstruktive Massnahmen

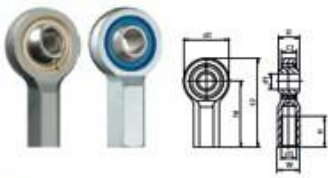
- Übergangsradius r = 0,4 mm am Absatz Ø40/Ø30 vorsehen (entsteht mit einer Standard-Wendeplatte mit Eckenradius 0,4). Die Bohrungen erhalten eine Fase 0,5 × 45°, damit der Bund trotzdem plan aufliegt. βk = 2,2 gilt nur mit diesem Radius; mit scharfer Kante (βk ≈ 2,8) sinkt SD in der Handrechnung auf 1,53 und im Grenzfall Kragträger mit Vorspannung auf 1,29.
- Schrauben M10 A4-80 statt A4-70 verwenden, wie in dieser Berechnung angenommen. So ist auch der Grenzfall Kragträger gegen Klaffen abgesichert. Bohrungen und Gewinde bleiben gleich, das Anziehmoment ist auf A4-80 anzupassen.
- Passung H7/g6 und Wellen eloxieren, damit Aluminium in Aluminium beim Fügen nicht frisst. Das Wellenmass auf den Zustand nach dem Eloxieren auslegen.
- Werkstoff in Zeichnung und Stückliste auf EN AW-6082 T6 ändern.

11.11 Diverses

Datenblatt Igubal

igubal® Gelenkköpfe | Lieferprogramm Neu

Gelenkkopf mit Innengewinde, metallisches Gehäuse mit wartungsfreiem Innenring: KCRM-ES/S



- Metallisches Gehäuse: damit deutlich höhere Bruchkraft als igumid® G
- Abriebfestigkeit gegen metallische Kugelkalotten um Faktor 10 besser als Polyamid
- Innenring aus FDA-konformen Materialien (iglidur® A181)

Material:
Gehäuse: Edelstahl, Zink-Druckguss
Innenring: iglidur® J ▶ Seite 163
iglidur® A181 ▶ Seite 401
Kalotte: Edelstahl

Bestellschlüssel

K C □ M-□- 06 -□-EK

Baureihe K	Gehäuse Innengewinde	Gewinde metrisch	Gehäusematerial	Innen-Ø [mm]	iglidur® Material	Kalottenmaterial

Optionen:
Gewinde
L : Linksgewinde
R : Rechtsgewinde

iglidur® Material
J : iglidur® J
A181 : iglidur® A181

Gehäusematerial
S : Zink-Druckguss
ES : Edelstahl

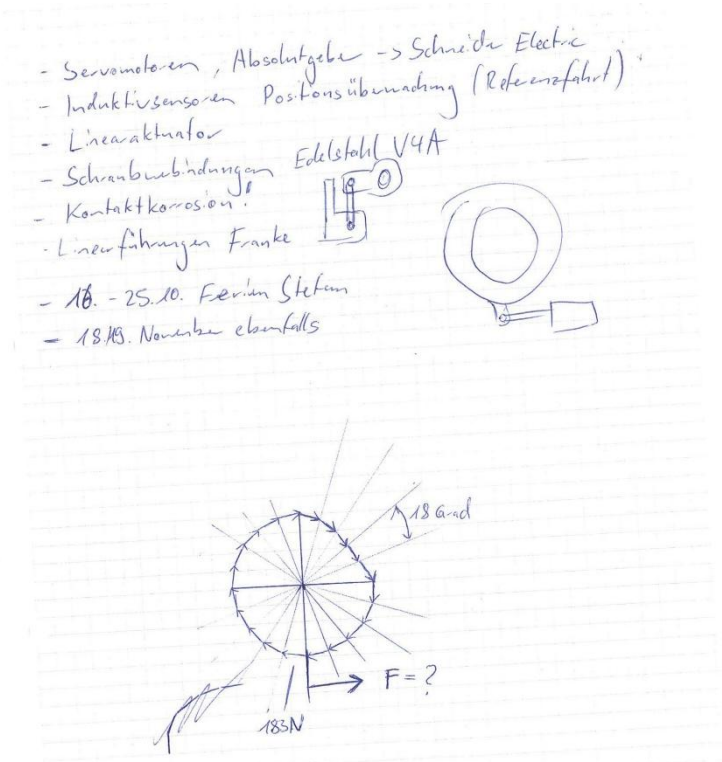
Kalottenmaterial
EK : Edelstahl

Technische Daten

Art.-Nr.		max. Zugbelastung kurzzeitig [N]	max. Zugbelastung langzeitig [N]	max. Querbelastung [N]	max. Axiale Belastung [N]	min. Einschraubtiefe Gewinde [mm]	Gewicht [g]
KC□M-□-06-□-EK	Neu	1.900	1.100	600	110	14	22,8
KC□M-□-08-□-EK	Neu	3.750	1.825	1.150	270	16	43,2
KC□M-□-10-□-EK	Neu	4.500	2.250	2.100	500	18	67,4
KC□M-□-12-□-EK	Neu	5.500	3.625	2.500	475	20	98,3
KC□M-□-16-□-EK	Neu	7.000	6.000	2.600	1.250	23	179,4
KC□M-□-20-□-EK	Neu	10.000	8.950	3.300	2.000	27	309,5
KC□M-□-20-M20-□-EK	Neu	10.000	8.950	3.300	2.000	27	309,5

Alle Werte beziehen sich auf KC□M-S-XX-J-EK

Notizen Kick-Off vor Ort



Preis THK Führungen Online-Shop

Grundlage für Preisannahme unter Kapitel 7.3.11

