



AUMUND Fördertechnik GmbH
Saalhofer Straße 17
47495 Rheinberg

**„Entwicklung eines energiesparenden Schubkettenbecherwerks zur umwelt-
freundlichen Vertikalgutförderung von Schüttgütern“**
„Efficient vertical transport“

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 37395/01-24/0 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Christian Kirschniok, AUMUND Fördertechnik GmbH

Rheinberg, den 04.12.2025

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis von Bildern und Tabellen	1
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen.....	2
Zusammenfassung	3
I. Einführung und Motivation.....	5
II. Methodisches Vorgehen, Arbeitspakete und Projektablauf	6
Arbeitspaket 1: Theoretische Auslegung der Einzelkomponenten.....	8
AP 1.1: Kettenstrang und Becher	8
AP 1.2: Gehäuse und Führung.....	8
AP 1.3: Umlenkung	8
AP 1.4: Antriebsstation und Kettenmontage.....	9
AP 1.5: Sensorik und Überwachung.....	9
Arbeitspaket 2: Auslegung des Gesamtsystems	9
AP 2.1: Zusammenführung des Gesamtsystems	9
AP 2.2: Aufbau einer Laboranlage	9
Arbeitspaket 3: Erprobung des Gesamtsystems.....	9
AP 3.1: Erprobung der Mechanik	9
AP 3.2: Iterative Revision der Einzelsysteme und des Gesamtsystems.....	10
Arbeitspaket 4: Erprobung des Gesamtsystems mit Fördermaterial.....	10
AP 4: Erprobung des Gesamtsystems mit Fördermaterial.....	10
III. Ergebnisse	11
Grobkonzeptphase	11
Auslegung des Konzeptes.....	11
Kettenstrang und Becher.....	13
Antriebsstation und Kettenmontage	15
Umlenkung	16
Gehäuse und Führung.....	18
Maßnahmen zum Schutz vor Verschmutzung.....	20
Arbeitspaket 2.2 – Aufbau einer Laboranlage	22
Arbeitspaket 3 – Erprobung des Gesamtsystems.....	23
Arbeitspaket 4 – Erprobung des Gesamtsystems mit Fördermaterial.....	27
IV. Fazit und Ausblick.....	29

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildung 1: Projektablaufplan mit Meilensteinen.....	7
Abbildung 2: Untersuchungsmodell	11
Abbildung 3: Beschleunigungskraft & Kettenschubkraft.....	12
Abbildung 4: Bolzenauslegung.....	
Abbildung 5: Modulbauweise Kettenglied	13
Abbildung 6: Kettenglied: Funktionskontakte	13
Abbildung 7: Exzentrische Position der Becherachse.....	14
Abbildung 8: Antriebskonzept	15
Abbildung 9: Kritische Stellung Kettenglied & Kranzteil	15
Abbildung 10: Montage Kettensegmente	16
Abbildung 11: Bereich der unteren Umlenkung.....	16
Abbildung 12: Konzept der unteren Umlenkung.....	17
Abbildung 13: Konzept obere Umlenkung.....	18
Abbildung 14: Synchronisierungskonzept Trommel + Becher.....	18
Abbildung 15: Führung der Kette	19
Abbildung 16: Gehäuse / Fuß	19
Abbildung 17: Gehäuse / Standartsegment	20
Abbildung 18: Gehäuse / Kopf	20
Abbildung 19: Schutz vor Verschmutzung durch Leitbleche/ Bürsten/ Nuten	21
Abbildung 20: Aufgebaute Laboranlage.....	22
Abbildung 21: Winkel zwischen den Antriebsringen vor und nach dem Umbau.....	23
Abbildung 22: Kettenführungskonzept	24
Abbildung 23: Umbau der Druckstütztrommel zu zwei unabhängigen Druckstützringen	25
Abbildung 24: Ansätze zur Reduktion der Belastung in der oberen Umlenkung.....	25
Abbildung 25: 3D-Modell des kontinuierlichen Materialumlaufs.....	28
Abbildung 26: SKBW Aufbau ohne Stahlbau	29
Abbildung 27: SKBW Aufbau mit Stahlbau	30

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

MKS	-	Mehrkörpersimulation
FEM	-	Finite-Elemente-Methode
SKBW	-	Schubkettenbecherwerk
DEM	-	Diskrete-Elemente-Methode
AP	-	Arbeitspaket
CAD	-	Computer-Aided-Design

Zusammenfassung

Das Projekt zur „Entwicklung eines energiesparenden Schubkettenbecherwerks zur umweltfreundlichen Vertikalgutförderung von Schüttgütern“ beinhaltet Aspekte der Verfahrens- und Prozessentwicklung. Die Projektlaufzeit erstreckt sich vom 18.10.2021 – 31.12.2024 und wird in Zusammenarbeit des IBAF Engineering’s der IAMT – Gruppe durchgeführt. Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung des ersten Schubkettenbecherwerks (SKBW), dabei sollen Aspekte, wie bspw. geringerer Platzbedarf, effizientere vertikale Schüttgutförderung etc., im Vergleich zu herkömmlichen Kettenbecherwerken, umgesetzt werden.

Die Schwerpunkte des Projekts war die Auslegung und Detaillierung, sowie Erzeugung von Berechnungen und Auswertungen. Im Projektzeitraum ist es gelungen, einen Becherwerkstyp mit einem neuen physikalischen Ansatz, der Schubkette, auszugestalten. Mithilfe von CAD-Software konnten Komponenten ausgelegt werden und weiterführend mit der Finite-Elemente-Methode und Mehrkörpersimulation auf verschiedene Lastfälle, Festigkeiten etc., getestet werden. Weitere Berechnungen durch zur Einsparung von Antriebsleistung wurden durchgeführt und Ergebnisse abgeleitet. Hierbei wurde unter anderem der Ort der Befüllung des Schubkettenbecherwerks als wichtiger Aspekt bei der Minderung der Antriebsleistung bewertet.

Basierend auf den ausgearbeiteten Konstruktionen und Entwicklungen soll ein Schubkettenbecherwerk auf dem Betriebsgelände von AUMUND gebaut und getestet werden. Die Ergebnisse der Tests werden ausgewertet und für weitere Entwicklungsschritte genutzt.

Das Testbecherwerk wurde so konzipiert, dass zu jeder Ebene ein freier Zugang über Zwischenbühnen vorgesehen wurde, damit jede einzelne Baugruppe während der Tests inspiziert und bei Bedarf einfach ausgetauscht werden könnte. Die Erprobung des Gesamtsystems erfolgte zunächst ohne Fördermaterial. Das Hauptaugenmerk wurde auf die korrekte Funktion der Kette, der Antriebe und Bewegungsablauf der Becher gelegt. Variiert wurde vor allen die Kettengeschwindigkeit, sowie die Einstellung der Kurvenscheibe, die den Zeitpunkt der Becherbewegung (Becherentleerung) vorgibt. Die minimale, maximale und optimale Geschwindigkeit wurden aus den Versuchen abgeleitet und mit den rechnerischen Annahmen abgeglichen. Die experimentellen Ergebnisse und die konstruktiven Optimierungsmaßnahmen wurden stets durch MKS und FEM Berechnungen begleitet.

Im Anschluss wurden die ersten Versuche mit Schuttgut durchgeführt. Dazu wurde eine spezielle Materialumlaufschurre entwickelt, gebaut und montiert, damit das Material im Kreis zirkulieren kann. Es wurden auch konstruktive Maßnahmen getroffen, das Umlaufmaterial nach einer bestimmten Testzeit auszuwechseln, damit auch Funktionstests mit Schüttgütern mit anderen fördertechnisch relevanten Eigenschaften durchgeführt werden können. Diese Versuche wurden durch Simulationen wie DEM (Diskrete Elemente Methode) sowie gekoppelte Simulationen DEM-FEM und DEM-MKS begleitet.

Die Idee vom Schubkettenbecherwerk als alternative, energieoptimierte Lösung für den vertikalen Transport von Schüttgütern inklusiv der Ergebnisse der Tests wird auf Messen und Symposien sowie seitens des technischen Vertriebs fortlaufen den potenziellen Kunden vorgestellt. Nachstehend eine Auswahl der bereits erfolgten Vorstellungen:

- 07.03.2025; Symposium Aufbereitungstechnik, Technische Universität, Bergakademie Freiberg, Präsentation
- 07-13.04.2025; BAUMA München, Vorstellung funktionsfähiges 3D-gedrucktes Model, Maßstab ca. 1/4, Präsentation
- 17-18.09.2025; Fachtagung Schüttgutfördertechnik, Otto von Guericke Universität Magdeburg, Präsentation und Veröffentlichung im Tagungsband.

I. Einführung und Motivation

AUMUND ist seit mehr als 90 Jahren im Bereich der Fördertechnik für Schüttgüter tätig und ist ein Experte in der Transporttechnologie. Das Unternehmen bietet Produkte mit hohem technischem Standard und Lösungen für eine Vielzahl von Anwendungen zur Förderung und Lagerung von Schüttgütern an.

Ein wichtiger Aspekt, zur Minderung der Klimaeffekte, ist die Entlastung der Umwelt durch Einsparung von Energie. Der Bereich der Senkrechtförderer ist geprägt von bewährten Technologien. Die eingesetzten Anlagen zeichnen sich häufig durch eine lange Lebensdauer und niedrige Betriebskosten aus, wodurch sich partielle Innovationen und allgemeine Entwicklungstendenzen, z. B. im Bereich der Antriebstechnologien, nur sehr langsam durchsetzen. Dies gilt insbesondere für Becherwerke – sowohl für Gurt- als auch für Kettenbecherwerke. Diese werden zwar stets, auf den jeweiligen Anwendungsfall spezifisch ausgelegt, und die Zugmittel unterliegen einer stetigen Entwicklung, das Förderprinzip ist jedoch seit Jahren unverändert.

AUMUND plant, eine völlig neue Konstruktionsweise für Kettenbecherwerke zu untersuchen, wodurch erstmalig das Prinzip der Schubkette im Anwendungsbereich der großvolumigen Vertikalförderung von schweren Schüttgütern eingesetzt wird. Die bedeutendsten Innovationsthemen sind dabei die Positionierung und Auslegung der Antriebstechnik am Fuße der Förderkette, das Design der Kette, die Kettenführung und die Bechersysteme sowie eine flexible, geschwindigkeitsunabhängige Entladung und Beladung. Dieser neue Anlagentypus soll, im Rahmen des hier vorgestellten Projekts, bis hin zum Technikums-Maßstab untersucht werden. Wichtig für eine Nachhaltigkeit der Entwicklung ist zudem eine Erprobung im praxisnahen Einsatz.

Durch das Projekt soll eine Energieeinsparung von rund 78 t CO₂ pro Jahr und Anlage (1.563 t CO₂ pro Lebenszeit einer Anlage) im Betrieb von Vertikalförderern erreicht werden. Das neue Konstruktionsprinzip geht zudem mit deutlich geringerem Materialaufwand in der Anlagentechnik einher, wodurch weitere 33 t CO₂, bei der Herstellung einer Anlage, eingespart werden können. Bei der sehr konservativen Annahme, dass pro Jahr zehn Anlagen in Betrieb gehen können, ergibt sich ein Einsparpotenzial von 1.116 t CO₂ pro Jahr.

II. Methodisches Vorgehen, Arbeitspakete und Projekttablauf

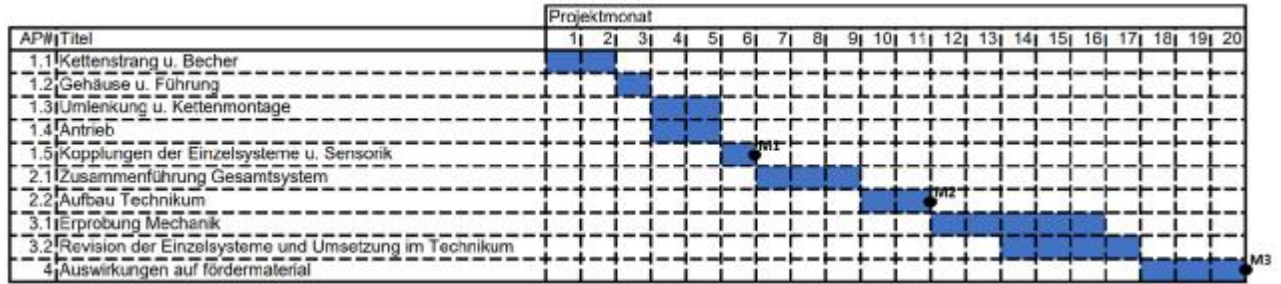
Zur Erreichung der oben genannten Zielstellung wurden folgende Arbeitspakete definiert:

- AP 1: Theoretische Auslegung der Einzelkomponenten
- AP 2: Auslegung des Gesamtsystems
- AP 3: Erprobung des Gesamtsystems
- AP 4: Erprobung des Gesamtsystems mit Fördermaterial

Der geplante zeitliche Ablauf des Projektes ist in Abbildung 1 dargestellt, die Projektmeilensteine sind als M1-M3 ausgewiesen. Die Meilensteine werden folgendermaßen eingeteilt:

- M1 (KW42, 2021 – KW32, 2022):
Der erste Meilenstein wird erreicht, wenn nach AP 1 die numerischen Simulationen erfolgreich durchgeführt wurden und auf dieser Basis das Systemkonzept und die Konstruktionszeichnungen der Einzelsysteme erfolgreich erstellt wurden.
- M2 (KW33, 2022 – KW44, 2022):
Meilenstein zwei stellt die erfolgreiche Umsetzung im Technikum dar.
- M3 (KW45, 2022 – KW16, 2023):
Die erfolgreiche experimentelle und digitale Validierung der Einzelsysteme und des Gesamtkonzepts im Technikum und die Ermittlung der Auswirkungen auf das zu fördernde Material stellen den Abschluss des Projekts und den dritten Meilenstein dar.

Die oben genannten, geplanten Termine, die im Zeitplan (Abbildung 1) chronologisch aufgestellt sind, konnten nicht eingehalten werden. Deshalb wurde die Laufzeit des Projektes bis Ende 2024 verlängert.



AP#	Titel	Projektmonat (11/2023 bis 12/2024)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1.1	Kettenstrang u. Becher	abgeschlossen													
1.2	Gehäuse und Führung	abgeschlossen													
1.3	Umlenkung u. Kettenmontage	abgeschlossen													
1.4	Antrieb	abgeschlossen													
1.5	Kopplung der Einzelsysteme u. Sensorik	abgeschlossen													
2.1	Zusammenführung Gesamtsystem	█	█												
2.2	Aufbau Technikum			█											
3.1	Erprobung Mechanik														
3.2	Revision der Einzelsysteme u. Umsetzung im Technikum														
4	Auswirkung auf Fördermaterial														

Abbildung 1: Projektablaufplan mit Meilensteinen

Arbeitspaket 1: Theoretische Auslegung der Einzelkomponenten

Ziel des AP1 ist es, eine Detailauslegung, Konzeptionierung und Planung der verschiedenen Einzelkomponenten zu erstellen. Dies dient als Grundlage der Entwicklung des Anlagenkonzeptes sowie der Vorbereitung des Aufbaus der Laboranlage. Die folgenden, einzelnen Entwicklungsbereiche wurden dabei nicht unabhängig voneinander betrachtet, so hängt z. B. das Austragsverhalten sowohl vom Becher als von Führung und Umlenkung ab. Als Teil dieser Entwicklungsarbeiten zu den verschiedenen Elementen des neuen, innovativen Systems und deren Interaktionen, werden Methoden der virtuellen Produktentwicklung und -berechnung angewendet. Auf Basis von CAD-Designs werden insbesondere numerische Simulationen wie MKS und FEM (Mehrkörpersimulation, Finite Elemente Methode) verwendet. Insbesondere in Bezug auf die Führung der Schubkette im Antriebsbereich sind bei großen Höhen Kräfte zu erwarten, die auf den Druckstab wirken. Die Führung und Versteifung des Druckstabs und die Vermeidung des unkontrollierten Ausknickens der Kette müssen durch Simulationen validiert werden. Dabei müssen die Bewegungswiderstände und der Verschleiß der Führung minimiert werden.

AP 1.1: Kettenstrang und Becher

Eine wichtige Herausforderung bei der Auslegung des Kettenstrangs und Becher ist es, die erforderliche Stabilität und Steifigkeit der Kette im aufsteigenden Strang, bei möglichst geringem Kettengewicht, zu erreichen. Auch die geschlossene Becherfolge ist hier eine der Entwicklungsherausforderungen.

AP 1.2: Gehäuse und Führung

Die Auslegung von Gehäuse, U-Rahmen, Abfangung und Kettenführung muss die Funktion des SKBW sicherstellen. Die Kettenführung wird dabei möglichst reibungsfrei ausgelegt und dient nicht der Aufnahme von Druckkräften, welche durch die Kette getragen werden. Alle Komponenten sollen dabei vor dem Hintergrund des Leichtbaus optimiert werden.

AP 1.3: Umlenkung

Der Auslegung der Umlenkstation fiel besondere Bedeutung zu, da hierdurch die Materialaufnahme und Abgabe ausgelegt wird. Die obere Umlenkung enthält daher auch den einstellbaren Abwurf mittels einer Kurvenscheibe.

AP 1.4: Antriebsstation und Kettenmontage

AP 1.4 beinhaltet alle Komponenten, die für den Antrieb und die Kraftübertragung erforderlich sind. Hierzu zählen die Antriebsstation, die Antriebswelle, die Antriebsräder, der Einlauf, der Motor, das Getriebe, die Kupplung und der Antriebsbock. Eine Herausforderung ist dabei, dass die beiden Kettenstränge in ihrem Lauf synchronisiert werden müssen. Diese Synchronisation kann entweder elektronisch oder per mechanischem Formschluss erfolgen – die ideale Option zu identifizieren ist Teil dieser Projektarbeiten. Auch eine Kettenmontagevorrichtung muss hier ausgelegt werden.

AP 1.5: Sensorik und Überwachung

Die Betriebsparameter sowohl Antriebsstation als auch Umlenkstation, Becherstrang und Gehäuse/ Führung müssen gemessen und überwacht werden. Dies betrifft Temperaturveränderungen, Positions-/Orientierungsüberwachung, Laufgeschwindigkeiten u.v.m.

Arbeitspaket 2: Auslegung des Gesamtsystems

Ziel des AP 2 ist es, durch die in AP 1 erlangten Erkenntnisse ein Gesamtsystem auszulegen sowie die Erstellung einer Laboranlage zur Durchführung der weiteren Entwicklung.

AP 2.1: Zusammenführung des Gesamtsystems

Das Gesamtsystem wird aus den Einzelsystemen zusammengeführt. Dies beinhaltet die Vorbereitung der Montage der Laboranlage, alle Maßnahmen zur Organisation des Einzelsystems und der Komponenten sowie deren Qualitätskontrolle.

AP 2.2: Aufbau einer Laboranlage

Anschließend wird die Laboranlage in AP 2.2 errichtet und in Betrieb genommen.

Arbeitspaket 3: Erprobung des Gesamtsystems

Ziel des AP 3 ist es, mithilfe von AP 2, der Laboranlage, zum einen diese weiter zu verbessern und zum anderen das Erlangen von Betriebsparametern und Daten zur Weiterentwicklung sowie Upscaling möglich zu machen.

AP 3.1: Erprobung der Mechanik

Anhand der Laboranlage wird die Mechanik des Systems untersucht und daraus mögliche Probleme identifiziert. Zu dieser Untersuchung gehören

- Die Variation der Betriebsparameter
- Die Analyse der Auswirkungen verschiedener Betriebsparameter
- Die Ableitung der maximalen und minimalen Betriebsparameter

AP 3.2: Iterative Revision der Einzelsysteme und des Gesamtsystems

Auf Basis der Ergebnisse aus AP 3.1 erfolgen die Anpassungen der konstruktiven Auslegung verschiedener Einzelsysteme und die Anpassung der Laboranlage. Die veränderten Systeme werden dann wieder nach AP 3.1 untersucht. Hierbei erfolgt auch detaillierte numerische Simulationen um die experimentellen Ergebnisse zu validieren. Es werden erneut MKS und FEM eingesetzt, allerdings mit höherem Detailgrad und unter Verwendung bisheriger Ergebnisse. Zur Einbeziehung des Schüttgutverhaltens werden auch DEM (Diskrete-Elemente-Methode) sowie sogenannte gekoppelte Simulationen, DEM-FEM oder DEM-MKS, eingesetzt. Für diese Durchführung werden spezialisierte Dienstleister eingebunden.

Arbeitspaket 4: Erprobung des Gesamtsystems mit Fördermaterial

Ziel des AP 4 ist es, die verbesserte Laboranlage aus AP 3 zu verwenden, um ausführliche Informationen über das Fördermaterial zu erlangen. Hierbei sind Aussagen zu den Fördereigenschaften sowie der Nachweis der Anwendbarkeit von Bedeutung.

AP 4: Erprobung des Gesamtsystems mit Fördermaterial

Sobald die Untersuchungen und Entwicklungen aus AP 3 eine ausreichend hohe Leistungsfähigkeit und Stabilität der Laboranlage erreicht haben, muss eine Erprobung unter Last erfolgen. Hierzu werden wiederholt Versuche mit verschiedenen Fördermaterialien unter verschiedenen Betriebsparametern durchgeführt. Dadurch wird das Förderverhalten für verschiedenen Materialien analysiert. Es ist von essentieller Bedeutung, dass auch sensiblere Materialien gefördert werden können. Insbesondere spielt der Erhalt von Korngeometrie eine wesentliche Rolle. Da AUMUND nicht über die Laborausrüstung für diese Materialienanalysen verfügt, wurde diese als Fremdleistung in Anspruch genommen.

III. Ergebnisse

Zum Erreichen des Ziels wurde durch einen iterativen Verlauf der Entwicklung nicht gesondert zwischen Arbeitspaket 1 und Arbeitspaket 2.1 unterschieden. Im Folgenden wird die Struktur der Entwicklung des SKBW's verdeutlicht.

Grobkonzeptphase

In dieser Phase wurde ein Untersuchungsmodell erarbeitet und mittels CAD-Software parametrisch aufgebaut.

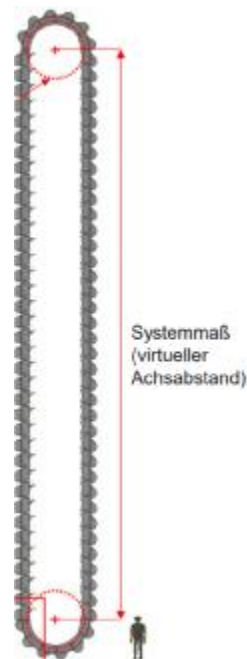


Abbildung 2: Untersuchungsmodell

Auf Basis dieses Untersuchungsmodells wurde eine Parameterstudie durchgeführt, bei der Parametervarianten vorgenommen wurden um die größten Einflussfaktoren und Förderleistung zu ermitteln.

Auslegung des Konzeptes

Es erfolgte eine analytische Betrachtung der Schnittkräfte und Identifizierung der auslegungsrelevanten - höchstbelasteten - Komponenten sowie zur Verifizierung des FE-Modells. Nach der Betrachtung der Reaktionskräfte an der unteren Umlenkung, erst im quasistatischen Zustand und anschließend mit Beschleunigungsanteil wurde eine Prüfung auf Umkippen durchgeführt. Basierend auf weiteren Berechnungen zu der erforderlichen Kettenschubkraft und Antriebsleistung beim Beschleunigungsvorgang im vollbeladenen Zustand ist eine Auslegung des Antriebsstrangs möglich.

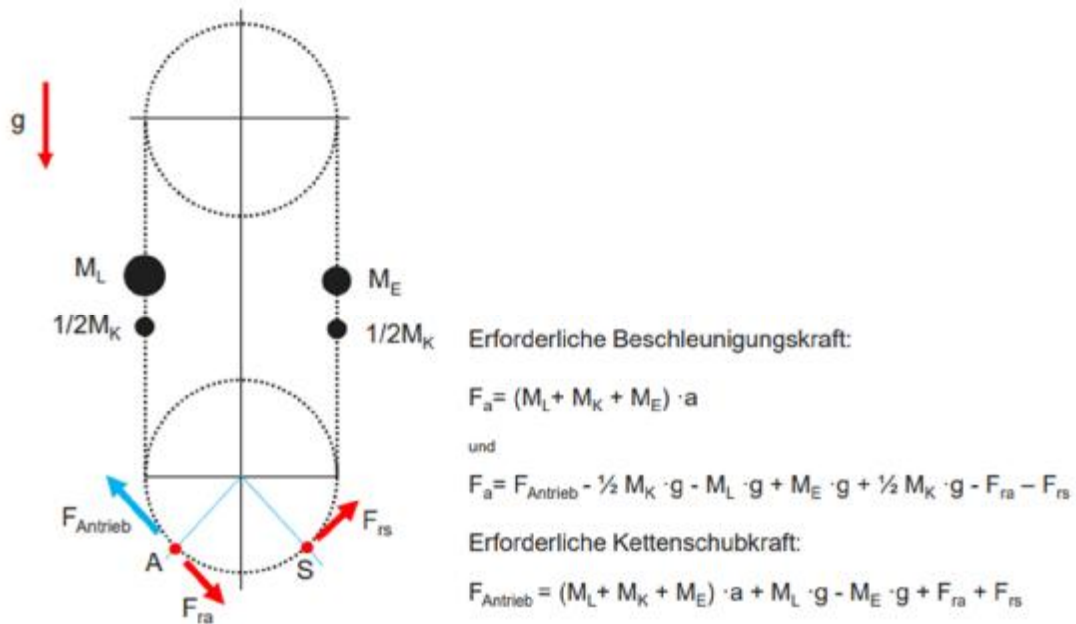


Abbildung 3: Beschleunigungskraft & Kettenschubkraft

Eine exemplarische Auslegung eines hochbelasteten Bolzens hinsichtlich maximaler Flächenpressung und weiterer Vordimensionierungen der Kettensegmente anhand der Parameterstudie ergab Ergebnisse zur Kettenteilung und dem Teilkreisdurchmesser. Es wurde eine größere Kettenteilung, anhand eines paramterischen Modells analysiert und im Folgenden eingesetzt. Darüber hinaus werden bei größerer Kettenteilung weniger Komponenten benötigt, Endanschläge, Verschraubungskomponenten, Bolzen, etc. entfallen.

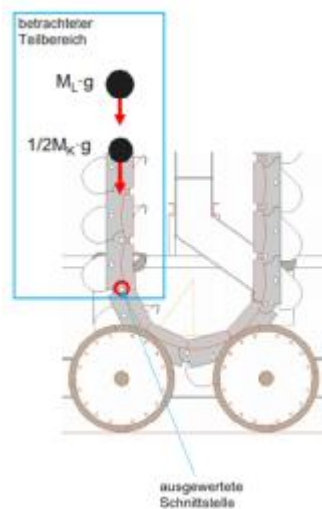


Abbildung 4: Bolzenauslegung

Kettenstrang und Becher

Das Kettenglied ist modular aufgebaut und zur Mittelebene symmetrisch (Abbildung 5). Das Mittelstück und die Kettenstege werden miteinander verstoffet und verschraubt. Die Symmetrie erlaubt eine Verwendung der Kettenglieder auf beiden Strangseiten, die Montage des Endanschlags und Becherbolzens ist erfolgt auf dem jeweils anderen Stegelement. Bei Verschleiß/ Beschädigung einzelner Bereiche des Kettengliedes kann somit nur die betroffene Komponente ausgetauscht werden.

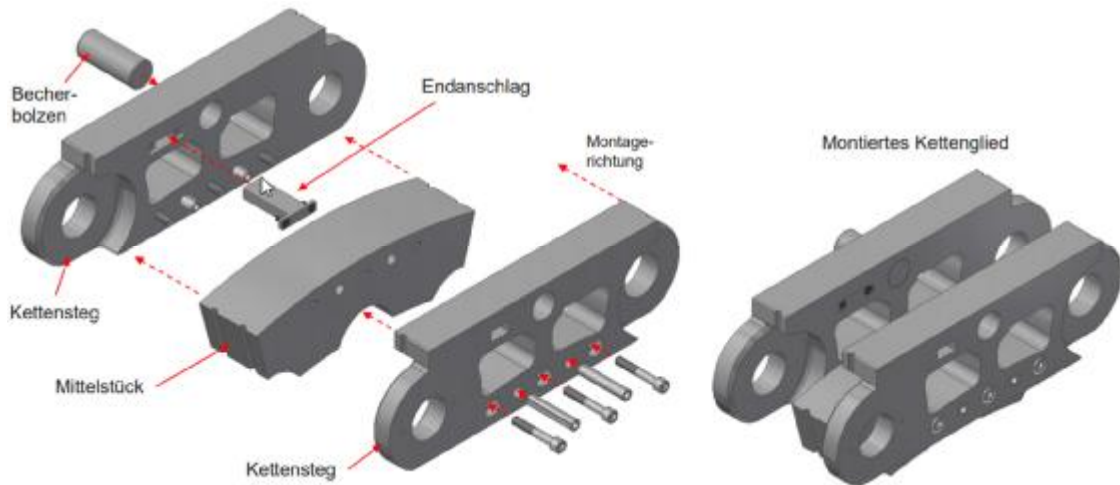


Abbildung 5: Modulbauweise Kettenglied

Das Kettenglied zeigt Funktionskontakte auf, diese unterscheiden sich je nach Position im Förderprozess. Differenziert wird hierbei zwischen Funktionskontakte in der Umlenkung oder aber im Leer-/Lasttrum. Die Kontakte sind in der Abbildung 6 farblich markiert.

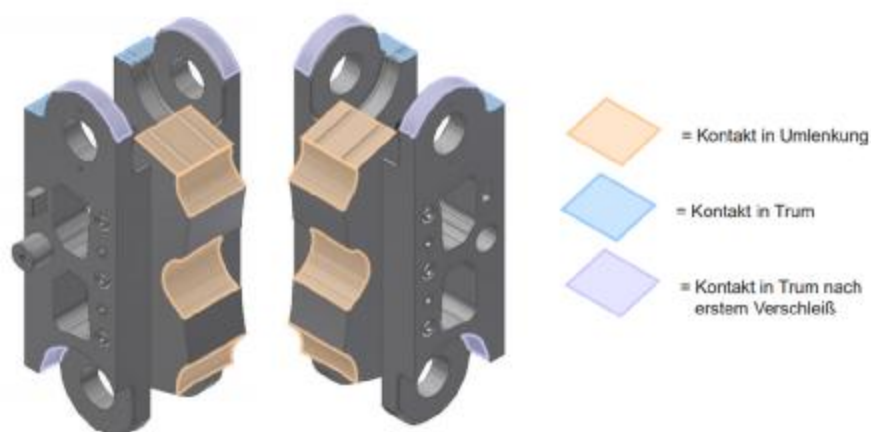


Abbildung 6: Kettenglied: Funktionskontakte

Im Last- & Leertrum wird die Schubkraft der Kette an den Stirnflächen der Kettenglieder übertragen, nach einem Anfangsverschleiß dienen die runden Ausnehmungen zusätzlich als Auflage zur Verfügung und verlangsamen so den weiteren Verschleiß.

Durch exzentrische Montierung der Becher zum Kettenglied werden die Stirnflächen der Kettenglieder zusätzlich belastet, dadurch wird der gerade Lauf der Kette stabilisiert.

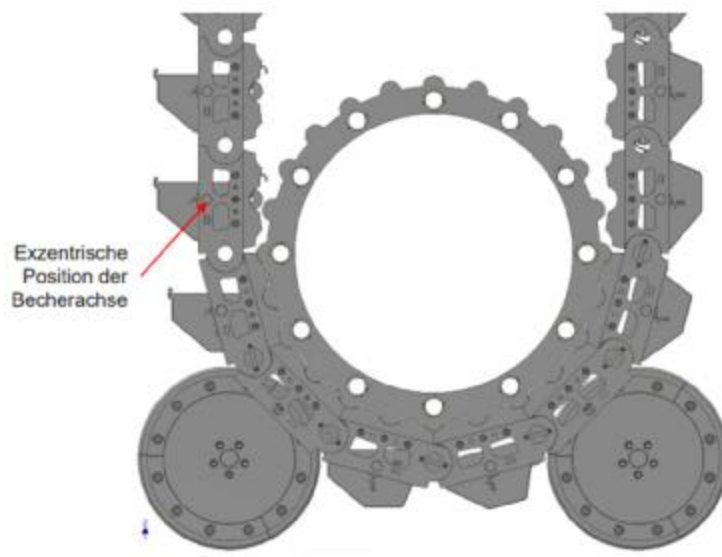


Abbildung 7: Exzentrische Position der Becherachse

Der Endanschlag eines Kettengliedes und die zwei Endanschläge am Becher dienen dazu die gewünschte Becherposition, in den jeweiligen Betriebsphasen, sicherzustellen.

Die Ergebnisse der FE-Analyse zeigen grundsätzlich eine (hinsichtlich Festigkeit) größtenteils korrekt dimensionierte Kettengliedgrundgeometrie. Die Bereiche rund um die Bolzenlagerung mussten noch verstärkt werden. Auch weisen die Ergebnisse einige Bereiche, wie Kettengliedmittelstück, relativ geringe Spannungen auf, womit Potential zu Materialeinsparung/ Verschlankung vorhanden ist.

Die Bechergeometrie als gekantete Ausführung hat sich aufgrund der einfacheren Fertigungsmöglichkeiten und der damit einhergehenden Flexibilität in der Kontur ergeben. Durch Asymmetrie kann der Antriebsrad-Durchmesser verringert werden, was in einem kleineren Footprint der Anlage resultiert.

Antriebsstation und Kettenmontage

Das Antriebskonzept besteht darin die Kettenstränge über (Roll-)Reibung der Auflageflächen von Kettengliedern und der Antriebsräder anzutreiben, optional kann hier auf Allrad-Betrieb umgestellt werden. Es empfiehlt sich, um Schlupf zu vermeiden und somit Asynchronität zu minimieren, beide Achsen über eine Kopplung mittels Kette/ Riemmen anzutreiben sind. Nach analytischen Betrachtungen und FE-Analysen wurde eine Radstellung bei jeweils 45° aus der Vertikalen festgelegt (Abbildung 8).

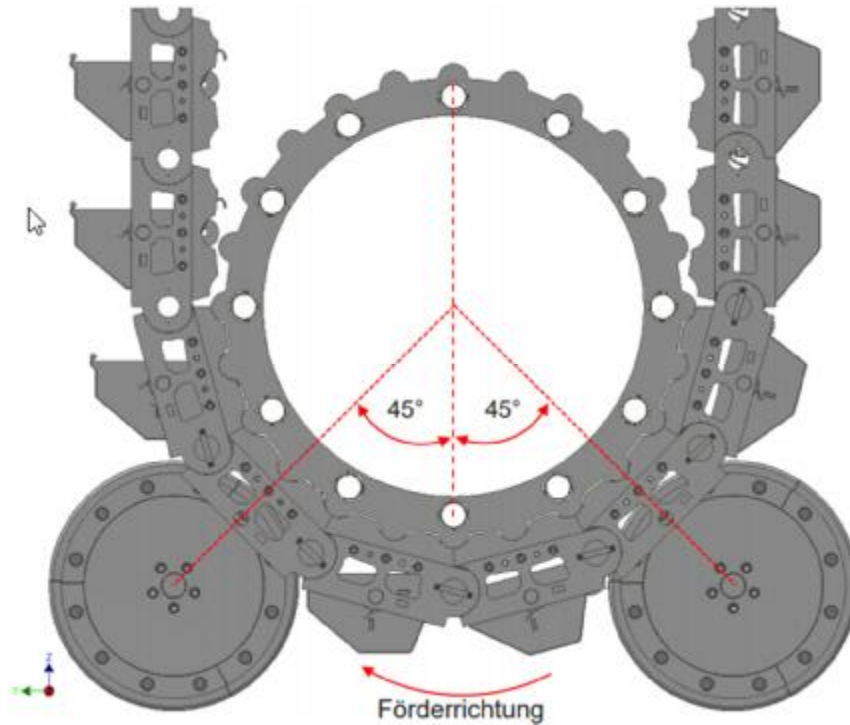


Abbildung 8: Antriebskonzept

Das Antriebsrad sowie die eingesetzten Schrauben wurden ausgiebig, anhand FE-Analysen, einer Festigkeitsbewertung unterzogen und somit geprüft. Wie nachfolgend zu entnehmen, bildet sich an der Stelle zwischen Kettenglied und Antriebsrad bzw. dem Übergang der Kranzteile eine kritische Stellung ab.

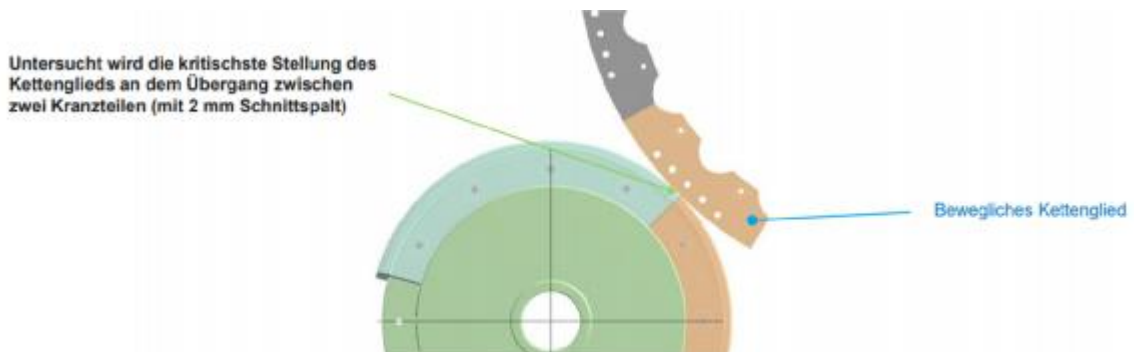


Abbildung 9: Kritische Stellung Kettenglied & Kranzteil

Die Antriebsräder spielen bei der Kettenmontage ebenfalls eine wichtige Rolle, hierbei werden die Kettensegmente in die untere Umlenkung eingeführt. Die Segmente sind

lang genug um auf Antriebsrad und Stützrad aufzuliegen, somit wird die Lage definiert. Das Nockenrad wird von oben in Mulden der Kettenglieder herabgelassen. Dieser Vorgang wird durch eine Vorrichtung gestützt, diese ermöglicht leichtes rotieren des Nockenrads um die Achse. Anschließend kann ein weiteres Kettensegment aus gleicher Richtung nachgeführt werden. Die Kettensegmente müssen an den Verbindungsstellen hydraulisch verbolzt werden.

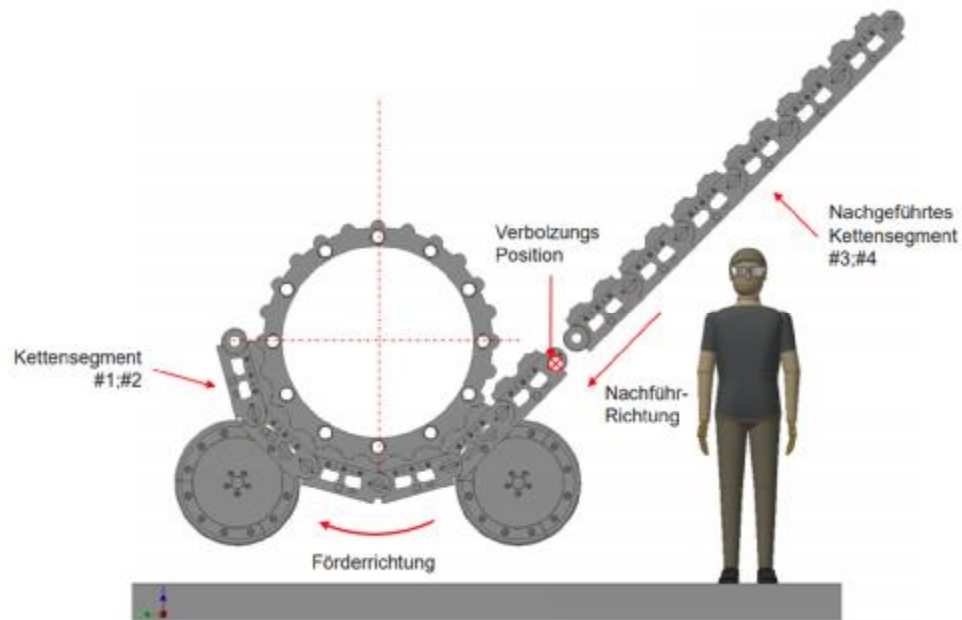


Abbildung 10: Montage Kettensegmente

Umlenkung

Ein weiterer komplexer Bereich des SKBW's ist die untere Umlenkung. Diese wurde im Bereich, wie in Abbildung 11 dargestellt, näher betrachtet und mittels FEM durch Einstellen unterschiedliche Parameter analysiert.

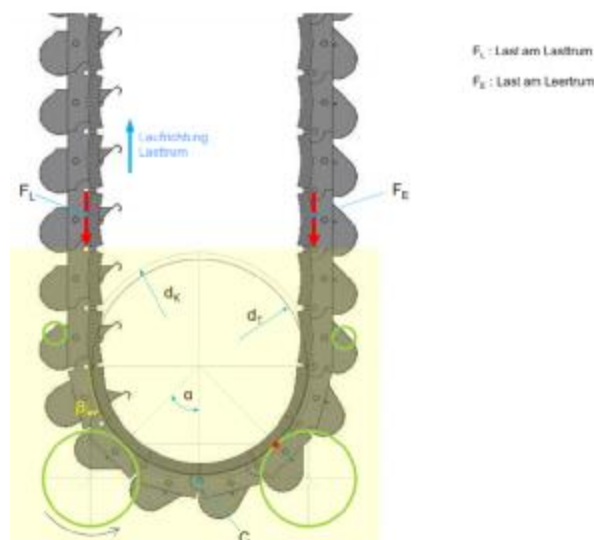


Abbildung 11: Bereich der unteren Umlenkung

Das Konzept der unteren Umlenkung besteht darin, dass die Kette über das Stützrad und das Antriebsrad umgelenkt und im optionalen Allrad-Betrieb über beide Wellen angetrieben wird. Die Synchronisierungs-Trommel (Druckstützrad), welche folgend noch näher beschrieben wird, stellt bei Haftverlust an den Rädern die Synchronisierung der beiden Kettenstränge über Nocken-Mulden Kontakte dar. Das verfolgte Hybridkonzept basiert auf dem Kontakt der Kettenglieder untereinander und dem Kontakt der Mulde der Kettenglieder und den Nocken der Synchronisierungs-Trommel. Zur Sicherstellung eines ruhigen Kettenlaufs werden im Bereich der unteren Umlenkung zusätzliche Stützelemente vorgesehen.

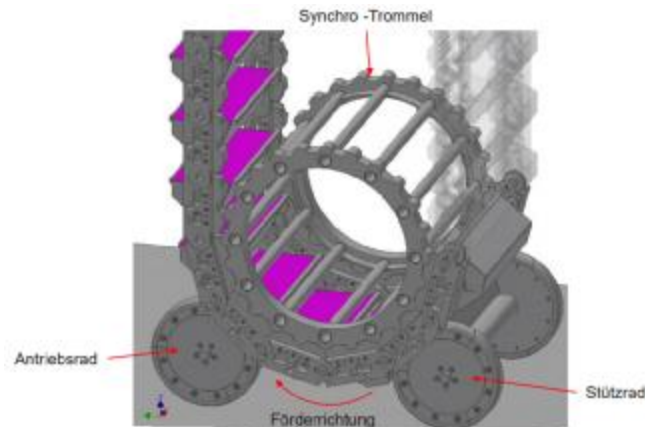


Abbildung 12: Konzept der unteren Umlenkung

Das Druckstützrad wurde innerhalb der Entwicklung einem Festigkeitsnachweis bei Traktionsverlust auf einer Seite unterzogen. Die resultierenden Ergebnisse legen die Verformung und die Spannungen innerhalb dar. Unter Prüfung standen außerdem auch die Ermüdungsfestigkeit sowie eine Betrachtung der Schweißverbindungen.

Das Konzept der oberen Umlenkung besteht darin, eine Becherneigung durch den Endanschlag einzuleiten und durch weiteren Verlauf eines Kontakts der Becherrolle mit der Konturscheibe vorzugeben. Die Konturscheibe ist ausgerichtet für eine frühe Entleerung der Becher im Bereich von 45° bis 90° . Über den Bereich von 90° hinaus wird der Becher durch den Endanschlag, in die für den Leertrum notwendige, vertikale Position geführt.

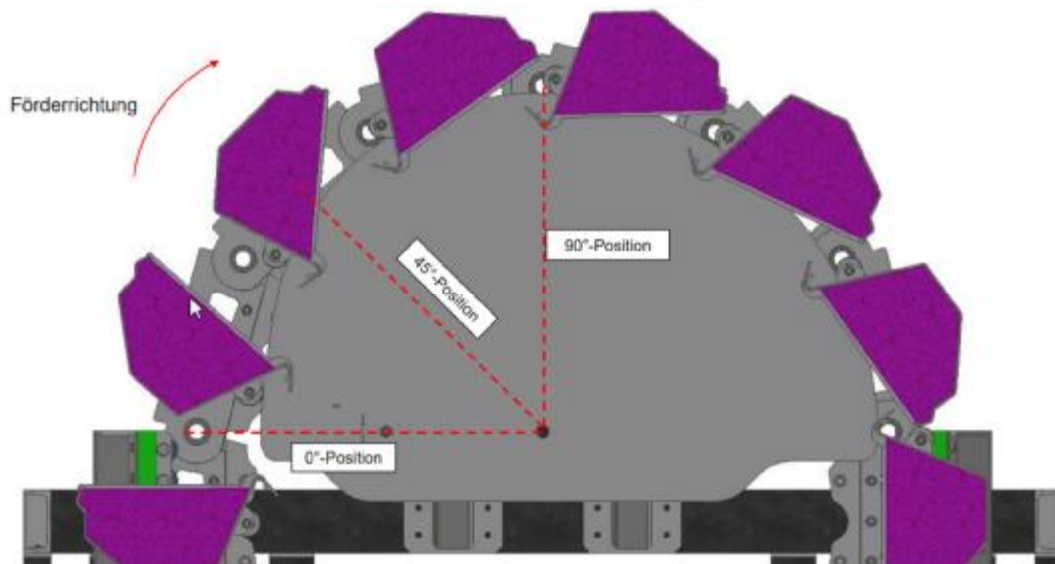


Abbildung 13: Konzept obere Umlenkung

Die Synchronisierung der Kettenstränge geschieht einerseits über die Trommel in der unteren Umlenkung und andererseits über das Verhaken der Becher untereinander im Leertrum. Die Synchronisierung wird aufgrund der Nähe zum Ursprung der Asynchronität (Schlupf der Antriebsräder), der deutlich engeren möglichen Toleranzen und der höheren Steifigkeit der Kontaktflächen führend über die Trommel erzielt. Über das Einhängen der Becher im Leertrum kann auf einem großen Bereich eine gröbere Synchronisierung realisiert werden.

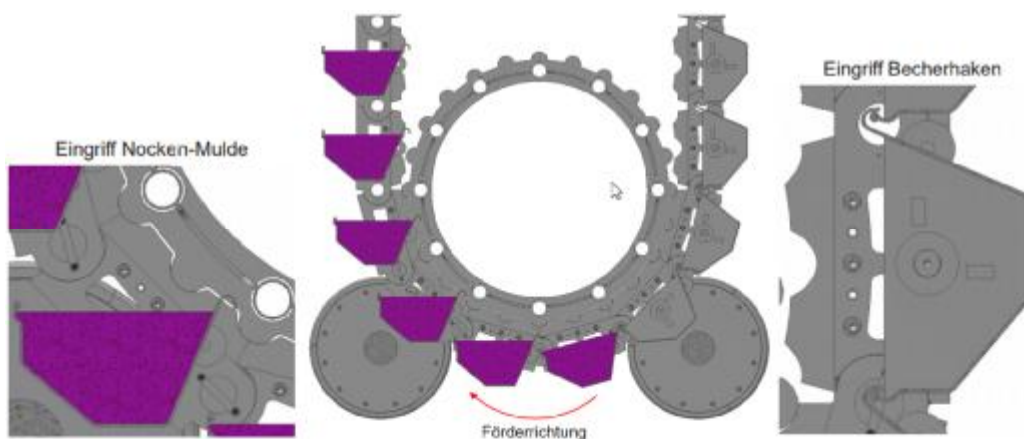


Abbildung 14: Synchronisierungskonzept Trommel + Becher

Gehäuse und Führung

Nach genauer Betrachtung vorangehender Ergebnisse wurde die Notwendigkeit der Kettenführung erarbeitet. Diese dient zur Stabilisierung der Kette, insbesondere im Lasttrum, unabhängig vom Spiel in den Kettengliedergelenken, unabhängig von Fertigungstoleranzen der Kettenkomponenten sowie Schwingungen. Unter Stabilisierung der Kette ist die Beibehaltung der vertikalen Ausrichtung des Kettenstranges bzw. der

vertikalen Ausrichtung der Schubkraft gemeint. Infolge dessen wurde eine stationäre Platzierung von Rollen und Gleitführungen vorgesehen.

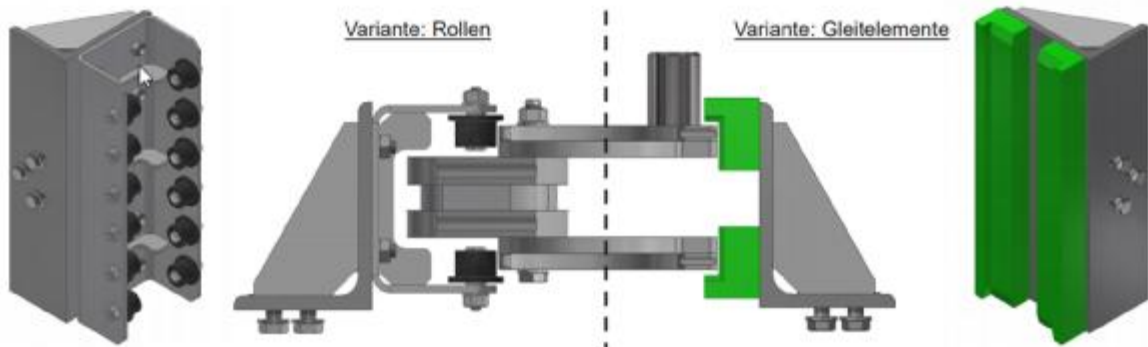


Abbildung 15: Führung der Kette

Die Führung sind zur Montage am Stahlbau vorgesehen. Der Stahlbau wurde Untersuchungen hinsichtlich der Statik unterzogen und ausgewertet. Hierbei ergab sich ein Gerüst aus U-Trägern sowie Abdeckblechen.



Abbildung 16: Gehäuse / Fuß

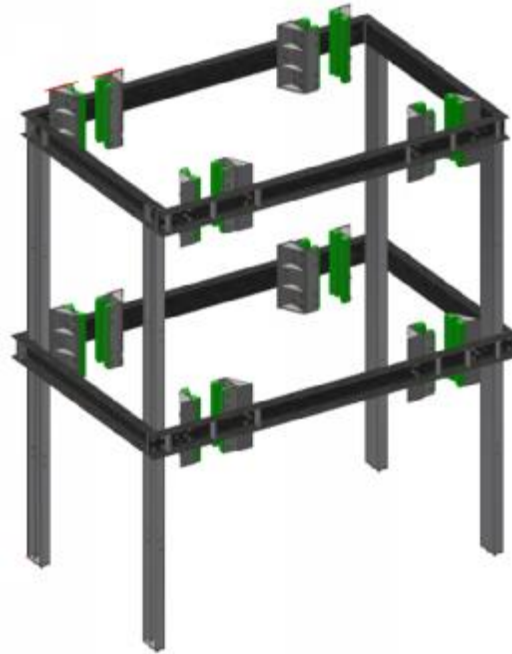


Abbildung 17: Gehäuse / Standartsegment



Abbildung 18: Gehäuse / Kopf

Maßnahmen zum Schutz vor Verschmutzung

Der Schutz vor Verschmutzung innerhalb des SKBW´s bringt erhebliche Vorteile hinsichtlich Lebensdauer einzelner Komponenten und somit der kompletten Anlage. Ausgearbeitet wurden verschiedene Maßnahmen an unterschiedlichen Orten, ein Zusammenspiel dieser, erbringt im Gesamten erhebliche Vorteile. Zum einen ist eine aktive Reinigungsmethode der Funktionskontakte (Abbildung 6) über Bürsten und Druckluft

denkbar zum anderen sind durch Nuten und Abläufe in den Flächen der Funktionskontakte vorzusehen, um eine Störung der Kontakte durch Verunreinigung zu verhindern. Eine weitere Möglichkeit ist das Verwenden von Leitblechen und Schutzblechen, welche verhindern, dass Schüttgut in die kritischen Bereiche gelangt und im besten Fall das Schüttgut in die Becher leitet.

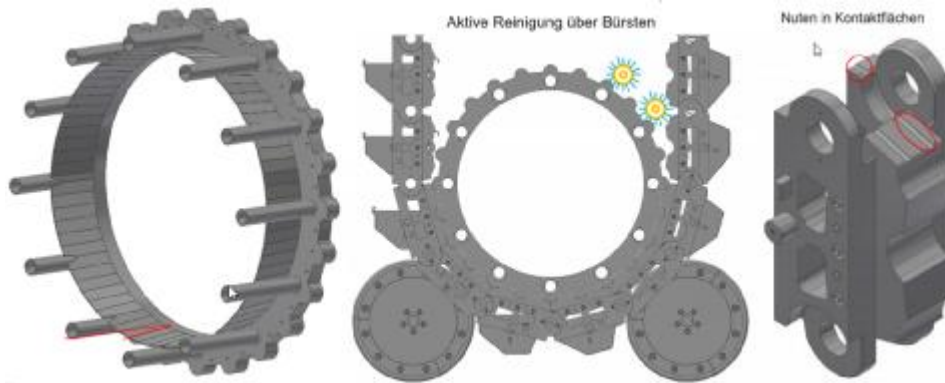


Abbildung 19: Schutz vor Verschmutzung durch Leitbleche/ Bürsten/ Nuten

Arbeitspaket 2.2 – Aufbau einer Laboranlage

Nach der Fertigung der Einzelsysteme erfolgte die mechanische und elektrische Integration der Gesamtanlage auf dem Gelände der AUMUND Fördertechnik GmbH. Während der Montage traten signifikante Abweichungen zwischen den Fertigungszeichnungen und den tatsächlichen Bauteilmaßen auf. Hauptursachen waren Fertigungsungenauigkeiten in Bereichen wie Bohrungen, Passflächen und Schweißbaugruppen sowie eine unzureichende Tolerierung der einzelnen Bauteile. Die daraus resultierenden Toleranzüberschreitungen erforderten umfangreiche Nacharbeiten an mehreren Schnittstellen.



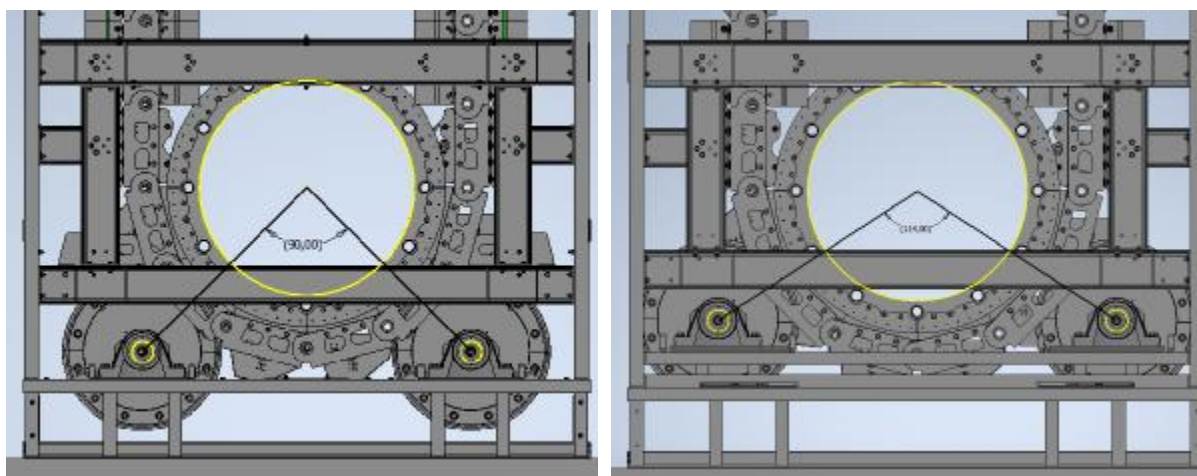
Abbildung 20: Aufgebaute Laboranlage

Arbeitspaket 3 – Erprobung des Gesamtsystems

Die Arbeitspakete AP 3.1 „Erprobung der Mechanik“ und AP 3.2 „Revision der Einzelsysteme und Umsetzung im Technikum“ wurden zeitparallel bearbeitet. Dadurch konnten die Erkenntnisse aus der Erprobung unmittelbar in die Revision einfließen und erneut validiert werden.

Im Rahmen des ersten Testlaufs wurde festgestellt, dass die Antriebsringe eine korrekte Rotation ausführten, jedoch keine Vorwärtsbewegung der Schubkette generiert wurde. Die nachfolgende Analyse ergab zwei mögliche Problemursachen:

1. Bei der Erstellung der Fertigungszeichnungen der Antriebsringe (Breite) wurde eine zu geringe Toleranz gegenüber der Kette (Lichte Weite) gewählt, wodurch es zwischen der seitlichen Fläche der Kette und den Antriebsringen zu zusätzlichen Reibkräften kam. Diese Kräfte mussten beim Antrieb des Schubkettenbecherwerks zusätzlich überwunden werden. Eine Neuanfertigung schmalere Antriebsringe verbesserte die Situation jedoch nicht.
2. Die zweite Annahme, dass die Reibkraft an der Kontaktstelle zwischen Kette und Antriebsring nicht ausreichte, um die notwendige Schubkraft zu übertragen, erwies sich als zielführend. Zur Optimierung des Kontaktpunkts wurde der Winkel zwischen den Antriebsringen von 90° auf 114° erhöht. Durch diese Änderung konnte das Funktionsprinzip eines vertikalen Förderers mit Schubkette nachgewiesen werden



(a) 90° Stellung der Antriebsringe vor dem Umbau

(b) 114° Stellung der Antriebsringe nach dem Umbau

Abbildung 21: Winkel zwischen den Antriebsringen vor und nach dem Umbau

Anschließend wurde das Führungskonzept der Kette untersucht. Die zunächst eingesetzten Gleitkufen zeigten aufgrund der Materialpaarung mit der Kette eine zu hohe statische Reibung. Der Umbau auf Rollenführungen führte zu einer signifikanten Reduktion der Reibkräfte und ermöglichte einen Betrieb unter maximaler Drehzahl. Zudem konnte die Anzahl der benötigten Führungen reduziert werden, da der Kettenstrang auch ohne Führungen vertikal verläuft.

Das Führungskonzept der Laboranlage sieht jetzt insgesamt drei Kettenführungen vor:

- Im Fuß des Schubkettenbecherwerks, um die Kette in der unteren Umlenkung in den vertikalen Strang zu überführen
- Eine mittige Führungspaarung zur Reduktion der freien Knicklänge
- Kettenführungen im Kopfbereich, vor bzw. nach der Umlenkung der Kette



(a) Ausgebaute Gleitkufen Führung



(b) Vormontierte Rollenführungen

Abbildung 22: Kettenführungskonzept

In einem weiteren Schritt wurde die Synchronisation der Kettenstränge überprüft. Hierfür wurde die Druckstütztrommel segmentiert, wodurch zwei nicht miteinander verbundene Druckstützräder entstanden, die weiterhin die Umlenkung der Kette im unteren Bereich unterstützen. In einem ersten Probelauf konnte bestätigt werden, dass das Zusammenspiel von Kettenstrang und Bechern ausreicht, um eine Synchronität der beiden Kettenstränge sicherzustellen. Selbst nach gezielter Manipulation der Reibverhältnisse (Schmierung eines Antriebsrings mit Fett) konnte keine Asynchronität festgestellt werden. Die zusätzliche Synchronisation über die Druckstütztrommel erwies sich daher als redundant und kann in späteren Anlagen deutlich reduziert eingesetzt werden.



(a) Druckstütztrommel



(b) Segmentierte Druckstütztrommel

Abbildung 23: Umbau der Druckstütztrommel zu zwei unabhängigen Druckstützringen

In der unteren Umlenkung wird die Kette durch das Zusammenspiel der Nocken in der Kette und im Druckstützring stabil geführt. Die Kontaktflächen der Kette bleiben während der gesamten Umlenkung durchgehend in Kontakt. In der oberen Umlenkung erfolgt keine zusätzliche Führung. Dort entstehen an den Kontaktflächen der Kette immer wieder Öffnungen, was zu Stoßbelastungen führt. Die Umlenkung verläuft insgesamt deutlich unruhiger als im unteren Bereich.

Zur Reduktion dieser Belastungen wurden mehrere Ansätze erprobt. Die Installation eines Nockenrings, analog zum Druckstützring in der oberen Umlenkung, erwies sich als nicht zielführend. Auch eine Konstruktion mit Rollen zur Stabilisierung der Kette in 114°-Stellung zeigte aufgrund unterschätzter mechanischer Belastung keine zufriedenstellende Wirkung. In einem weiteren Schritt wurde die Verwendung von Ringsegmenten, ähnlich den Antriebsringen im unteren Bereich, angedacht. Diese sollen die Kette so beruhigen, dass keine Stoßbelastungen mehr auftreten. Dieser Ansatz konnte bislang nur an einem 3D-gedruckten Modell getestet werden. Im kleinen Maßstab erwies sich die Lösung jedoch als vielversprechend und soll zeitnah an der Laboranlage umgesetzt werden.



(a) Nockenring in oberer Umlenkung



(b) Rollen in 114° Position

Abbildung 24: Ansätze zur Reduktion der Belastung in der oberen Umlenkung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Arbeitspaket 3 trotz erheblicher technischer Herausforderungen und notwendiger konstruktiver Anpassungen innerhalb des vorgesehenen Projektzeitraums erfolgreich abgeschlossen wurde. Die iterative Bearbeitung der Teilpakete sowie die enge Verzahnung von Erprobung und Revision trugen maßgeblich zur fristgerechten Umsetzung bei. Die Funktionsfähigkeit des vertikalen Schubkettenförderers konnte nachgewiesen und durch gezielte Optimierungen stabilisiert werden.

Arbeitspaket 4 – Erprobung des Gesamtsystems mit Fördermaterial

Für die Erprobung des Gesamtsystems unter Lastbedingungen wurde ein Versuchsaufbau mit kontinuierlichem Materialumlauf konzipiert. Über einen einstellbaren Muschelschieber sollen verschiedene Förderszenarien realisiert werden, darunter sowohl kontinuierliche Förderung als auch diskontinuierliche Siloabzugsprozesse. Der Muschelschieber ermöglicht zudem eine gezielte Beeinflussung des Füllgrads der Behälter. Diese Variabilität soll eine systematische Untersuchung des Förderverhaltens unter praxisnahen Bedingungen ermöglichen.

Arbeitspaket 4, dessen Beginn unmittelbar an den erfolgreichen Abschluss von AP 3 gekoppelt war, befindet sich aktuell in der Erprobungsphase. Das Versuchskonzept ist vollständig ausgearbeitet, die technischen Voraussetzungen sind geschaffen, und ein funktionsfähiger Versuchsaufbau steht bereit. Die Erprobung mit realem Fördermaterial ist gestartet und durchlief bereits diverse Versuchsstadien. Bis jetzt wurden die Versuche mit Referenzmaterial Feinkies gestartet mit unterschiedlichen Feuchtigkeitsgraden. Dabei wurden die Betriebsparameter wie Fördergeschwindigkeit, Öffnungswinkel der Beladeschurre und Einstellwinkel der Entleerungsscheibe variiert. Als Ergebnisse wurden die korrekte Be- und Entladung sowie die Staubentwicklung und Spritzkorn bewertet.

Die durchgeführten Arbeitspakete belegen die grundsätzliche Funktionalität des entwickelten Schubkettenfördersystems. Durch gezielte Anpassungen – insbesondere an den Antriebsringen und der Kettenführung – konnte die mechanische Funktionsfähigkeit des Systems erfolgreich nachgewiesen werden. Die Reibungsverhältnisse, Führungselemente und die Geometrie der Antriebseinheit erwiesen sich als kritische Stellgrößen, deren Optimierung wesentlich zur Systemstabilität beitrug. Die Synchronität der Kettenstränge konnte ohne zusätzliche mechanische Kopplung zuverlässig erreicht werden. Die Erprobung des Gesamtsystems inklusive des Umlaufmaterials erfolgt fortlaufend und wird sich über den Projektzeitraum erstrecken, da die Kundenanforderungen von fördertechnischen Anlagen für Vertikaltransport stets mit einem spezifischen Schüttgut zusammenhängen. Diese können nacheinander labortechnisch getestet und die Eignung bzw. die Parameteranpassung der Anlage untersucht werden. Somit bildet die entwickelte Laboranlage eine belastbare Grundlage für weiterführende Untersuchungen und den möglichen industriellen Einsatz des Systems.



Abbildung 25: 3D-Modell des kontinuierlichen Materialumlaufs

IV. Fazit und Ausblick

Bezogen auf die Umweltaspekte gibt es zwei Innovationsbereiche: die Einsparung von Energiebedarf im Förderprozess durch den geringeren Leistungsbedarf des Antriebs und der Absaugung sowie der geringere Materialbedarf in der Anlagenherstellung. Zusammenfassend lässt sich feststellen das vorrangige Ziel, eine neue Lösung für die Vertikalförderung von schweren Schüttgütern zu entwickeln, um wesentlich geringere Energieverbräuche aufzuweisen, von AUMUND erfüllt wurde. Durch Betrachtung vieler Systeme im Hinblick auf Leistungsreduzierung bei gleicher Fördermenge, beispielsweise die Schüttgutaufgabe in Förderrichtung können Energieverbräuche reduziert werden. Zudem wird die Umweltbelastung durch Staub minimiert, indem Lösungen gegen das Austreten entwickelt wurden. Die großen Vorteile des Schubkettenbecherwerks gegenüber herkömmlicher Becherwerke sind neben der Reduzierung des Energieverbrauchs deutlich bei Maximalförderhöhen oder denkbar verfahrenbaren Ausführungen, bedingt durch einen tiefen Schwerpunkt.

Der Blick auf die Zukunft zeigt sich sehr erfolgsversprechend, da anhand der Prototypenerstellung und Einsatz in Pilotprojekten weitere Erkenntnisse erwartet werden, die eine industrielle Etablierung aufzeigen werden.

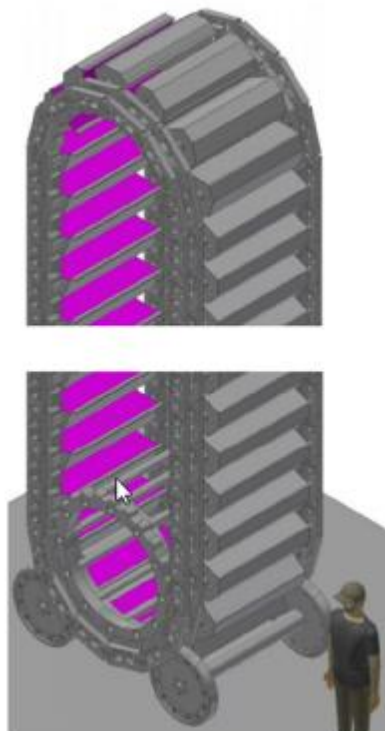


Abbildung 26: SKBW Aufbau ohne Stahlbau

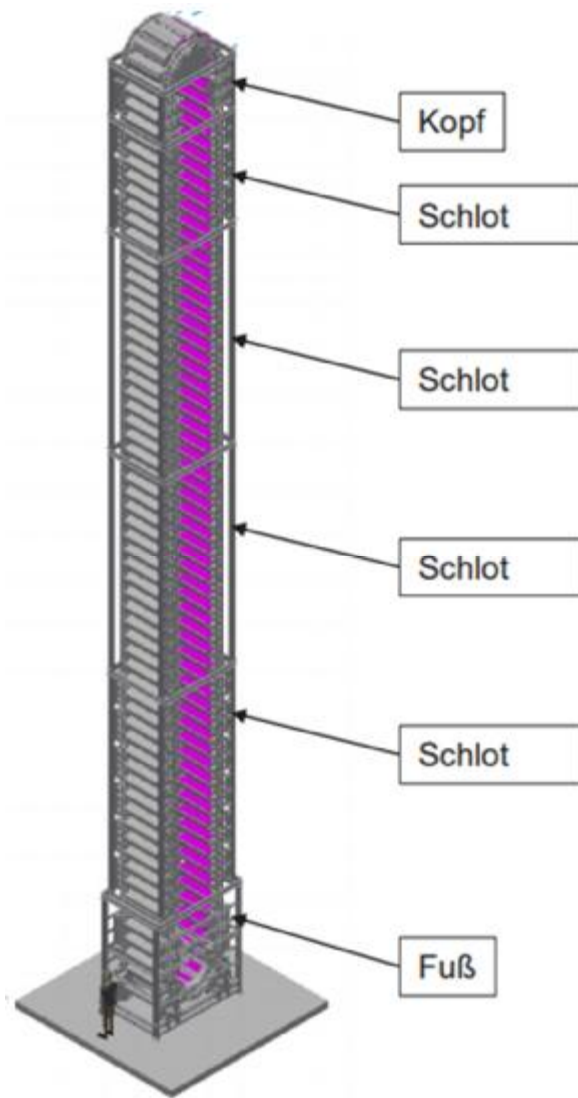


Abbildung 27: SKBW Aufbau mit Stahlbau