

von

Dr. Sven Eichhorn
Benjamin Kupey
Klaus Sautter
Dr. Wolfram Vogel
Dr. Sebastian Weise

BBSR-
Online-Publikation
24/2024

elevation – Aufzugsystem in Holzleichtbauweise mit miniaturisiertem Trommelantrieb



elevation – Aufzugssystem in Holzleichtbauweise mit miniaturisiertem Trommelantrieb

Entwicklung eines neuen maschinenraumlosen Aufzugsystems in
Holzleichtbauweise mit miniaturisiertem Trommelantrieb zur
minimalinvasiven Modernisierung und Nachrüstung von Bestandsgebäuden

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.26

Projektlaufzeit: 06.2021 bis 05.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Dr. Jan Weckendorf
jan.weckendorf@bbr.bund.de

Autoren

Technische Universität Chemnitz
Dr.-Ing. Sven Eichhorn
sven.eichhorn@mb.tu-chemnitz.de

Benjamin Kupey
benjamin.kupey@mb.tu-chemnitz.de

Dr.-Ing. Sebastian Weise
sebastian.weise@mb.tu-chemnitz.de

Sautter Lift Components GmbH, Kornwestheim
Klaus Sautter (Projektleitung)
klaus.sautter@slc-liftco.com

Vogel Gut Achten, Schorndorf
Dr.-Ing. Wolfram Vogel
wolfram.vogel@gutachten-vogel.de

Redaktion

Technische Universität Chemnitz
Dr.-Ing. Sebastian Weise, Benjamin Kupey

Stand

November 2023

Gestaltung

Technische Universität Chemnitz
Dr.-Ing. Sebastian Weise

Bildnachweis

Titelbild: TU Chemnitz / SLC; Visualisierung Rebecca Sautter
Viktor Baumung: S. 42; Benjamin Kupey: S. 20, 21, 22, 23, 24, 25, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 39, 40, 43; Klaus Sautter; S. 9, 41; Eshan Torshizi:
S. 26, 27

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Eichhorn, Sven; Kupey, Benjamin; Sautter, Klaus; Vogel, Wolfram; Weise, Sebastian, 2023: evelution – Aufzugssystem in Holzleichtbauweise mit miniaturisiertem Trommelantrieb: Entwicklung eines neuen maschinenraumlosen Aufzugsystems in Holzleichtbauweise mit miniaturisiertem Trommelantrieb zur minimalinvasiven Modernisierung und Nachrüstung von Bestandsgebäuden. BBSR-Online-Publikation 24/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	7
Einführung	8
Problemstellung	10
Stand der Forschung/Baupraxis	10
Entwicklungsbedarf	11
Zielstellung	12
Forschungsdesign	13
Rahmenbedingungen	13
Methodischer Ansatz	13
Projektteam und Organisation, Kooperationspartner	14
Arbeitspakete	14
Meilensteine / Ziel- und Abbruchkriterien	15
Projektverlauf und Ergebnisse	18
Entwicklung der Aufzugskabine	18
Konstruktionsgrundlagen	18
Konstruktionsdetail: Fangrahmen	19
Konstruktionsdetail: Eckverbinder	20
Konstruktionsdetail: Kabine	21
Gestaltung des Antriebs	25
Gestaltung des Drahtseils	28
Berechnungen	30
Aufzugskabine	30
Eckverbinder	30
Erprobungen	31
Fangrahmen, Prototyp 1 – statische Versuche	31
Fangrahmen, Prototyp 1 – Dauerversuche	34
Fangrahmen, Prototyp 2 – Dauerversuch	37
Fangrahmen, Prototyp 2 – Fangversuch	38
Fangrahmen, Prototyp 2 – Restbruchkraft	39
Erprobung des Antriebs	40
Erprobung des Drahtseils	42
Konklusion	44
Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag	44
Stellungnahme zu möglichen Ergebnissen von dritter Seite, die während des Vorhabens bekannt geworden sind	44
Erfolgskontrolle	45
Dissemination	46
Mitwirkende	49
Kurzbiographien	50

Literaturverzeichnis	51
Abbildungsverzeichnis	54
Tabellenverzeichnis	55

Kurzfassung

Die Verbesserung der Barrierefreiheit in Bestandsgebäuden durch Aufzüge ist in vielen Bauwerken problematisch. Dies liegt an räumlichen Einschränkungen, unterschiedlichen Bauzuständen und Baumaterialien sowie bau- und denkmalrechtlichen Bestimmungen. Dennoch ist der Bedarf an barrierefreiem Wohnraum durch die zunehmende Verstädterung und die Überalterung der Bevölkerung hoch und wird weiter dramatisch steigen. Bereits heute fehlen in Deutschland etwa 400.000 Aufzugsanlagen im Gebäudebestand. Darüber hinaus sind über 50% der bestehenden Aufzüge in Deutschland älter als 20 Jahre und müssen dringend modernisiert, bzw. altersgerecht umgebaut werden [1].

Im Zuge des Projektes „elevation“ wurde ein neuartiges Aufzugssystem entwickelt, das aufgrund seiner Kompaktheit im Vergleich zu herkömmlichen Aufzugssystemen bei der Nachrüstung in Bestandsgebäuden nur minimale Umbaumaßnahmen erfordert. Dazu wurde ein modulares Baukastensystem, bestehend aus einer sehr leichten Tragkonstruktion und einer Aufzugskabine in Holzbauweise, entwickelt, welches flexibel an die individuellen Anforderungen der Bestandsgebäude angepasst werden kann. Das geringe Gewicht der tragenden Holzstruktur ermöglicht eine signifikante Reduktion des benötigten Antriebsmoments und dadurch auch eine Verkleinerung des Seil- und Trommeldurchmessers. Kombiniert mit der Entwicklung eines geeigneten Seils, das die hohen Schutzziele für Aufzüge auch in der mehrlagigen Wicklung der Antriebsseile auf einer Trommel ermöglicht, wird die gesamte Antriebseinheit so kompakt, dass auch in Bestandsgebäuden ohne Maschinenraum und Schachtgrube ein moderner, zukunftssicherer Aufzug eingebaut werden kann.

Das neue, minimalinvasive Aufzugssystem ist damit deutlich kostengünstiger, leichter und platzsparender als vorhandene Lösungen in Stahlbauweise. Die Entwicklung soll zu einer Steigerung des barrierefreien Wohnraums führen und damit eine Nutzung des gesamten Wohnraums in vielen Bestandsgebäuden in allen Lebensphasen ermöglichen.

Abstract

Improving accessibility in existing buildings through elevators is problematic in many buildings. This is due to spatial restrictions, different construction conditions and building materials as well as building and monument regulations. Nevertheless, the need for barrier-free living space is high due to increasing urbanization and the aging of the population and will continue to rise dramatically. There are already around 400,000 elevator systems missing from existing buildings in Germany. In addition, over 50% of the existing elevators in Germany are older than 20 years and urgently need to be modernized or converted to suit the needs of the elderly [1].

As part of the "elevation" project, a new type of elevator system was developed that, due to its compactness, requires only minimal renovation work when retrofitting existing buildings compared to conventional elevator systems. For this purpose, a modular system was developed, consisting of a very light supporting structure and a wooden elevator car, which can be flexibly adapted to the individual requirements of the existing buildings. The low weight of the supporting wooden structure enables a significant reduction in the required drive torque and thus also a reduction in the rope and drum diameter. Combined with the development of a suitable rope that also enables the high protection goals for elevators in the multi-layer winding of the drive ropes on a drum, the entire drive unit becomes so compact that a modern, future-proof elevator can be installed even in existing buildings without a machine room or shaft pit.

The new, minimally invasive elevator system is therefore significantly more cost-effective, lighter and more space saving than existing steel-constructed solutions. The development is intended to lead to an increase in barrier-free living space and thus enable the entire living space in many existing buildings to be used in all phases of life.

Einführung

Aufgrund des hohen Bedarfs für altersgerechte Wohnhäuser in Deutschland haben sich nachrüstbare Aufzug-Neuanlagen in bestehenden Gebäuden („Home-Lifts“) zu einem wichtigen Geschäftsfeld für die Branche und insbesondere KMUs entwickelt. Laut der Studie „Aufzugsarmut: Wie altersgerecht sind Deutschlands Wohnhäuser“ [1] müssten etwa 400.000 Wohngebäude nachträglich mit einem Aufzug ausgestattet werden, um ausreichend Wohnungen mit barrierefreiem Zugang für Senioren bereitstellen zu können. Für den nachträglichen Aufzugseinbau werden von kleinen wie großen Unternehmen Lösungen angeboten, wie z. B. riemengetriebene Home-Lifts nach Maschinenrichtlinie [2]. Die Modernisierung von Aufzugsanlagen und Fahrtreppen gilt seit Jahren als ein Wachstumssegment der Branche. Einer der Treiber für das Wachstum des Modernisierungsbereichs im letzten Jahrzehnt war die in der Betriebssicherheitsverordnung festgelegte Frist zur Bewertung des sicherheitstechnischen Zustands von bestehenden Aufzügen. Insbesondere öffentliche Einrichtungen mussten aus rechtlichen, ebenso wie aus sozialen Gründen, in den vergangenen Jahren erheblich nachrüsten und ihre Immobilien um Aufzüge ergänzen bzw. erweitern. Private Immobilienbesitzer und Vermieter sehen in der Nachrüstung eines Aufzuges sogar einen wirksamen Schutz gegen Leerstände in den oberen Etagen ihrer Mietshäuser. Darüber hinaus wollen und müssen sie auf die demographische Entwicklung eingehen: die Bevölkerung wird immer älter und die Menschen wollen so lange wie möglich in ihrer eigenen Wohnung bleiben. Dafür muss diese allerdings zugänglich sein. Eine elegante Lösung um nachträglich einen Aufzug zu installieren stellt das Treppenhaus dar. Dieses bietet sich oft an, weil es alle Geschoße miteinander verbindet. In vielen Fällen sind das Treppenauge sowie Schachtgrube und Schachtkopf allerdings für den konventionellen Aufzug oder konventionelle Trommelaufzüge zu eng. Hier braucht(e) es ein neues Konzept! Weniger weitläufige Aufgänge erfordern ein Nachrüsten des Aufzuges andernorts im Haus. Kommt der Innenbereich als Standort für einen nachgerüsteten Aufzug generell nicht infrage, kann ein Schachtgerüst außerhalb des Gebäudes den Aufzug beherbergen und die Etagen über die Außenwand miteinander verbinden.

Das Innovationsgeschehen ist in der Aufzugsbranche stark an europäische und nationale Rechtsvorgaben gekoppelt. Verschiedene Normen und Richtlinien haben in den letzten Jahren eine ganze Reihe von Produktinnovationen initiiert und ermöglicht. „Die Aufzugsbranche ist absolut interessant. Sie wird von dynamischen Prozessen des Rechts und der Normen und ebenso der modernsten Technologie geprägt“[3]. Ein aktueller Treiber für Entwicklungen in der Branche ist die Novellierung der Betriebssicherheitsverordnung. Die wichtigsten gesetzlichen Vorschriften und Normen, welche für das Projektvorhaben interessant sind, sind:

- Aufzugsrichtlinie 2014/33/EU [4],
- Maschinenrichtlinie 2006/42/EG [5],
- Betriebssicherheitsverordnung (Novellierung ab 2015 gültig) – in Deutschland ist die BetrSichV wichtigstes Regelwerk für den Betrieb von Aufzügen und Fahrtreppen [6],
- BGI 779 (Montage, Demontage und Instandhaltung von Aufzugsanlagen) [7],
- DIN EN 81-20 (Sicherheitsregeln für die Konstruktion und den Einbau von Aufzügen) [8],
- DIN EN 81-50 (Sicherheitsregeln für die Konstruktion und den Einbau von Aufzügen. Konstruktionsregeln, Berechnungen und Prüfungen von Aufzugskomponenten) [9],
- DIN EN 13015 (Instandhalten von Aufzügen und Fahrtreppen) [10],
- VDI-Richtlinien wie z. B.: VDI 2168 (Aufzüge; Qualifizierung von Personal) [11], VDI 2566 (Schallschutz bei Aufzugsanlagen) [12], VDI 3810 (Betreiben und Instandhalten von gebäudetechnischen Anlagen; Aufzüge) [13]

Die strengen Richtlinien und Vorschriften fördern zwar Innovationen, sind für viele potentielle Anwendungen jedoch oft eine ebenso große Hürde. So muss stets geklärt werden, ob es räumliche, akustische, wirtschaftliche oder baurechtliche Einwände gibt. Die Schallübertragung kann beispielsweise dazu führen, dass der

Geräuschpegel in den Fluren und Wohnungen/Büros zu hoch wird und darum ein Aufzug innerhalb des Gebäudes nicht nachrüstbar ist. Auf Grund der hohen Geräuschentwicklung sind Antriebslösungen, wie etwa Schneckengetriebe, keine Alternative. Eine weitere Problematik ist der begrenzte Bauraum in Treppenhäusern. In den seltensten Fällen ist im sogenannten Treppenauge ausreichend Platz für die nachträgliche Montage eines Aufzugs. Ebenso gibt es nicht immer, wie in Abbildung 1, rechts gezeigt, ausreichend Platz im Schachtkopf zur Installation der Technik. So kommt es dazu, dass durch konventionelle Antriebslösungen ein zusätzlicher Maschinenraum über der Kabine benötigt wird, der jedoch einen großen Aufbau auf den eigentlichen Fahrschacht benötigt oder ein Anfahren des obersten Stockwerks unmöglich macht.



Abbildung 1: nachgerüsteter Aufzug in weitläufigem Treppenhaus (links); Trommelantriebseinheit in einem Schachtkopf (rechts)

Quelle: SLC

Eine Reduktion des Bauraumes ist durch die aktuelle Metallbauweise bei Aufzügen bis 430 kg nicht möglich, da das Kabinengewicht nicht weiter reduziert werden kann. Maßnahmen zur Vereinfachung, wie Trommelaufzüge mit großen Schachtausnutzungen inkl. Einsparung des Gegengewichtes, sind ebenso nicht möglich, da die Trommeldurchmesser, insbesondere bei höhergeschossigen Gebäuden, zu groß werden würden und man vergleichbare Probleme zu bereits beschriebenen Maschinenraum-Konzepten bekommt. Eine Mehrfachwicklung von Trommelantrieben, um kleinere Trommeldurchmesser zu realisieren, konnte bisher nur für Kräne und bei größeren Förderhöhen erfolgreich entwickelt und realisiert werden. Die Lasten bei Aufzügen sind im Gegensatz zu Kränen zu gering, so dass das Drahtseil nicht richtig geführt wird, sich verwirft und es somit zu großen Reibungen im Inneren des Drahtseils kommt, was letzten Endes zum vorzeitigen Versagen einzelner Drähte und Ablegen des Seils führt. Diesbezüglich konnten in ersten experimentellen Vorversuchen max. 300.000 Fahrten bzw. Lastwechsel erzielt werden, wobei für eine Zertifizierung und Annäherung an die DIN EN 81-20 mindestens 600.000 Fahrten benötigt werden.

Bisher existiert keine Lösung, welche eine geräuscharme, maschinenraumlose und somit platzsparende Aufzug-Antriebstechnologie für nachzurüstende Gebäude ermöglicht. Ebenso wenig ist auf dem Markt eine nachhaltige und ressourcenschonende Leichtbaulösung der Aufzugskabine zu finden, welche die Verwendung alternativer Antriebslösungen, wie etwa platzsparender Trommelaufzüge, ermöglichen würde, um den limitierten Bauraum effizient zu nutzen.

Problemstellung

Bislang gibt es keinen geeigneten kompakten maschinenraumlosen Personenaufzug für Nachrüstungen in Bestandsgebäuden ohne Aufzug. Die industrielle Forschung in diesem Kooperationsprojekt beschäftigt sich mit der Entwicklung, Integration und Adaption moderner Technologien zur Entwicklung eines neuen flexiblen Systems, das durch Nutzung von Leichtbau und Miniaturisierung nur minimalinvasive Umbaumaßnahmen erfordert. Das Erreichen der Projektziele ist mit einer kompletten Neuentwicklung einer leichten Aufzugskabine mit tragenden Holzstrukturen verbunden, die den hohen repetitiven, dynamischen mechanischen Belastungen im Betrieb standhalten muss und für den der Werkstoff Holz noch nicht ausreichend be- und anerkannt ist. Erst die angestrebte Reduzierung des Kabinengewichts ermöglicht die Miniaturisierung des Antriebs, die nur durch eine bisher im Aufzugbau explizit untersagte Mehrlagenwicklung des Antriebsseils möglich wird, aber aufgrund der geringen Vorspannung der Tragseile nicht einfach ist. Das Projekt umfasst innovative konstruktive Entwicklungsinhalte sowie grundlegende prototypische Material- und Betriebsprüfungen, um über ein notwendiges Assessment durch einen Notified Body die Erfüllung der Schutzziele aus Aufzugsrichtlinie und Brandschutz nachzuweisen.

Stand der Forschung/Baupraxis

Bislang gibt es nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten, um Aufzugsanlagen nachzurüsten, die die Sicherheitsanforderungen der europäischen Aufzugsrichtlinie erfüllen und die gleichzeitig dem restriktiven Platzangebot von Bestandsgebäuden ohne Aufzug gerecht werden. Zwar gibt es ein breites Angebot im Sonder-Aufzugsbau, aber häufig stehen dem zumeist erhebliche Umbaumaßnahmen, wirtschaftliche sowie bau- oder denkmalrechtliche Herausforderungen im Wege. Der in Bestandsgebäuden zur Verfügung stehende, sehr begrenzte Einbauraum (z. B. in Treppenaugen) erfordert Konzepte mit einem hohen Schachtausnutzungsgrad. Konventionelle Treibscheibenaufzüge scheiden dabei wegen ihres Gegengewichts, Hydraulikaufzüge wegen der Anforderungen an die Schachtgrube (z. B. bzgl. wasserschutzrechtlicher Anforderungen) oftmals aus. Einen sehr hohen Schachtausnutzungsgrad weisen nur Trommelaufzüge auf. Diese benötigen für Auffahrten wegen des fehlenden Gegengewichts jedoch deutlich mehr Antriebsleistung als die weitverbreiteten Treibscheibenaufzüge. Einen deutlichen Vorteil könnten hier Leichtbaukabinen bieten. Seit kurzem werden im Kabinenbau vereinzelt Faserverbundwerkstoffe eingesetzt, jedoch ausschließlich im Hochpreissektor und in Verbindung mit anderen Antriebskonzepten.

Die für das Vorhaben relevante Mehrlagenwicklung von Trommelantrieben ist zwar bei Kränen bekannt, wurde bzw. kann aber nicht ohne weiteres auf Aufzüge übertragen werden. Durch den Unterschied der Bedienung (Kranführer versus autonomes Fahren) ergeben sich unterschiedliche erforderliche Lastspielzahlen: 8×10^4 beim Kran und 6×10^5 beim Aufzug. Dies ist vor allem bedingt durch die unterschiedlichen Überwachungsmöglichkeiten: Beim Kran hat ein Kranführer das Seil regelmäßig im Blick. Er erkennt ein schadhaftes Seil frühzeitig. Im Aufzug ist das Seil in der Regel nicht offen zugänglich. Nur bei Wartungen wird es begutachtet, dazwischen würde ein schadhaftes Seil nicht erkannt werden. Unter Sicherheits- und Komfortgesichtspunkten müssen Trommelaufzüge zudem den Anforderungen der europäischen Aufzugsrichtlinie (2014/33/EU) und nicht nur der Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) entsprechen. Bislang gibt es keine normgerechte, technisch und wirtschaftlich sinnvolle Lösung, welche diese Anforderungen erfüllt.

Entwicklungsbedarf

Zwischen dem Ziel, einen möglichst kleinen Trommelquerschnitt zur Reduzierung des erforderlichen Antriebsmoments einzusetzen und den Vorschriften der harmonisierten Normen (EN81-20/50) zur Aufzugsrichtlinie (RL 2014/33/EU) zu 12-facher Seilsicherheit und einlagiger Wicklung der Seile, besteht eine große Forschungslücke: Bereits bei drei- bis viergeschoßigen Gebäuden zeigt sich bei einlagigen Trommeln ein Zielkonflikt zwischen Trommeldurchmesser und Länge der Trommel. Die notwendige Seillänge muss komplett aufgetrommelt werden. Wird die Trommel zu lang, kann sie nicht mehr fliegend gelagert werden, bzw. findet keinen Platz im Schacht, da sie zu lang ist. Große Trommeldurchmesser erfordern ein hohes Antriebsmoment und damit einen Antrieb, der zu groß baut (ohne Getriebe) oder zu laut wird (mit Getriebe). Schwere Kabinenrahmen verschärfen – selbst beim Einsatz von Leichtbaumaterialien für die Kabine – den Bedarf nach hohen Antriebsmomenten. Zudem kollidiert der Einsatz von Holz zur Reduzierung des Gewichts mit der Norm, da tragende Teile aus „nichtbrennbarem Material“ sein müssen.

Aufzugsnachrüstungen in Bestandsgebäuden sind nur mit neuen minimalinvasiven Aufzugssystemen mit miniaturisiertem Trommelantrieb für einen maximalen Schachtausnutzungsgrad realisierbar. Um die Miniaturisierung zu erreichen, sind ein innovativer Leichtbau (Werkstoff Holz für Trag- und Kabinenkonstruktion) und eine Mehrlagenwicklung der Seile (kleine kompakte Bauweise) erforderlich. Die Reduzierung des Trommeldurchmessers auf 150 mm ist jedoch mit großen technischen Herausforderungen verbunden, für die sich Kranseile nicht eignen. Gelingt die Entwicklung, können dünnere Seile, kleinere Trommeln und kostengünstige Holzkonstruktionen eingesetzt werden, was zu einer Reduzierung des Materialeinsatzes, der Herstellkosten, des Systempreises sowie Energieverbrauch bzw. Betriebskosten führt. Eine Lösung dieser technischen Herausforderungen stellt aus baurechtlicher und technischer Sicht bislang unerreichbare Anwendungsgebiete für Bestandsgebäude in Aussicht.

Eine prototypische Fertigung der Leichtbaukabine, welche eine Antriebsminiaturisierung ermöglicht, das neu konstruierte Seil sowie experimentelle Versuche mit diesen Baugruppen sollen einen Notified Body jedoch davon überzeugen, die Konformität mit den Schutzzielen der Aufzugsrichtlinie zu bestätigen, auch wenn Anforderungen der harmonisierten Normen nicht erfüllt werden..

Zielstellung

Ziel des Projektvorhabens ist die Entwicklung eines neuen maschinenraumlosen Aufzugsystems in Holzleichtbauweise mit hochkompaktem Trommelantrieb mittels innovativer Mehrlagenseilwicklung zur minimalinvasiven Modernisierung von Bestandsgebäuden. Mit dieser effizienten, platzsparenden, kostengünstigen und einfach zu integrierenden Aufzugslösung kann die Barrierefreiheit vieler Wohngebäude geschaffen werden, die bislang aufgrund der räumlichen, baulichen und wirtschaftlichen Voraussetzungen von einer Modernisierung ausgeschlossen waren.

Dabei soll der Trommeldurchmessers/Antrieb um 50% auf ca. 150 mm verkleinert und eine Mehrlagenwicklung ermöglicht werden, ohne dabei einen Schalldruckpegel von 75 dB zu überschreiten. Weiterhin soll das Gewicht der Holzkabine um 50% auf 150 kg gesenkt werden, um die in der DIN EN81-20 geforderten 600.000 Fahrten zu ermöglichen. Durch die Verkleinerung des Antriebs und der Reduzierung des Kabinengewichts kann die Kabinenfläche um bis 30% erhöht werden und barrierefreie Aufzüge bei limitiertem Platzangebot in Bestandsgebäuden erstmals ermöglichen. Die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen sowie der geringere Energiebedarf der Anlagen haben auch positive ökologische Auswirkungen.

Konkrete Projektziele:

- Leichtbau: Erstmalige Konstruktion einer selbsttragenden Aufzugskabine in Holzbauweise
- Maximale Zuladung: 630 kg
- Gewicht der Kabine zu konventioneller Bauweise um 50% gesenkt
- Vergrößerung der Kabinengrundfläche im Vergleich zu Aufzug mit Gegengewicht um 30% erhöht
- Antriebseinheit: Maschinenraumloser, geräuscharmer Trommelantrieb
- Gesamtwirkungsgrad der Antriebseinheit über 90%
- Energieverbrauchsreduktion um 20% und Energieeffizienzklasse D während der Fahrten erreicht
- Gewährleistete Schallwerte von < 65 dB für Türbewegungen, < 55 dB für fahrenden Aufzug und < 75 dB für die Antriebseinheit
- Trommelwicklung: Erstmalige Realisierung einer mehrlagigen Wicklung für kleine Wickeldurchmesser und hohe Wickelkraftsicherheiten:
 - Reduktion des Trommeldurchmesser um 50% (ca. 150 mm) erreicht
 - Seilsicherheit > 12
- Schachtkopfhöhe zwischen 2600 – 2800 mm
- Ausreichende Fahrtzahl zur Erkennung der Ablegereife zwischen 2 Inspektionen gesichert (vorzugsweise 600.000 Fahrten oder weniger mit abgesicherten Ersatzmaßnahmen)
- Erkennbarkeit der Ablegereife der Seile in der Aufzugsmehrlagenwicklung
- Keine Veränderungen der Bausubstanz, da keine Schachtgrube oder Maschinenraum nötig
- Konformitätsbescheinigung (CE) außerhalb der harmonisierten Norm unter Einhaltung der Schutzziele der Aufzugrichtlinie
- Reduktion der Montagezeit/-kosten um 20%
- Kosteneinsparung der Aufzugskabine um 30% durch Holzbauweise und Wegfallen des Gegengewichts
- Kosteneinsparung des Antriebs um 10% durch effizientere Auslegung des Trommelantriebes

Forschungsdesign

Rahmenbedingungen

Damit Aufzüge mit Tragkräften bis 1.000 kg nach DIN EN 81-70 [14] als barrierefrei gelten, muss der Zugang > 800 mm breit sein und die Tiefe > 1.300 mm betragen. Konventionelle Aufzüge sind deshalb in den allermeisten Bestandsgebäuden nicht geeignet. Bei der Entwicklung von Trommelaufzügen muss daher die Frage nach Miniaturisierung und Sicherheitsanforderungen beantwortet werden, um den Einbauraum in Schachtkopf und Schachtgrube deutlich zu reduzieren sowie die Sicherheit des Wartungspersonals durch das Konzept der temporären Schutzräume zu gewährleisten.

Voraussetzung für die Antriebsminiaturisierung ist die Reduzierung des Antriebsmoments. Dazu muss simulativ und experimentell beantwortet werden, wie stark das Tragrahmen- und Kabinengewicht durch den Werkstoff Holz reduziert und wie die Konstruktion den großen repetitiven Belastungen über eine Betriebsdauer von > 20 Jahren standhalten kann. Dabei ist eine zentrale Frage, wie es gelingt, ebenso die geforderten Brandschutzziele zu erfüllen.

Eine zusätzliche Voraussetzung ist die Reduzierung des Trommeldurchmessers und die Fähigkeit ausreichend Seil auf einer begrenzten Trommellänge aufzuwickeln. Fraglich bleibt, ob unter Umgehung der harmonisierten Normen die Schutzziele der Aufzugsrichtlinie mit der Mehrlagenwicklung der Antriebsseile erfüllt werden können. Hierzu ist ein Seil zu entwickeln, das sich bei vorgegebener Bruchkraft durch einen möglichst kleinen Seildurchmesser bei optimalem Laufverhalten und guter Aufliegezeit auszeichnet. Die Frage ist, ob die bereits heute erreichten Füllfaktoren bei Drahtseilen von 0,7 durch eine Hammerverschichtung weiter erhöht und die Lastenverteilung auf alle Litzen und Drähte des Seils gleichmäßiger verteilt werden können. Weiterhin ist zu klären, inwieweit durch eine optimierte Gestaltung der Rillengeometrie der Trommel und durch einen eventuellen Einsatz von Schmierung die Schädigung dieses nachverdichteten Seils in den Steigungszonen minimiert und die Wickelgüte insgesamt erhöht werden kann.

Methodischer Ansatz

Die Untersuchungsmethodik des Projekts besteht aus einer systematischen Kombination aus Computersimulationen und Materialprüfungen unter strenger Berücksichtigung der geltenden Normen und Gesetze. Zu Beginn werden die Anforderungen an Bestandsgebäude und des Aufzugsystems analysiert und detailliert in einem Pflichtenheft festgehalten. Anschließend werden die Teilsysteme des Systems aus Holzkabine, Führungselementen, Fangvorrichtung, Antrieb, Trommel und deren Rillen sowie alle weiteren mechanischen Komponenten mittels 3D-CAD/CAE-Software modelliert und integriert. Um die Anzahl iterativer Entwicklungsschritte zu minimieren wird das CAD-Modell der Kabine entsprechend unter Einbeziehung eines angepassten Sicherheitskonzeptes berechnet. Auf dieser Basis wird die vielversprechendste Konstruktion gefertigt und die kritischen Stellen der Holzkonstruktion in einem multiaxialen Prüfstand hinsichtlich auftretender Beanspruchungen geprüft.

Die Auslegung des Antriebs wird unter Berücksichtigung eines hohen Wirkungsgrads und geringen Energiebedarfs berechnet. Die Mehrlagenwicklung wird durch eine Auftrommel-Anlage und optische Messverfahren untersucht, mit der die optimale Vorspannung, Einscherung und Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Gängigkeit des Seils und der Trommel erforscht werden kann.

Das Gesamtsystem wird brandschutzgerecht ausgelegt und auf die Resistenz gegen Feuer, Querkräfte durch Schubversuche, die Verbundkraft durch Auszugversuche sowie die Bruchkraft des Drahtseils auf einem Prüfstand untersucht. Die Geräuschentwicklung sowie die System- und Eigenfrequenzen des gesamten Aufzugs inkl. Antriebssystem werden mittels Schallpegelmessungen sowie 3D-Aufnehmern untersucht. Zusätzlich werden das Drahtseil mikroskopisch auf Rotationssymmetrie und innere Reibungen analysiert sowie die mechanischen Eigenschaften mit einer dynamischen Biegewechselmaschine untersucht.

Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

Die Firma Sautter Lift Components GmbH ist seit Jahren erfolgreich in der Fertigung von Aufzugssystem und -komponenten. Der Technische Leiter, Herr Klaus Sautter, trieb mit seiner langjährigen Erfahrung die Entwicklung des mehrlagigen Trommelantriebs voran, führte entsprechende Untersuchungen durch und fertigte eine entsprechende Wickelanlage.

Die Kompetenzen der Professur Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz liegen u. a. in der Tribologie, der Förder- und Zugmitteltechnik sowie den Materialwissenschaften. Diese Kenntnisse waren von grundlegender Bedeutung für die konstruktive Entwicklung der Kabine in Holzleichtbauweise sowie zur tribologischen Auslegung des Antriebssystems. Die TUC begleitete das Projekt wissenschaftlich.

Die Firma Drahtseilwerke Hemer ist ein Spezialist in der Entwicklung von Drahtseilen. Um den technischen Anforderungen und Sicherheitsansprüchen gerecht zu werden, entwickelten und fertigten sie ein hammerverdichtetes Drahtseil für den Einsatz im Aufzugssystem.

Vogel GUT ACHTEN besitzt sowohl tiefgreifende Erfahrung in der Antriebstechnologie, der Aufzugtechnik, der Drahtseilentwicklung als auch in der Konformitätsbewertung und Richtlinienarbeit. Die Bündelung dieser Kompetenzen war für das Projekt von zentraler Bedeutung, um den Trommelantrieb und das Seil für eine Mehrlagenwicklung hinsichtlich der geforderten Lebensdauer und einer erfolgreichen Zertifizierung am Ende des Projekts auszuliegen.

Die Kernkompetenz der LiGenium GmbH liegt in der Entwicklung und Herstellung von technischen Bauteilen, Maschinenelementen und kompletten Anlagen in Holzbauweise. Sie brachte ihre Kenntnisse vorallem bei der Fertigung der Elemente für die Holzkabine ein.

Arbeitspakete

1. AP 1: Definition des Anforderungsprofils zum Bauen im Bestand an einen leichten Lift in Holzbauweise und einen platzsparenden Trommelantrieb mit hochbelastbarem Drahtseil für eine Mehrlagenwicklung unter besonderer Berücksichtigung der aktuellen Vorschriften und Normen (SLC, TUC, VOG, DWH)
2. AP 2: Entwicklung und Fertigung einer leichten, brandsicheren und hochbelastbaren Aufzugskabine in Holzbauweise (TUC, LIG, VOG)
3. AP 3: Konzeptionelle und konstruktive Auslegung des Antriebs und einer platzsparenden Trommel für einen maschinenraumlosen Aufzug (SLC, VOG, TUC)
4. AP 4: Entwicklung einer geeigneten Kombination von Trommel und Drahtseil zur Ermöglichung einer Mehrlagenwicklung auf kleinen Trommeldurchmessern und Aufbau einer geeigneten Testinfrastruktur (SLC, VOG, DWH, TUC)
5. AP 5: Erforschung und Analyse der mechanischen Eigenschaften der Holz-Halbzeuge sowie der gesamten Kabinenkonstruktion (TUC)
6. AP 6: Erforschung und Analyse der mechanischen Eigenschaften des gesamten Aufzugssystems sowie Durchführung der notwendigen Testreihen zur Lebensdauerermittlung der Seilkonstruktionen (TUC, SLC, VOG)
7. AP 7: Aufbau eines Prüfstands, finale Konstruktion und Überprüfung eines Demonstrators unter realen Einsatzbedingungen (SLC, TUC, VOG)
8. AP 8: Ausarbeitung geeigneter Ersatzmaßnahmen zur Erfüllung der Schutzziele der Aufzugrichtlinie. Frühzeitige Abstimmung und Durchführung eines Konformitätsprüfverfahrens mit einem Notified Body (SLC, VOG)

Zu Beginn des Projekts wird von allen Partnern ein umfassendes Anforderungsprofil für die normgerechte Auslegung des Aufzugsystems für Bestandsgebäude erstellt (AP1). Hierbei wird VOG sowie ein Notified Body unterstützen, um die Entwicklung gezielt an eine EU-Zertifizierung anzulehnen und die Markteinführung nach Abschluss des Projekts zu beschleunigen.

Den Großteil der folgenden Entwicklungen werden die SLC sowie die TUC übernehmen. TUC wird im Projekt eine leichte, brandsichere und hochbelastbare Aufzugskabine in Holzbauweise entwickeln und dabei durch LIG unterstützt, die auch die Fertigung der Bauteile und des Kabinenprototypen übernehmen (AP2). SLC übernimmt im Projekt die Entwicklung des platzsparenden Trommelantriebs, dessen Rillenausführung sowie die Fertigung aller weiteren Aufzugskomponenten für eine maschinenraumlose Lösung unter Berücksichtigung und Realisierung sekundärer Gewichtseinsparungen (AP3, AP4). Die Material- und Verfahrensentwicklungen bezüglich des Drahtseils wird DWH übernehmen, welche auch die Erzeugung der maßgeschneiderten Seile übernehmen. Ein geeigneter Prüfstand zur Lebensdauerermittlung wird von SLC gefertigt (AP4). In AP5 wird TUC die neue Holzkonstruktion eingehend testen und die Kabine hinsichtlich minimaler Geräuschentwicklung und mechanischer Festigkeit optimieren. Analog werden in AP6 die entwickelten Drahtseile hinsichtlich ihrer Verschleißerscheinungen untersucht und entsprechende Maßnahmen entwickelt, um die Lebensdauer der Drahtseile zu erhöhen. In AP7 wird SLC in Zusammenarbeit mit VOG und TUC die Einzelentwicklungen (Holzkabine, Trommel und Seil) zu einem neuartigen Gesamtaufzugskonzept verbinden. Nur durch die Verknüpfung der Einzelentwicklungen eines platzsparenden Trommelantriebs (SLC), eines mehrlagig gewickelten Drahtseils (DWH) sowie der leichten Aufzugskabine aus Holz (LIG und TUC), ist die Umsetzung des innovativen Gesamtsystems und die Anforderungen der Aufzugsrichtlinien (VOG) für den attraktiven Markt von Nachrüstlösungen zum „Bauen im Bestand“ zu erreichen. In AP8 werden die Ersatzmaßnahmen zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen begründet und das notwendige Konformitätsprüfverfahren vorbereitet und durchgeführt.

Meilensteine / Ziel- und Abbruchkriterien

Meilenstein #1:

Anforderungsprofil einer leichten Aufzugskabine in Holzbauweise und einen platzsparenden Trommelantrieb mit hochbelastbarem Drahtseil für eine Mehrlagenwicklung zum Einsatz in Bestandsgebäude definiert

- Erreichung: nach 1 Monat
- Zielerreichungskriterium: Anforderungsprofil erstellt
- mögl. Abbruchkriterien oder Alternative zur Fortsetzung: -

Meilenstein #2:

Aufzugskabine an Leichtbau, Brandsicherheit und mechanischer Belastbarkeit ausgelegt, simuliert und gefertigt

- Erreichung: nach 9 Monaten
- Zielerreichungskriterium : Brandsicherheit nach Norm, Maximale Zuladung 630 kg
- Abbruch, wenn: Simulationen und Messwerte den Zielwerten nicht entsprechen

Meilenstein #3:

Trommelantrieb an maschinenraumlose Anwendung angepasst, benötigte Leistung berechnet, Konstruktion (CAD) durchgeführt

- Erreichung: nach 9 Monaten
- Zielerreichungskriterium: Gesamtwirkungsgrad der Antriebseinheit >90%, Anfahrmoment <3.000 Nm, Nenngeschwindigkeit $\geq 0,63$ m/s
- Abbruch, wenn: der Trommelantrieb nicht ausreichend kompakt, geräuscharm oder leistungsstark ausgelegt werden kann

Meilenstein #4:

Trommel und Drahtseil aufeinander abgestimmt, um eine Mehrlagenwicklung zu ermöglichen

- Erreichung: nach 14 Monaten
- Zielerreichungskriterium: Reduktion des Trommeldurchmessers um 50% (ca. 150 mm), Reduktion des Verhältnisses von Trommel zu Seildurchmesser von 40 auf 25
- Abbruch, wenn: keine geeignete Kombination aus Drahtseil und Trommel für eine Mehrlagenwicklung gefunden werden kann, um die geforderten Lastwechsel zu erzielen

Alternative zur Fortsetzung: Untersuchung hybrider Seilkonstruktionen als Mischung aus Stahl- und hochfesten Kunststofffasern

Meilenstein #5:

Mechanische Eigenschaften der Holzhalbzeuge sowie der Kabine ermittelt

- Erreichung: nach 13 Monaten
- Zielerreichungskriterium: Gewichtsreduktion um ca. 25% auf 150 kg; Ertragbare Verzögerungen bei Not-Stopp oder Auslösen der Fangvorrichtung
- Abbruch, wenn: die mechanischen Tests nicht den Zielwerte des Anforderungsprofils erbringen

Meilenstein #6:

Benötigte mechanische Kennwerte sowie verschleißmindernde Behandlungsverfahren des Drahtseils ermittelt

- Erreichung: nach 19 Monaten
- Zielerreichungskriterium: Ertragbare Lastwechsel >600.000 Fahrten
- Abbruch, wenn: die Drahtseile trotz verschleißmindernder Maßnahmen nicht die erforderliche Ablegereife erreichen;

Alternative zur Fortsetzung: Bereitstellung fundierter Ersatzmaßnahmen auf Basis der Dauerversuche im Projekt

Meilenstein #7:

Finale Konstruktionsdaten ermittelt, Prüfstand/Demonstrator aufgebaut und unter realen Einsatzbedingungen getestet; vermarktungsfähiges Produkt vorhanden

- Erreichung: nach 24 Monaten
- Zielerreichungskriterium: Schachtkopfhöhe zwischen 2600 und 2800 mm, 12-fache Sicherheit, Kosten der Aufzugskabine um 30% und des Trommelantriebs um 10% gesenkt

- Abbruch, wenn: der Demonstrator den realen Einsatzbedingungen und Dauerbelastungstests nicht standhält

Alternative zur Fortsetzung: Verstärkungen und Änderung der Wickelgeometrie

Projektverlauf und Ergebnisse

Zu Beginn des Projektes wurden die mechanischen, physikalischen, räumlichen und baurechtlichen Anforderungen an die Kabine und das Gesamtsystem Aufzug in Form eines Lastenhefts detailliert zusammengestellt und zwischen den Partnern abgestimmt. Insbesondere wurde hier auf den Einsatzbereich in Bestandsimmobilien fokussiert, weil der mit den bisherigen am Markt verfügbaren Aufzugssystemen nicht abgedeckt werden kann.

Detaillierte Anforderungsparameter und die erforderlichen Merkmalsausprägungen für das Antriebssystem und die Kabine sind herausgearbeitet worden. Grundsätzlich festgelegt wurde die Ausführung nach Aufzugrichtlinie RL 2014/33/EU [5]. Die Vorgaben der Aufzugrichtlinie müssen zwingend eingehalten werden. Dabei soll sich die Konzeption weitgehend an den harmonisierten Normen DIN EN 81-20 [8] und DIN EN 81-50 [9] orientieren. Abweichungen von diesen Normen müssen explizit ausgewiesen und bewertet werden. Durch ein geeignetes Konformitätsbewertungsverfahren ist unter Hinzunahme eines Notified Body nachzuweisen, dass die Schutzziele der RL 2014/33/EU trotz der beabsichtigten Abweichungen eingehalten werden. Es soll eine Nutzlast bis zu 630 kg möglich sein. Nach [5] wird damit eine größte Nutzfläche des Fahrkorbs von 1,66 m² zulässig. Die Nutzfläche des Fahrkorbs muss begrenzt sein, um dessen Überbelastung mit Personen zu verhindern (DIN 81-20, 5.4.2.1.1). Die kleinste Nutzfläche des Fahrkorbs für einen Personenaufzug mit 8 Personen beträgt nach DIN 81-20 1,45 m² (DIN 81-20, 5.4.2.3, Tabelle 8). Auf dieser Basis wurde die Nutzfläche im für die Holzkabine auf einen Bereich von 1,45 m² bis 1,66 m² festgelegt. Es ist ein Ziel, dass die Kabinengrundfläche die größtmögliche Flexibilität hinsichtlich Breite zu Tiefe bietet, um bei der Nachrüstung in Bestandsgebäuden einen möglichst großen Anwendungsbereich abzudecken.

Entwicklung der Aufzugskabine

Konstruktionsgrundlagen

Die Wahl des Werkstoffs basiert auf Erfahrungen der TU Chemnitz [21], [22] und von Ligenium. Auf Grundlage der vorhandenen Kennwerte wurde für die Konstruktion der Kabinenstruktur WVC (Wood Veneer Composite, Holz furnierlagenverbundwerkstoff) in Form von hochwertigem Birken sperrholz in unterschiedlichen Materialstärken ausgewählt. Fehlende mechanische Kennwerte, welche für die Konstruktion und Materialverifikation entscheidend sind, wurden im weiteren Verlauf ermittelt.

Ein Faktor für die Werkstoffentscheidung ist neben den mechanischen Eigenschaften auch der ökonomische Aspekt. So ist Birken sperrholz sehr gut und vergleichsweise günstig am Markt verfügbar. Sonderwerkstoffe, wie Kunstharzpressholz erzielen merklich bessere mechanische Eigenschaften, durch den großen Fertigungsaufwand ist das Material jedoch auch deutlich teurer. Zudem ist die Dichte des Materials höher als bei Birken sperrholz, was Herausforderungen im Leichtbau zur Folge hat. Buchen furnierwerkstoffe haben im Vergleich zum Birken sperrholz dagegen nur leicht verbesserte mechanische Eigenschaften bei leicht erhöhter Dichte. Die Verwendung von geeigneten und am Markt verfügbaren Buchen furnierwerkstoffen ist mit höheren Kosten verbunden. Metallwerkstoffe weisen im Vergleich bedeutend bessere mechanischen Eigenschaften auf als Holzwerkstoffe. Werden diese jedoch auf die Dichte des Materials bezogen, so verändern sich die Verhältnisse. In Tabelle 1 ist deutlich zu erkennen, dass die Biegefestigkeit des Holzwerkstoffes im Verhältnis zu seiner Dichte ein zu den Metallwerkstoffen vergleichbares und je nach Werkstoff sogar besseres Niveau erreicht [10]. Dies bedeutet, dass mit der gleichen Masse an Werkstoff die gleichen Lasten getragen werden können. Lediglich das Volumen unterscheidet sich (geringere Dichte des Holzes). Das Elastizitätsmodul ist dagegen bei Holzwerkstoffen meist geringer ausgeprägt. Das niedrigere Elastizitätsmodul hat größere Verformungen bei identischer Bauweise zur Folge. Diesem Punkt kann mit konstruktiven Lösungen begegnet werden. Durch den mehrlagigen Aufbau des Sperrholzes ist es weiterhin möglich die richtungsabhängigen Eigenschaften gezielt einzusetzen.

Tabelle 1: mechanische Kennwerte im Vergleich und mechanische Eigenschaften im Verhältnis zur Werkstoffdichte

Kennwert	Birkensperrholz	S235 [21]	AW-6060 [25]
Dichte in g/cm^3	0,68	7,85	2,7
Biegefestigkeit in MPa	60	360	130
Spezifische Biegefestigkeit in $\frac{\text{MPa}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$	0,88	0,046	0,048
Elastizitätsmodul in MPa	6569	212.000	69.500
Spezifischer Elastizitätsmodul in $\frac{\text{MPa}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$	9,66	27,01	25,74

Werkstoffe werden nach der DIN 13501-1 [10] mit aufsteigender Entflammbarkeit in die Klassen A1 bis F eingeordnet. Mit spezieller Brandschutzbehandlung können Sperrhölzer der Baustoffklasse B (schwer entflammbar) zugeordnet werden [26]. Aus Kostengründen wurde sich gegen den Einsatz von Material der Klasse B entschieden, da es durch die aufwendige Brandschutzbehandlung relativ teuer ist. Dies würde zudem den ökonomischen Vorteil der Holzbauweise reduzieren. Weiterhin ist das Recycling von brandschutzbehandelten Holzwerkstoffen, je nach verwendetem System, erschwert, was mit ökologischen Nachteilen einhergeht. Folglich wurde entschieden, die Aufzugskabine mit unbehandeltem Sperrholz umzusetzen. Dieses wird keiner besonderen Werkstoffbehandlung unterzogen. Diese Holzwerkstoffe sind der Klasse normal entflammbar D zuzuordnen [27]. Der Brandschutz wird über eine Brandfallsteuerung des Aufzugsystems umgesetzt. Das Vorgehen ist mit dem im Projekt beteiligten Sachverständigen sowie der zugelassenen Stelle eng abgestimmt.

Konstruktionsdetail: Fangrahmen

Zentraler Bestandteil einer jeden Aufzugskabine ist der Fangrahmen. Dieser ist meist eine O-förmig ausgebildete tragende Struktur, welche die gesamten wirkenden Kräfte des Aufzugs aufnimmt und überträgt. An diesem sind Führungen, Fangvorrichtung, Seil bzw. Seilrolle und die Kabine selbst befestigt. Zunächst wurden erste Konzeptentwürfe im CAD erstellt und verglichen. Entscheidende Kriterien sind der Holzbaugrad (Anteil der Holzwerkstoffe in der Struktur), der Fertigungs- und Montageaufwand sowie die erfahrungsbasierte Tragfähigkeitsabschätzung.

In Folge einer Konzeptbewertung wurde eine Vorauswahl getroffen und die Tragfähigkeit der Struktur rechnerisch nachgewiesen.

Ein erster Konzeptentwurf eines solchen Fangrahmens wurde früh im Projekt statisch geprüft (Abbildung 13 bis Abbildung 15). Für den Fangrahmen des Aufzugs wurden primär Hohlprofile aus Birkensperrholz eingesetzt. Diese Profile bieten gute mechanische Eigenschaften bei gleichzeitig geringem Gewicht. Nach dem erfolgreichen Versuch des ersten Fangrahmenversuchskörpers wurde ein Prototypentwurf der Konstruktion vorgenommen (vgl. Abbildung 2).

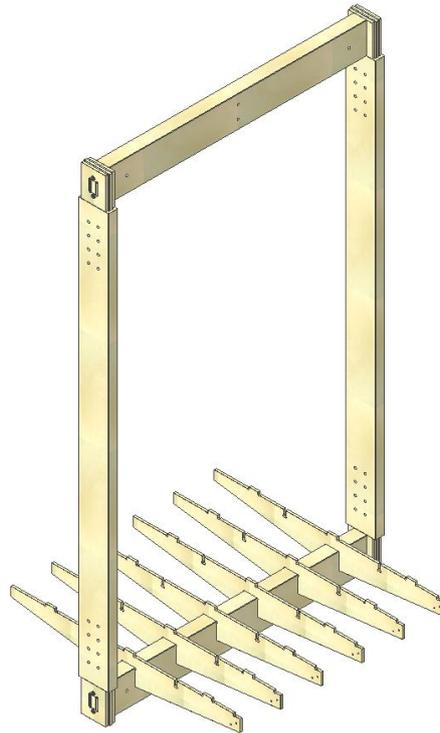


Abbildung 2: Fangrahmen mit aufgesteckter Bodenstruktur

Quelle: TU Chemnitz

Um den Bauraum im Aufzugsschacht möglichst effizient nutzen zu können, wurde entschieden, die Führungen und Fangvorrichtung nicht direkt auf dem Fangrahmen zu montieren. Diese Bauweise hat eine exzentrische Montage der Führungen zur Folge, ermöglicht jedoch eine breitere Kabine. Die Fangvorrichtung ist direkt mit dem Fangrahmen als lastleitendes Bauteil verbunden. Dadurch sind Lasteinleitung und -verlauf mittels Formschluss stets gewährleistet.

Konstruktionsdetail: Eckverbinder

Die Eckverbinder des Fangrahmens bestehen aus einem mehrlagigen Aufbau von Birkensperrholzplatten. Diese gewährleisten über reinen Formschluss die Verbindung des vertikalen und horizontalen Trägers (Abbildung 3).

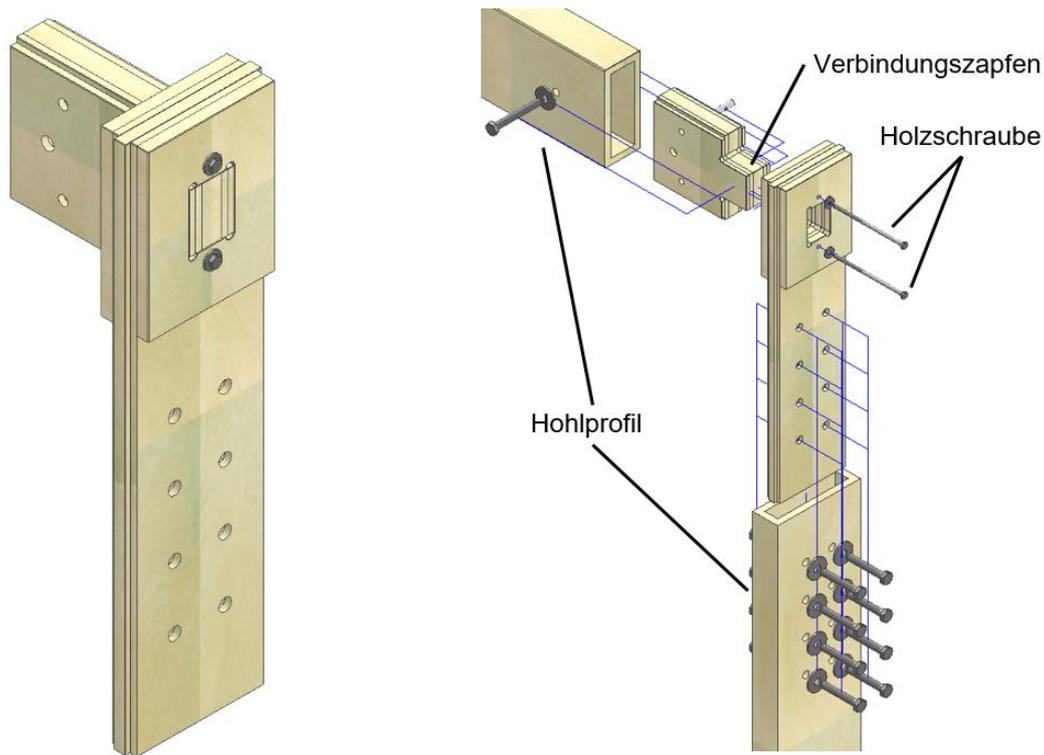


Abbildung 3: Eckverbinder mit mehrlagigem Aufbau und verzapfter Bauweise

Quelle: TU Chemnitz

Diese Verbindung ermöglicht es, eine 90-Grad-Ecke vollständig aus Standardholzwerkstoffen zu fertigen ohne Klebstoff einsetzen zu müssen. Das macht die Herstellung des Grundmaterials und auch den Zusammenbau vergleichsweise schnell. Die Einzelteile des Verbinders sind relativ einfach aufgebaut und lassen viel Spielraum für Variationen, abhängig von diversen konstruktiven Parametern oder Einsatzfällen. Die Befestigung der beiden Hohlprofile an dem Eckverbinder erfolgt über Passschrauben. Diese Verbindung ist auf eine Kraftübertragung über Lochleibung ausgelegt. Auf Grund des speziellen Setzverhaltens von Holzwerkstoffen bei Schraubverbindungen mit Vorspannung (gleitfest vorgespannte Verbindungen, GV) wurde sich im ersten Schritt einer formschlüssigen Lösung bedient. Der Bonus aus dem Tragverhalten des GV-Verbindungsanteils kann nachfolgend zur Reduzierung der Schraubenanzahl genutzt werden.

Konstruktionsdetail: Kabine

Die Abmessungen der Kabine orientierten sich zum einen an der nach Norm vorgegebenen maximalen Grundfläche für Aufzüge mit 630 kg Nutzlast (bis $A = 1,66 \text{ m}^2$). Weiterhin sind die Abmessungen der Aufzugstür entscheidend gewesen, da es sich bei dieser Komponente um ein Zukaufteil handelt. Bei der Konstruktion der Kabine wurde bewusst darauf geachtet, die Verbindungen der einzelnen Bauteile möglichst einfach auszuführen.

Die Seitenwände sind so ausgeführt, dass deren oberer Bereich gleichzeitig die Fußleiste für die Dachfläche ausbildet (Abbildung 4).

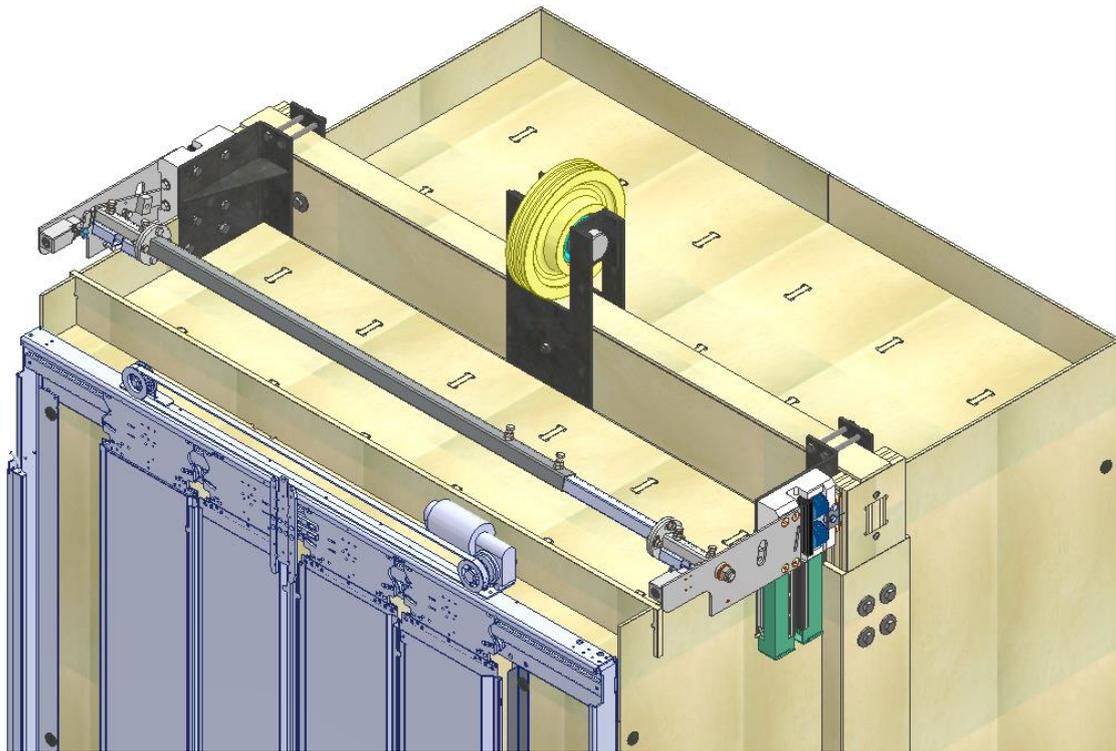


Abbildung 4: Kabinendach mit überstehenden Seitenwänden als Fußleiste

Quelle: TU Chemnitz

Diese ist nach der gültigen Norm vorgeschrieben, um einen Mechaniker auf dem Aufzugsdach vor einem Sturz zu schützen. Über solche Maßnahmen der integrierten Funktionen konnte die Teileanzahl reduziert werden. Die einfache Bauweise ermöglicht es, die Kabine erst vor Ort zusammenzusetzen. Damit sind sehr enge Zuwegungen möglich und das Transportvolumen wird erheblich reduziert. Dieser Mehrwert für den Transport ist in Abbildung 5 dargestellt. Lediglich die Eckverbinder sind in der Darstellung bereits vormontiert. Peripheriekomponenten sind im Bild nicht enthalten.



Abbildung 5: Aufzugskabine demontiert

Quelle: TU Chemnitz

Unter Nutzung der vorgehend beschriebenen Einzelkomponenten wurde eine vollständige Aufzugskabine inklusive der Peripherie im CAD umgesetzt (Abbildung 6).

Bereits mit diesem ersten vollständigen Prototyp konnte die Masse basierend auf dem CAD-Modell um etwa 40% reduziert werden im Vergleich zum Stand der Technik. Als Grundlage dafür diente eine Aufzugskabine der gleichen Lastklasse und vergleichbaren Größe in etablierter Stahlbauweise des Projektpartners SLC. Die Masse der Kabine in Holzbauweise wurde im CAD auf Basis der Konstruktion in Abbildung 6 errechnet und durch einige erforderliche Anbauteile ergänzt (z. B. Beleuchtung, Bedientableau etc.).

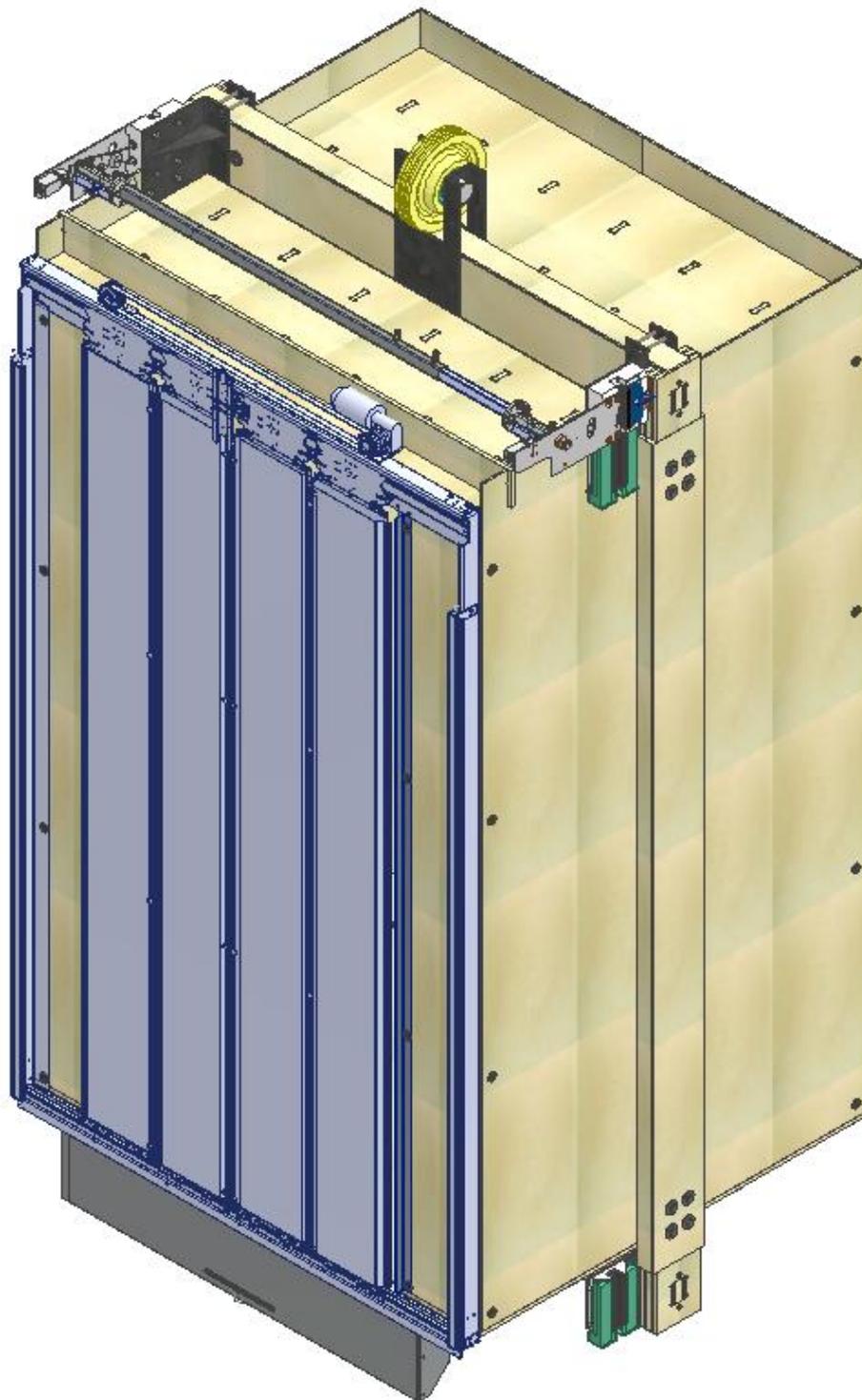


Abbildung 6: CAD-Modell der Aufzugskabine mit allen Peripheriebauteilen

Quelle: TU Chemnitz

In Abbildung 7 ist der fertige Prototyp der Aufzugskabine abgebildet. Dieser verfügt bereits über die Vorbereitung zur Montage zugekaufter Peripheriekomponenten. Die Farbe der Kabine ist auf die werkseitige Beschichtung der Holzwerkstoffe zurückzuführen. Diese Schicht bildet eine zusätzliche Barriere gegen

Feuchtigkeit, UV-Strahlung und mechanische Einwirkungen und schützt das Holz selbst. Lediglich die Schnittkanten sind unbeschichtet. Eine umfangreiche Lackierung der gesamten Kabine wird dadurch vermieden. Aus den Erfahrungen bei der Fertigung und Montage wurde diversives Verbesserungspotential an den Komponenten und der Bauweise aufgenommen z.B. hinsichtlich Bauteilform und Verbindungstechnik. Diese Punkte werden in die nächste Variante in die Konstruktion eingepflegt. Damit wird die Fertigbarkeit verbessert und perspektivisch die Masse reduziert.



Abbildung 7: Prototyp der vollständigen Aufzugskabine mit einigen Anbauteilen

Quelle: TU Chemnitz

Gestaltung des Antriebs

Sautter Lift Components hat mehrere Antriebskonzepte untersucht, die zur Realisierung einer maschinenraumlosen Lösung in Frage kommen. Grundsätzlich sollte die gesamte Antriebseinheit möglichst wenig Bauraum in Anspruch nehmen, um ihn im Schachtkopf unterzubringen und zusätzlich möglichst leicht

sein, um das Gewicht ohne zusätzliche Befestigungspunkte im Schachtkopf über die Führungsschienen in die Schachtgrube ableiten zu können.

In modernen Treibscheibenaufzügen für Neubauten werden heute fast ausschließlich Synchro-Gearless-Antriebe eingesetzt, da diese einen Antriebswirkungsgrad von bis zu 96% ermöglichen. Im Vergleich dazu liegt der Wirkungsgrad bei einem Planetengetriebe bei ca. 87% und bei einem konventionellen Schneckengetriebe nur zwischen 70 und 82%. Der große Nachteil dieses Antriebs liegt in seiner - im Verhältnis zum Antriebsmoment großen - Baugröße. Antriebe mit Planetengetriebe und moderne Schneckengetriebe weisen ein besseres Verhältnis von Antriebsmoment zu Baugröße auf. Dadurch können sie mit größeren Treibscheiben- oder Trommeldurchmessern arbeiten. Im Forschungsvorhaben wurde dieser Nachteil durch den Einsatz einer Leichtbaukabine und durch die Reduzierung des Trommeldurchmessers aufgrund der Mehrlagenwicklung jedoch erfolgreich ausgeglichen.

Für die weiteren Arbeiten fiel deshalb die Wahl auf einen getriebelosen Synchronmotor (Abbildung 8), der auch in konventionellen Aufzugskonzepten mit Gegengewicht zum Einsatz kommt.

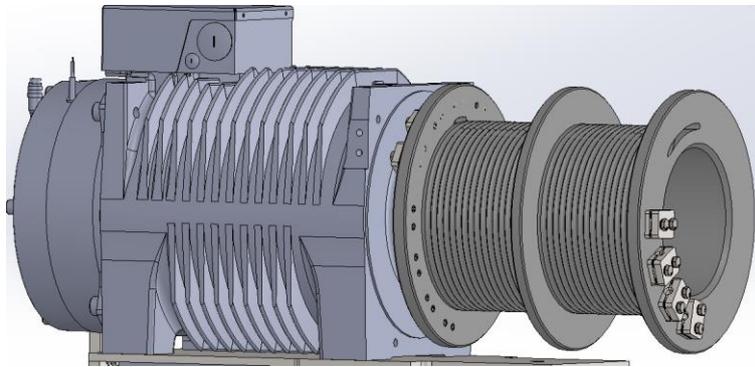


Abbildung 8: Gearlessantrieb mit doppelter Seiltrommel und spezieller Rillung (sog. Lebusschlag)

Quelle: SLC

Der Einsatz der Holzleichtbaukabine reduziert das erforderliche Antriebsmoment so stark, dass dieser Antrieb auch ohne Gegengewicht eingesetzt werden kann. Die Entwicklung der Seiltrommel ist eng mit dem des Drahtseiles verknüpft. Für die Seiltrommel wird eine Doppelanordnung eingesetzt, da die europäischen Normen auch zukünftig mindestens zwei unabhängige Tragmittel vorschreiben. Der Lebusschlag (spezielle Rillung) ist wegen der störungsfreien und seilschonenden Spulung bis in höhere Lagen erforderlich.

Der Motor wird per Längsanordnung (Abbildung 9) auf Schwingungsisolationselementen verbaut, die den Antriebsträger von Vibrationen des Motors entkoppeln. Um das erforderliche Antriebsmoment weiter zu reduzieren, wird die Kabine 2:1 aufgehängt. Das bedeutet, dass die Last auf zwei tragende Stränge übertragen wird und so die anzutreibende Kraft und das erforderliche Antriebsmoment bei gleichem Scheibendurchmesser halbiert werden kann. Dazu ist eine Umlenkrolle am oberen Querholm des Fangrahmens (siehe Abbildung 10) erforderlich. Die 2:1-Aufhängung reduziert zwar das Antriebsmoment hat aber eine Schachtkopfhöhe von 3.400 m zur Folge. Damit wird das angestrebte Ziel, eine Schachtkopfhöhe unter 3m zu erreichen, zunächst verfehlt.

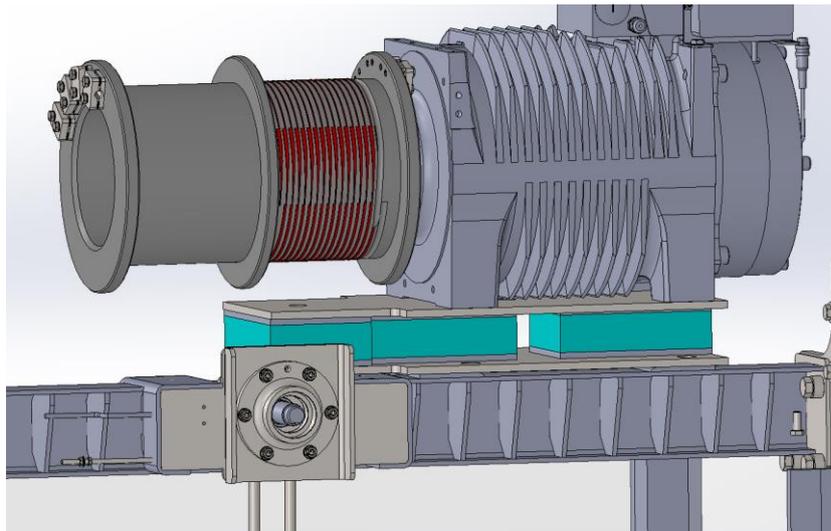


Abbildung 9: Entwurf des Antriebsträgers mit längs eingebauter Motorbaugruppe

Quelle: SLC

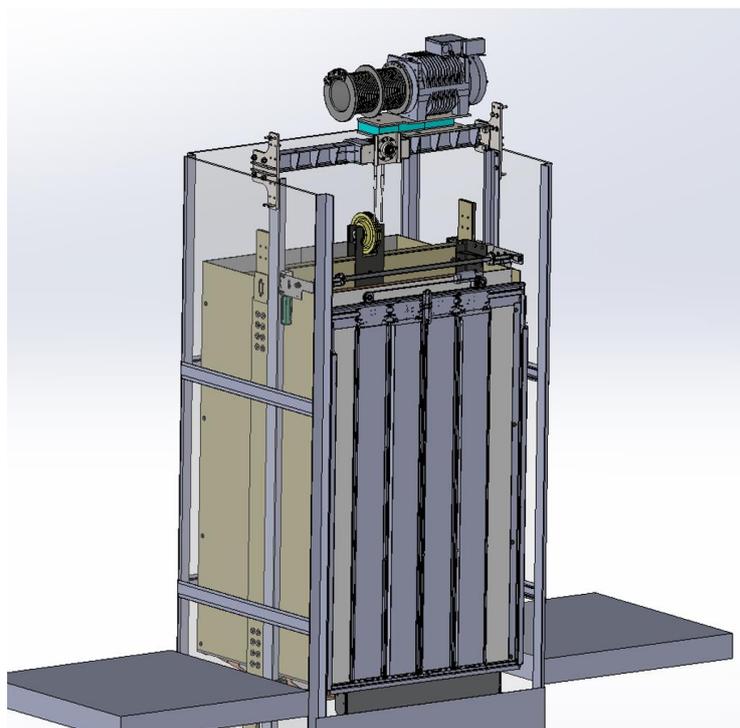


Abbildung 10: 2:1-aufgehängte Kabine

Quelle: SLC

Der erforderliche Schutzraum nach DIN EN 81-20: 5.2.5.7.1 für einen Servicetechniker in hockender Position wird eingehalten. Das prototypisch realisierte Aufzugskonzept ohne Gegengewicht ermöglicht eine Schachtausnutzung von knapp 77%. Die Holzkabine mit einer 4-teiligen Schachtschiebtür wird hierbei in ein verglastes Schachtgerüst eingebracht.

Die Kabinengrundfläche von 1,61 m² entspricht damit einem 8-Personen Aufzug mit 620 kg Nutzlast nach DIN EN 81-20: 5.4.2.1.3 bzw. DIN EN 81-20: 5.4.2.3.1.

Ein vergleichbarer Aufzug mit Gegengewicht würde eine um fast 30% größere Schachtgrundfläche erfordern. Bei diesem konventionellen Aufzug betrüge die Schachtausnutzung so nur 59,1%.

Um eine vergleichbare Kabinengröße, wie mit dem gegengewichtslosen Trommelaufzug zu erreichen, müsste die Schachtgrundfläche für den konventionellen Aufzug um ca. 26% vergrößert werden.

Der Gewichtsvergleich der neu entwickelten Holzkabine mit einer konventionellen Kabine aus Stahlblech zeigt die Gewichtseinsparung deutlich auf. Während die konventionelle Kabine mit Fangrahmen eine Masse von 351 kg aufweist, ist die Holzkabine mit nur 156 kg um über 55% bis 60% leichter. Das reduziert das erforderliche Antriebsmoment wesentlich.

Gestaltung des Drahtseils

Bei der Mehrlagenwicklung sind die Steigungszonen innerhalb einer Seillage von Lage zu Lage mit Kontaktzonen verbunden. Hier haben die Seile unvermeidlichen punktuellen Kontakt zueinander (Abbildung 11). Die Mehrlagenwicklung kann nur dann störungsfrei arbeiten, wenn Stahlseile eine hohe Gefügetreue haben und ihre runde Struktur im Betrieb behalten. Zudem ist insbesondere in den Kontakten „Lage-zu-Lage“ ein Verzahnen der Litzen und der Drähte in den Litzen zu minimieren. Die Anwendung im Aufzug hat – z. B. gegenüber dem Kran – die Besonderheit, dass die Sicherheiten hoch und damit die Seilkräfte klein sind. Eine Unterstützung der Seilstruktur aus der Belastung im Betrieb fällt nahezu weg und muss auf andere Weise erzeugt werden. Der Lagewechsel wird durch zusätzlich angebrachte passive Spulhilfen, sog. Kicker, optimiert, um ein Aufsteigen an der Bordwand und Stöße zu verhindern. Als vorteilhaft hat sich eine Seilkonstruktion mit nur acht Außenlitzen erwiesen, da sie in idealer Weise die Forderung nach Abriebfestigkeit (durch dickere Drähte) und guten Auflageverhältnissen vereint [34]. Dies wird durch Ermüdungsbiegetests aus der Literatur und Erfahrungen in der Aufzugpraxis bestätigt. Die Stahleinlage sorgt für die hohe Quersteifigkeit. Eine abschließende Verdichtung des gesamten Seiles führt zu einem runden Seil mit kleinstmöglicher Ovalität (unter 0,1 mm) und einer glatten, reibungsreduzierten Oberfläche (Abbildung 12). Zudem lassen sich die Betriebsdurchmesser engtoleriert auf die Vorgaben der Trommelrillung einstellen. Das gewählte Seil „Taurus 825 CS“ mit Hammerverdichtung hat einen Ist-Durchmesser von 8,22 – 8,26 mm, d. h. die Ovalität ist klein und das Übermaß mit ca. 2,8 – 3,2% innerhalb einer engen Toleranz. Die rechnerische Bruchkraft und die Mindestbruchkraft ist für die Nennfestigkeit der Drähte in der Tabelle aus Abbildung 12 zu entnehmen.

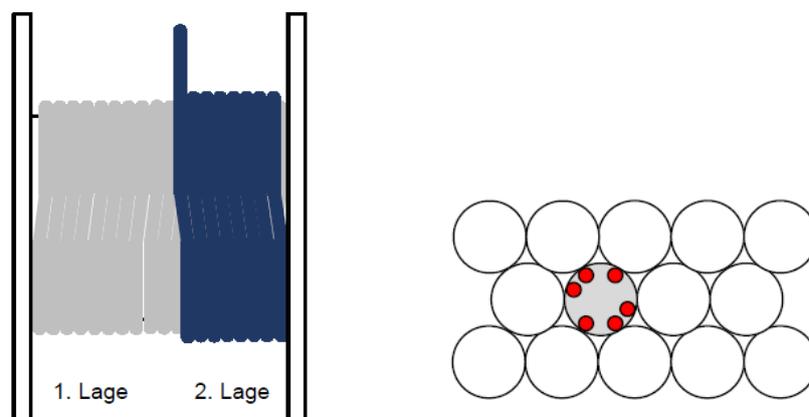
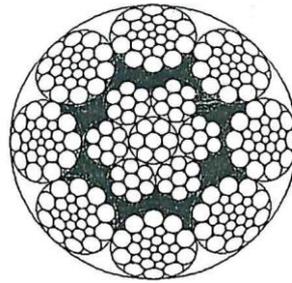


Abbildung 11: Kontaktzonen Seil-Seil in Mehrlagenwicklung

Quelle: [35]



Nenn-Durchmesser Nominal-Diameter mm	ca. Längen-Gewicht approx. Mass (weight) kg/m	Rechnerische Bruchkraft Calc. breaking load		Mindest- Bruchkraft Minimum breaking load	
		1960 N/mm ² kN	2160 N/mm ² kN	1960 N/mm ² kN	2160 N/mm ² kN
8	0,29	70,34	77,52	56,98	62,79

Abbildung 12: Stahlseil Elevation 8x26 Warrington-Seale IWRC kunststoffummantelt zusatzverdichtet dnenn=8,0 mm (DWH Taurus 826 CS)

Quelle: [36]

Die Nachbehandlung der Seile ist in eine mechanische und eine schmierungstechnische Nachbehandlung unterteilt. Die mechanische Nachbehandlung erfolgt auf Hammerwerken, die das langsam durchlaufende Seil rundum verdichten. Die Herausforderung bei diesem Verfahren besteht in der Gleichmäßigkeit der Verdichtung über den Umfang und die Seillänge. Wesentlich ist es, überschüssige Schmiermittelanteile abzustreifen, um in der Montage keine Wickelstörungen durch Fettansammlungen zu erzeugen. Diese Fettansammlungen sind bei kleinen Lasten störend. Bei großen Lasten, wie im Kran, werden diese Überschüsse aus den Kontaktzonen herausgedrückt. Zudem ist eine Verschmutzung der Schachträume bzw. der direkten Umgebung des Aufzugs durch mäßige Seilschmierung vermeidbar. Von der Drahtseilforschung ist bekannt, dass die Biegeewecheigenschaften bei kunststoffummantelten Seilen größer ist als bei nicht ummantelter Stahleinlage [37], [38], [39], [40], [41].

Allerdings bringt eine Kunststoffummantelung der Stahleinlage auch mögliche Nachteile in einer Mehrlagenwicklung mit, da die Quersteifigkeit herabgesetzt werden kann, weitere Prozessschritte der Verseilung (Extrusion der Stahleinlage) vorgeschaltet sind, Verseilungen mit Drehgestellen notwendig werden, etc. Es ist gelungen, in dem eingesetzten Taurus 826 CS 8 mm Seil die Vorzüge kleine Ovalität, Rundheit/glatte Seiloberfläche und hohe Querstabilität bei der Aussicht auf gute Biegeewecheigenschaften umzusetzen.

Der Montageleitfaden des neuartigen Seils wird schlussendlich aus den Ergebnissen der Untersuchungen aus den Dauerversuchen, den Erfahrungen aus der Seilmontage im Aufzug allgemein und für die Mehrlagenwicklung im Besonderen entwickelt. Da es sich um eine Baustellenmontage bzw. vor-Ort-Auflegen der Seile handelt, ist die händische Vorspannung zu wählen. Die Lagen sind geordnet zu bewickeln, wobei der Antrieb dafür in Inspektionsgeschwindigkeit eingesetzt wird. Die Seilenden auf der Trommel sind mit einem Anzugsmoment von mindestens 35 Nm anzuziehen. Die Vorspannung ist bei den Wartungen zu kontrollieren. Eine Bepulung der Trommeln z. B. mittels einer Spillwinde ist nur bei der Erstlieferung möglich. Da die Aufzugslebensdauer größer ist als die Tragmittellebensdauer, muss mit Seilwechsell gerechnet werden. Eine Einstellung der Seilvorspannungen nach Seiltausch vor Ort ohne Windenabbau wird möglich sein. Die Einbaupraxis wurde im Rahmen der Dauerversuche erforscht.

Berechnungen

Aufzugskabine

In der Berechnung der Aufzugskabine wurde sich auf die Dimensionierung des Fangrahmens fokussiert. Die Berechnungen basieren dabei auf der zweiten konstruktiven Iterationsstufe des Fangrahmens (vgl. Punkt „Fangrahmen, Prototyp 2 – Dauerversuch“ bzw. Abbildung 21). Die Durchbiegung der Bodenstruktur wurde analysiert, ist aber in Bedeutung dem Rahmen nachgeordnet. Die Nutzlast der Kabine wurde entsprechend der gewählten Kategorie mit 630 kg vorgegeben. Die Eigenmasse wurde aus dem finalen CAD-Modell entnommen.

In die Berechnung wurden verschiedene Abminderungsfaktoren für Feuchtigkeit, Temperatur und für Ermüdung durch Dauerbelastung einbezogen um die konkrete Einsatzsituation entsprechend zu berücksichtigen. Die Anzahl der Lastwechsel wurde vom Projektpartner SLC an Hand eines Vergleichsaufzugs ermittelt. Es wurde eine Dauerbelastung von zwei Millionen Lastwechsel während der Lebensdauer festgelegt. In Summe wurden die relevanten Steifigkeiten und Festigkeiten abgemindert.

Nach der DIN81-20 ist für eine Dauerbelastung der Struktur ein Sicherheitsfaktor von 1,2 (entspricht 10,7 kN) und für den Fall des Ansprechens der Bremsvorrichtung von ein Sicherheitsfaktor 2 (entspricht 17,85 kN) auf die wirkende Gesamtmasse anzusetzen. Die vorgehend erwähnten Lasten des Versuchs orientierten sich an den zuvor im Lastenheft definierten Bedingungen und setzen sich aus der Gewichtskraft der Kabine selbst und der maximalen Zuladung zusammen. Als Grundlage für die statischen Berechnungen des Fangrahmens und der Verbindungselemente sind Werkstoffkennwerte aus eigenen Versuchen und öffentlich zugänglichen Fachquellen [18] genutzt worden. Die Dimensionierung orientiert sich an der DIN 1995-1 [19], modifiziert und angereichert mit Erfahrungen aus dem Maschinenbau, um dem speziellen Anwendungsfall unter Leichtbauaspekten zu genügen.

Eckverbinder

Die Eckverbinder, welche die vertikalen und die horizontalen Rahmenelemente im Fangrahmen verbinden, wurden im ersten Schritt nach DIN 1995-1 [19] ausgelegt. Basierend auf dem gewählten Verbindungsmittel, einer M12 Passschraube, wurde anhand der materialspezifischen Lochleibung die erforderliche Anzahl an Verbindungsmitteln bestimmt. In ersten Versuchen wurde mit acht Passschrauben je Eckverbinder gearbeitet um jeweils die maximale Traglast in jedem Eckverbinder abzudecken. In einer detaillierten analytischen Auswertung der Belastungen konnte die Anzahl der erforderlichen Verbindungsmittel auf vier reduziert werden, unter der Annahme, dass sich die Traglast gleichmäßig auf beide Seiten verteilt. Bei einer Gesamtlast von 17,85 kN in Folge von Eigenmasse und Nutzlast mit dem Sicherheitsfaktor $S = 2$ und einer Tragfähigkeit einer Passschraubenverbindung über Lochleibung von 2,59 kN, sind folglich je Rahmenseite und Eckverbinder vier Verbindungsmittel erforderlich (rechnerisch sind 3,45 Verbindungsmittel ausreichend).

Es wurde entschieden, die Tragfähigkeit ausschließlich über die Lochleibung zu gewährleisten, da der Abfall der Schraubenvorspannkraft in Holzwerkstoffen derzeit nicht verlässlich kalkulierbar ist. Entsprechend sind auf jeder Rahmenseite in jeder Eckverbindung mindestens vier M12-Passschrauben einzusetzen. Die Verbindung der Einzelkomponenten des Eckverbinders ist über eine Verzapfung umgesetzt. Die lastragenden Bereiche der Verzapfung wurden auf Zug bzw. Schub analytisch geprüft. Weiterhin wurde für das Ansprechen der Bremsvorrichtung die Belastbarkeit des Querträgers ermittelt. Da die Bremse außermittig verbaut ist, wirken bei einem Ansprechen tordierende Kräfte auf den Querträger (vgl. Punkt „Fangrahmen, Prototyp 2 – Fangversuch“ bzw. Abbildung 23). Durch ein geringes Spiel in den Führungen werden diese teilweise aufgenommen. Es wurde rechnerisch ermittelt, dass für einen ideal steifen Führungsschuh eine Querträgertorsion von 0,177 Grad zu erwarten ist. Darauf basierend wurde eine Torsionsspannung von 2,89 MPa im Zapfen des Eckverbinders ermittelt. Dieser Wert liegt deutlich unterhalb der zulässigen Torsionsspannung, welche aus der zulässigen Schubspannung errechnet wurde [19].

Erprobungen

Fangrahmen, Prototyp 1 – statische Versuche

Für die Validierung der Eignung einer Holzleichtbaukonstruktion wurden umfangreiche Versuche durchgeführt. Die erste Iteration des Fangrahmens wurde in zwei verschiedenen Ausführungen statisch geprüft. Dabei wurde zwischen einem hohlen und einem massiven Querträger unterschieden. Zusätzlich zur Prüfung des Gesamtverhaltens des Fangrahmens unter Last sollte insbesondere die Eckverbindung getestet werden. Der horizontale Träger wurde in eine Aussparung des vertikalen Trägers eingesetzt (vgl. Abbildung 13). Gegen ein horizontales Verrutschen wurde bei dem massiven Träger ein Formschlusselement in den Querträger eingefräst. Den Hohlträger sichern einzelne Metallstifte (Abbildung 14). Die vertikale Fixierung ist durch zwei Gewindestangen je Seite umgesetzt worden. Mit einer Metallkappe über den Querträgern wurden diese zusammengepresst und auf den vertikalen Träger aufgepresst (Abbildung 13).



Abbildung 13: statischer Zugversuch mit Fangrahmenprototyp, Fall A

Quelle: TU Chemnitz



Abbildung 14: Fangrahmenprototypen mit hohlem (Fall A) und massivem (Fall B) Querträger, eingesteckt in den vertikalen Träger

Quelle: TU Chemnitz

Die Gewindestangen wurden jeweils mit 5 kN vorgespannt. Da eine Vorspannung für das Funktionsprinzip nicht erforderlich oder relevant ist, wurde der Wert so gewählt, dass durch ein Setzen der Fügepartner der Formschluss nicht gefährdet wird. Der Kraftfluss liegt in diesem Fall vollständig in den beiden Gewindestangen. Die Prüfgeschwindigkeit im Versuch lag bei 10 mm/min und die Holzfeuchte bei 7,86%.

Im Versuchsaufbau wurde der Fangrahmen am unteren Querträger mittig mit einer Platte auf dem Maschinentisch befestigt und mit einer identischen Platte mittig am oberen Querträger gezogen (vgl. Abbildung 15). Dies entspricht etwa der Belastungssituation im realen Betrieb.

Es wurden drei Fälle unterschieden:

- Statik Fall 1 (1,2 x F)

Die Prüfung der Struktur mit hohlem bzw. massivem Querträger erfolgte zehn Mal direkt hintereinander bis zur 1,2-fachen Last (10,94 kN) der beladenen Kabine (Fall 1). Dieser Faktor ist für übliche Betriebszustände in der Norm vorgesehen. Die Wiederholung diente der Beurteilung des unmittelbaren Setzens der Eckverbindung.

- Statik Fall 2 (2 x F)

Im Anschluss wurde die Struktur ein Mal mit etwa der doppelten Last (20 kN) geprüft (Fall 2). Dieser Faktor ist für das Ansprechen der Fangvorrichtung vorgegeben. Die Struktur tolerierte die Belastungen und es wurden keine Beschädigungen entdeckt. Lediglich die Metallkappen der Eckverbinder verformten sich leicht. Ein Setzen der Verbindung konnte in der Versuchswiederholung in keinem Fall beobachtet werden.



Abbildung 15: Fangrahmen in der Prüfmaschine eingespannt

Quelle: TU Chemnitz

■ Statik Fall 3 (Bruch)

Anschließend wurde die Struktur bis zum Bruch per Druckversuch belastet (Prüfaufbau siehe Abbildung 16).

Die Messergebnisse der drei Prüffälle zeigen, dass der hohle Querträger eine bedeutend geringere Steifigkeit aufweist. Die unterschiedlichen Baugruppensteifigkeiten hatten auch eine unterschiedliche Verformung zur Folge.

Während der massive Träger (Fall B) eine Bruchkraft von 80,35 kN aufwies, erzielte der hohle Träger (Fall A) eine Bruchkraft von 36,6 kN. Beide Kräfte liegen deutlich oberhalb der geforderten und auftretenden Kräfte im Betrieb des Aufzugs. Durch den sehr geringen Probenumfang dienen die Werte lediglich als Orientierung und sind statistisch nicht belastbar. Da auch der Hohlträger die auftretenden Lasten toleriert, wird sich aufgrund des Masseunterschieds für den weiteren Verlauf für diese Bauweise entschieden.

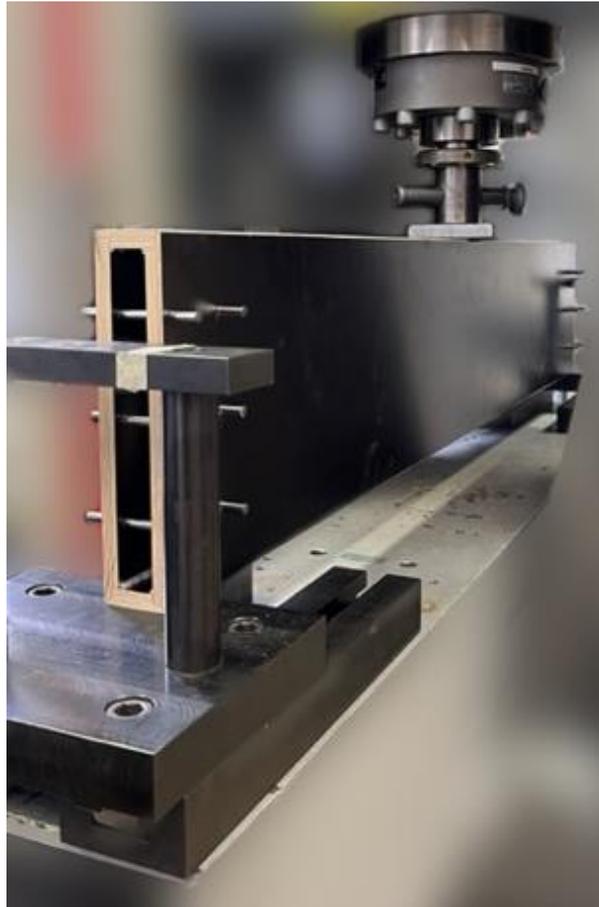


Abbildung 16: Hohlprofil in der Dreipunktbiegung zur Bestimmung der Bruchkraft

Quelle: TU Chemnitz

Fangrahmen, Prototyp 1 – Dauerversuche

Zur Beurteilung der Vorspannkraft in den Schraubverbindungen wurden folgend zwei Schraubverbindungen eines Eckverbinders (diagonal versetzt) mit Ringkraftsensoren ausgestattet (vgl. Abbildung 17).

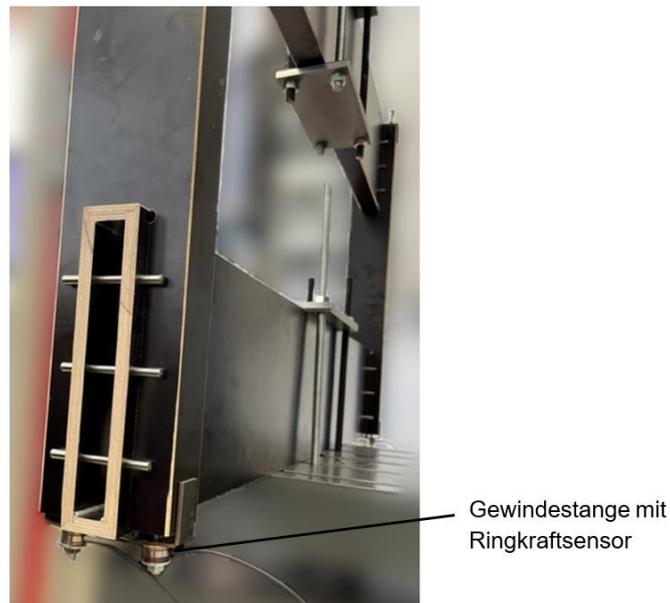


Abbildung 17: verspannter Fangrahmen mit Ringkraftsensoren

Quelle: TU Chemnitz

Ziel war es, den Verlauf der Vorspannkraft über die Zeit in zwei Fällen aufzuzeichnen.

- Fall I: Setzverhalten ohne externe Belastung
- Fall II: Setzverhalten mit externer Ermüdungsbelastung (zweifach Last, Belastungsdauer: 36 Stunden, Belastungsfrequenz: 2 Hz)

Bei Fall I wurden beide Schraubverbindungen mit 50 Nm angezogen, anschließend wurde die Baugruppe für 11 Tage nicht beansprucht. Dieses Vorgehen wurde aufgrund eigener Erfahrungswerte gewählt. Zu Beginn wurden sehr stark voneinander abweichende Vorspannkraften beobachtet, welche sich im Verlauf annäherten und anschließend fast parallel weiter abfielen (Abbildung 18).

Einzelne Ausreißer zu Beginn der Messung werden auf einen fehlerhaften Einzelwert der Sensoren zurückgeführt.

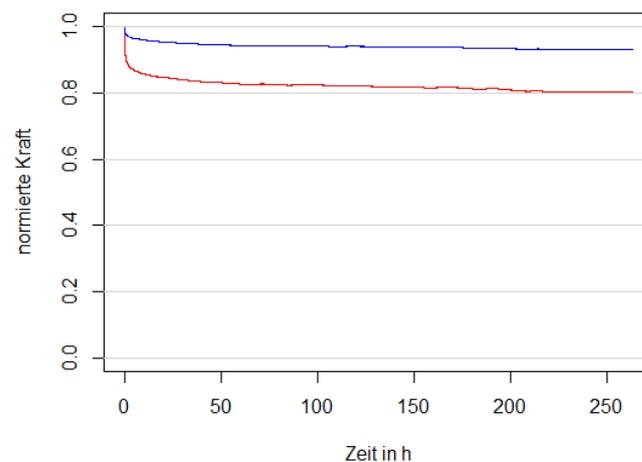


Abbildung 18: Setzverhalten: normierter Vorspannkraftverlauf der Schraubverbindungen ohne externe Last (zwei Sensoren), Fall I

Quelle: TU Chemnitz

In einem direkt angeschlossenen zweiten Dauerversuch Fall II (Ermüdungsversuch, ohne Nachziehen) wurden die Schraubenvorspannkraft weiterführend aufgezeichnet (vgl. Abbildung 19). Die Testbedingungen entsprachen dabei dem ersten Dauerversuch (Fall I). Auf Grund eines Softwareproblems wurde die Aufzeichnung der Ringkraftsensoren am ersten Prüftag unterbrochen. Dem zur Folge startet die Aufzeichnung einen Tag verspätet. Auf Grund des Testendes am Wochenende und des manuellen Aufzeichnungsstopps sind weiterhin etwa 1,5 Tage nach Testende aufgezeichnet.

Der geringe Kraftabfall und annähernd lineare Verlauf der Kurve gewährleisten hohe Vorspannkraft über den gesamten Untersuchungszeitraum. Dies indiziert, dass eine Berücksichtigung des Reibschlusses zwischen den Bauteilen sinnvoll sein kann. Da die Verbindung vorgehend bereits mehrfach verschraubt gewesen ist, war zu Aufzeichnungsbeginn jedoch ein Großteil des Setzvorgangs des Materials bereits abgeschlossen. Rückschlüsse zu verlässlichen, dauerhaft vorliegenden Vorspannkraft sind folglich nur bedingt möglich. Im Verlauf des zweiten Dauerversuchs (Fall II) wurde eine geringe Geräusentwicklung und ein Fortschreiten der vorhandenen Risse in den Klebefugen festgestellt (Abbildung 20). Es gab dabei keine direkten Auswirkungen auf die strukturelle Integrität und die Steifigkeit. Ein Versagen der Struktur ist nicht eingetreten! Die Restfeuchte nach den Versuchen betrug 6,69%.

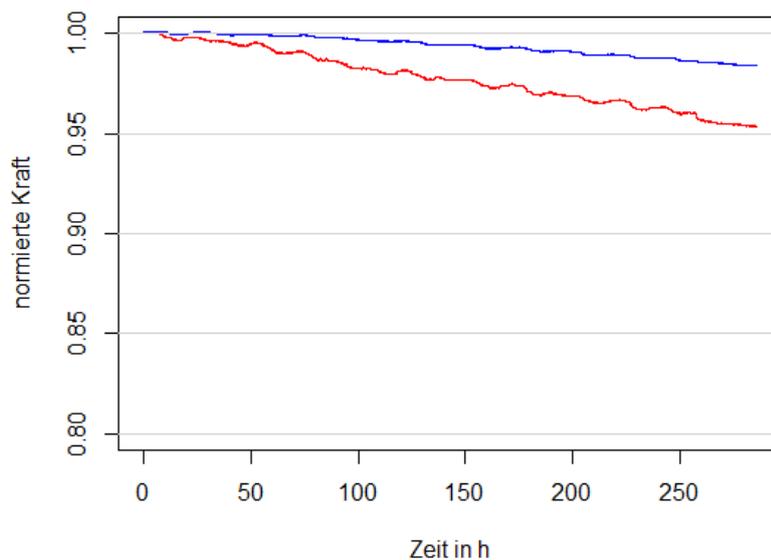


Abbildung 19: normierte Vorspannkraft während des dynamischen Dauerversuchs, Fall II, 2 Hz über 1,5 Tage, bei 2-facher Last

Quelle: TU Chemnitz

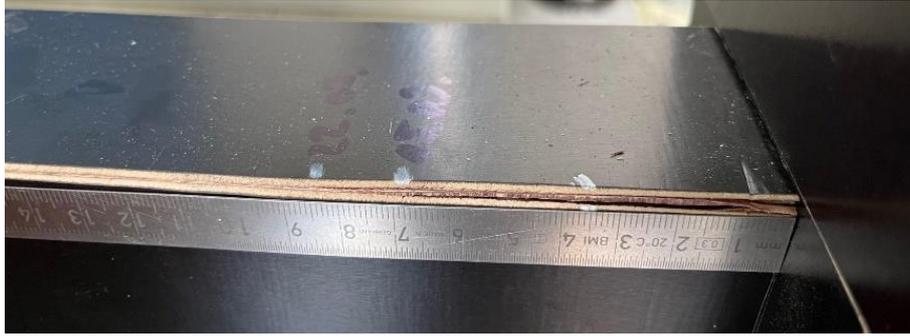


Abbildung 20: Versagen der Klebefuge am Obergurt des unteren Querträgers

Quelle: TU Chemnitz

Fangrahmen, Prototyp 2 – Dauerversuch

Basierend auf der in Abbildung 6 dargestellten Konstruktion wurde ein in der Höhe gekürzter Fangrahmen gebaut, welcher intensiv geprüft werden soll. Dieses Modell weist die exakt gleiche Bauweise und Dimension auf, lediglich die Längsträger sind von 2261 mm auf 793 mm verkürzt worden, um eine Erprobung in den vorhandenen Prüfmaschinen zu ermöglichen (Abbildung 21). Der Verlauf und die Verteilung der Kräfte im Längsträger bleiben dabei unverändert. Auch die Kräfteinleitung über die Eckverbindung ist identisch mit der Originalbaugröße.



Abbildung 21: Fangrahmenmodell in der Prüfmaschine

Quelle: TU Chemnitz

Die Verschraubung der Eckverbinder wurde vorgehend weiter detailliert und unter Berücksichtigung von mehreren abschwächenden Faktoren (Ermüdung, UV-Strahlung, Feuchtigkeit) neu dimensioniert. Im Ergebnis konnte die Anzahl der Verbindungsmittel je Eckverbinder von acht auf vier reduziert werden. Alle Verbindungen wurden vor dem ersten Versuch mit einem Drehmomentschlüssel auf 50 Nm angezogen. Dieses Moment entspricht nur einem kleinen Teil des verfügbaren Anzugsmoments einer M12-Schraube, wurde aufbauend auf bestehenden Erfahrungswerten für die Holzkonstruktion jedoch als ausreichend erachtet. Im Versuchsprogramm sollte primär die Dauerfestigkeit (Normalbetrieb) und die Festigkeit bei Ansprechen der Fangvorrichtung belegt werden. Nach einer mehrwöchigen Einlagerung des Fangrahmens, um eine Anpassung der Holzfeuchte an das Normklima für Holzwerkstoffe zu gewährleisten, wurde als erster Versuch ein dynamischer Langzeittest durchgeführt. Die Restfeuchte betrug 6,69%. Folgend schloss sich ein Versuch für das Auslösen der Fangvorrichtung an und ein zweiter Dauerversuch. Als letztes wurde die Restbruchkraft des Fangrahmens ermittelt.

Im ersten Dauerversuch oszillierte die Kraft zwischen dem Äquivalent eines unbeladenen Aufzugs (2,7 kN) und eines beladenen Aufzugs mit dem Sicherheitsfaktor 1,2 (10,7 kN). Bei einer Frequenz von 2 Hz wurden 2 Millionen Lastwechsel absolviert. Die Lastwechselanzahl orientiert sich an einem Vergleichsaufzug und wurde durch SLC ermittelt. Im Verlauf des Tests wurde ein zunehmendes Geräusch in Form eines Quietschens der Holzbauteile und eine Beschädigung der Struktur festgestellt. Dabei löste sich der Obergurt des unteren Querträgers an den Profilenden in der Klebefuge von den Stegen (Abbildung 22). Diese Risse dehnten sich im Testverlauf aufgrund der dynamischen Belastung des Fangrahmens aus, hatten jedoch keine direkten Auswirkungen auf die strukturelle Integrität und die Steifigkeit! Demnach wurden auch keine Maßnahmen ergriffen, um die Rissausbreitung zu stoppen. Der korrelierend zur Kraft aufgezeichnete Weg hat einen degressiven Verlauf mit einer Wegzunahme von etwa 2 mm. Die Baugruppe verhält sich dabei entsprechend der Erwartungen.



Abbildung 22: Riss Klebefuge: Steg und Gurt, weiße Markierung an Rissende

Quelle: TU Chemnitz

Fangrahmen, Prototyp 2 – Fangversuch

Direkt aufbauend auf den Versuchen zur Strukturermüdung, d. h. mit vorgeschädigter Struktur, wurde ein Versuch für das Ansprechen der Fangvorrichtung durchgeführt. Durch die leicht exzentrische Befestigung der Bremsen ist mit einer tordierenden Belastung der Struktur zu rechnen (Abbildung 23).



Abbildung 23: Fangrahmen mit azentrischer Lagerung zur Simulation der Fangvorrichtung

Quelle: TU Chemnitz

Die konstruktiv mögliche Verdrehung des Fangrahmens entsprechend seines Spieles zu den Führungen wurde zunächst berechnet und soll über Anschläge limitiert werden. Die Wahl der Prüfparameter resultiert aus der Praxisanwendung. Die Prüfkraft ist erneut zyklisch schwelend mit einer Unterkraft entsprechend einer unbeladenen Kabine (entspricht 2,7 kN) und einer Oberkraft entsprechend einer beladenen Kabine mit dem Sicherheitsfaktor 2 (entspricht 17,8 kN) aufgebracht worden. Mit einer Frequenz von 0,5 Hz wurden zwei Durchläufe á 20 Lastwechsel, d. h. insgesamt 40 Fangversuche nacheinander absolviert. Dies entspricht Erfahrungswerten aus dem Aufzugbereich. Die Anschläge konnten dabei die Torsion des Fangrahmens nicht ausreichend beschränken, wodurch deutlich größere Torsionslasten in die Struktur eingeleitet wurden als berechnet.

In den Versuchen wurden sehr deutliche, knackende Geräusche wahrgenommen, welche vermutlich von einem der unteren Eckverbinder ausgegangen ist. Dennoch wurde der Test ohne ein Versagen der Struktur beendet. Da eine Demontage die Struktur zu sehr beeinträchtigt hätte und weitere Versuche vorgesehen waren, wurde lediglich eine äußere Begutachtung durchgeführt und alle Schraubverbindungen erneut mit 50 Nm nachgezogen. Dabei wurde bei einer schrittweisen Annäherung an das Drehmoment festgestellt, dass zahlreiche Schraubverbindungen auf ein Anzugsmoment von 40 bis 45 Nm abgefallen sind. Das ist jedoch nicht überraschend, da Holzwerkstoffe zu einem ausgeprägten Setzverhalten neigen.

Fangrahmen, Prototyp 2 – Restbruchkraft

Direkt aufbauend auf den Versuchen zur Strukturermüdung, d. h. mit vorgeschädigter Struktur, wurde die Restbruchkraft ermittelt. Dabei wurde der Fangrahmen erneut mittig eingespannt und mit 50 mm/min bis zum Versagen belastet. Ein Versagen der Struktur ist bei 22 kN eingetreten (Abbildung 24). Im Ergebnis erfüllt

er die Anforderungen, nach welchen der beladene Aufzug mit einer Sicherheit von 2 mit 17,85 kN belastbar sein muss.

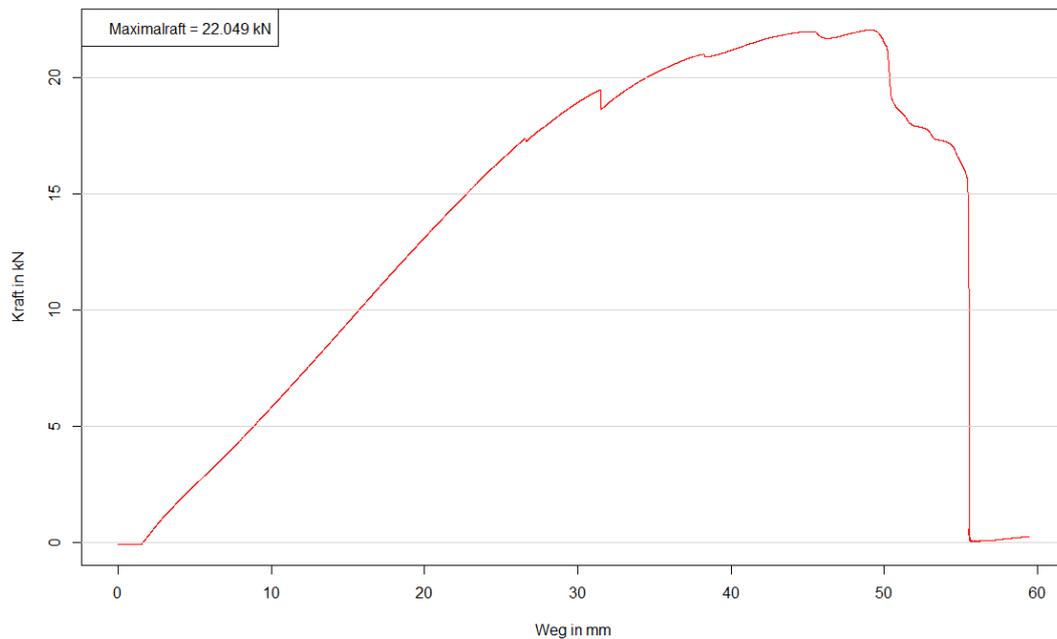


Abbildung 24: Kraft-Weg-Diagramm im Restbruchkraftversuch

Quelle: TU Chemnitz

Erobung des Antriebs

Zur Erprobung des Antriebskonzepts, der Mehrlagenwicklung und der mehrlagig bewickelten Seiltrommel wurde ein Prüfstand konstruiert und gebaut (siehe Abbildung 25). Dieser ist dauerhaft im Betrieb und wird fortlaufend optimiert. Da die Aufzugskabine auf Grund Ihrer Größe nicht im Versuchsstand betrieben werden kann, wurde sie digital in einem Schacht eingebaut. Dies ist unter anderem für die Anordnung der Antriebskomponenten als Zwilling im Schachtkopf wichtig.



Abbildung 25: Prüfstand für die Mehrlagenwicklung und den getriebelosen Antrieb

Quelle: SLC

Bei der Mehrlagenwicklung mit Stahldrahtseilen sind die Transportvorgänge des Seiles innerhalb der Lage und bei einem Lagenwechsel entscheidend. Für die Rillengestaltung einer Seiltrommel gibt es drei Varianten, die glatte Trommel, die helicoidale, schraubenlinienförmige Rillenführung oder den sogenannten Lebussschlag. Da auf mindestens die dritte Seillage gewickelt werden soll, ist der Lebussschlag mit eingearbeiteter Steigungszone ausgewählt worden. Bereits bei den ersten Versuchen auf dem Prüfstand (Abbildung 26) sind mit Beschleunigungs- und Fahrkurvenmessungen Optimierungsmöglichkeiten gefunden und durch Zusatzmaßnahmen an der Trommelgeometrie umgesetzt worden. Dabei handelt es sich u.a. um eine Spulhilfe – den sogenannten Kicker –, der verhindert, dass das Seil an der Bordwand aufsteigt und hilft, das Seil beim Lagenwechsel in die Spulrichtung hineinzubewegen.



Abbildung 26: Trommel mit Mehrlagenwicklung auf dem Prüfstand

Quelle: SLC

Erprobung des Drahtseils

Bei den Dauerversuchen auf dem Mehrlagenwicklungsprüfstand werden die Stahldrahtseile auf Ermüdung unter Kontaktverschleiß „Seil-Seil“ und Schrägzug geprüft. Auf den Seilen zeigen sich in den Kontaktzonen erwartete und nicht zu vermeidende Verschleißflächen, die Ausgangspunkte für Dauerbrüche sein werden. Durch die glatte, verdichtete Seiloberfläche wird dieser Effekt gemildert. Aus den Protokollen ist zu entnehmen, dass die Seildurchmesser, wenn auch nur schwach, abnehmen. Die Drahtbrüche auf den Referenzlängen nehmen mit der Spielzahl zu. Bei ca. 300.000 Spulvorgängen ist die Ablegereife erreicht worden ohne Riss einer Litze oder des Seils. Es ist also trotz Ablegereife kein gefährlicher Zustand entstanden. Es ist anzumerken, dass diese Spielzahl deutlich höher liegt als bei den Krananwendungen. Für den Aufzugbau bedeutet dies, dass im Rahmen einer Baumusterprüfung bzw. Prüfung zur Konformität durch eine zertifizierte Stelle als Ersatzmaßnahme z. B. ein ausfallsicherer Zähler angebracht wird. Diese Spielzahl in den Praxiskontext gestellt, bedeutet für das nachverdichtete Bauen oder Gebäude mit mittleren Förderhöhen mit 40-50 Fahrten/Tag bei Nutzung an 350 Tagen bereits eine Einsatzzeit ohne Seiltausch von zwischen 18 und fast 20 Jahren, was in vielen Fällen der Gebrauchsdauer der Aufzuganlage selbst entspricht.

Um einen Vergleich mit dem Stand der Technik bei der Ermüdungsfestigkeit von Stahldrahtseilen nach Feyrer herzustellen, ist es notwendig, die Seile in klassischen Dauerbiegeversuchen mit konstanten Versuchsparametern als Einzelseilversuch zu untersuchen. Dazu wird eine Versuchseinrichtung an der TU Chemnitz eingesetzt (siehe Abbildung 27). Das Stahlseil ist schrägzugfrei um Antriebs- und Prüfscheibe geschlungen und durch eine konstante Seilzugkraft mit 10-facher Sicherheit gegen die Mindestbruchkraft des Seils belastet. Die Prüfscheibe hat hier einen Durchmesser von 18x Seilnennendurchmesser. Das aktuelle Seil wurde auf einer Standard-Stahl-Scheibe bis zum Bruch geprüft. Hier konnte eine Biegewechselzahl von $n = 758.606$ erreicht werden. Aufbauend auf Erfahrungen der TU Chemnitz (vgl. [31]) wurden die Versuche anschließend mit einem Seilstück gleicher Charge, aber mit einer Seilscheibe aus Polyamid durchgeführt. Hier

wird eine deutlich höhere Lebensdauer erwartet. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes wurde in der genannten Konfiguration eine Biegewechselzahl von $n = 1.549.614$ erreicht und damit die erwähnte Hypothese bestätigt. Die Versuche werden auch nach Ende des eigentlichen Projektes freiwillig bis zum Bruch des Seiles bzw. bis zu dessen Ablegereife fortgesetzt.

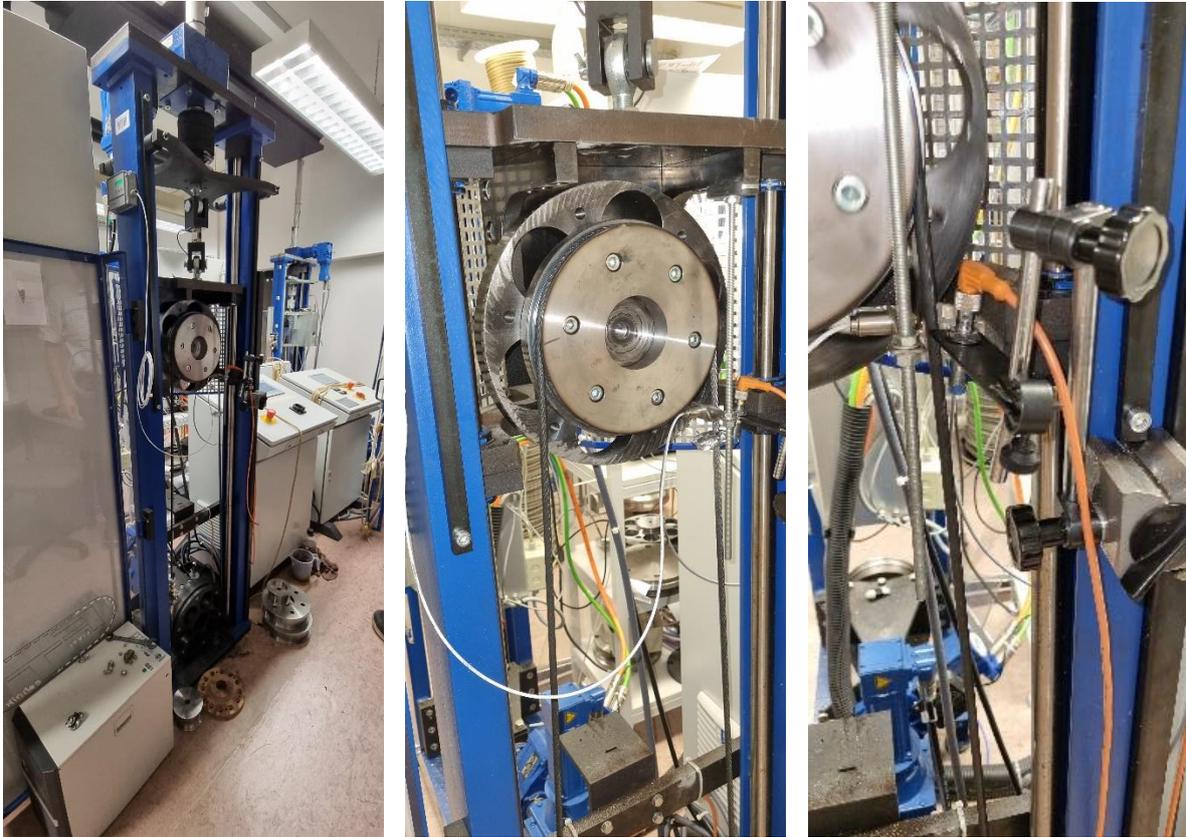


Abbildung 27: Dauerbiegeversuch mit dem Stahlseil im Seilprüflabor an der TU Chemnitz

Quelle: TU Chemnitz

Konklusion

Beschreibung und Begründung von möglichen Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag

Auf Grund von Fehlern im Produkt wurde die Biegewechselprüfung nicht mit dem Seil des Projektpartners, sondern mit einem zugekauften Seil durchgeführt. Die Prüfung der Biegewechselfestigkeit erfolgte auf einer Dauerbiegemaschine. Diese erfordert weniger Prüfscheiben als eine 5-Zonen-Biegewechselmaschine und ist dem Stand der Forschung entsprechend [34]. Damit wurden die Kosten und der Aufwand der Versuche reduziert, ohne Abstriche an der wissenschaftlichen Qualität machen zu müssen.

Während der Projektlaufzeit stand kein geeigneter Aufzugsschacht zur Verfügung, um die Gesamtanlage zu testen. Deshalb erfolgten Tests der einzelnen Komponenten, die erfolgreich verliefen. Nach Projektabschluss wird ein Test der Gesamtanlage weiter verfolgt.

Stellungnahme zu möglichen Ergebnissen von dritter Seite, die während des Vorhabens bekannt geworden sind

Im Laufe des Projektes wurden Entwicklungen auf dem Markt und die Erteilung von Patenten intensiv verfolgt. Dabei wurden keine Überschneidungen mit der hier erforschten Aufzugskabine aus Holzwerkstoffen festgestellt. Die Firma Schindler hat Anfang 2022 einen Aufzugsschacht aus Holzwerkstoffen vorgestellt [32] (siehe Abbildung 28 und Abbildung 29). Dieser ergänzt jedoch die hier vorgestellte Entwicklung und unterstreicht die Notwendigkeit von erneuerbaren Werkstoffen im Aufzugssektor. In der Kombination der beiden Entwicklungen können Aufzugssysteme mit einem sehr hohen Holzbaugrad angeboten werden, da sowohl der Schacht, als auch die Kabine primär aus Holzwerkstoffen bestehen. Der ökologische Vorteil beider Teilsysteme ergänzt sich dabei. Weiterhin kann der Einsatz für Holzwerkstoffe im Aufzugbau durch Schindler als Vizeweltmarktführer für Aufzuganlagen [33] als Zeichen des Marktbedarfs und der Wirtschaftlichkeit gedeutet werden.



Abbildung 28 (links): Aufzugsschacht aus Holz mit Holzverkleidung im Bereich der Schachttür [32]

Abbildung 29 (rechts): Aufzugsschacht in Holzbauweise mit installierter Standardperipherie [32]

Quelle (beide): Schindler AG

Erfolgskontrolle

Für die Erfolgskontrolle des Projektes wurden im Bewilligungsbescheid Indikatoren zur Überprüfung der Zielerreichung definiert. Nahezu alle Erfolgsindikatoren konnten erreicht werden. Die wenigen Abweichungen sind für die weitere Verwertung der Ergebnisse beherrschbar.

1. Im Rahmen des Projektes konnte erstmalig eine Konstruktion einer selbsttragenden Aufzugskabine in Holzbauweise für den praktischen Einsatz realisiert werden.
2. Es wurde eine maximale Zuladung von 630 kg erreicht. Das entspricht nach EN81-20:5.4.2 einer maximalen Anzahl von 9 Personen in der Aufzugskabine. Im Gesamtkontext einer Nachrüstung von Aufzugslösungen in Bestandsgebäuden wird ein kompakter Antrieb mit einer Größe entworfen, die durch die Anzahl (maximal zwei) und den Durchmesser (maximal acht Millimeter) der Seile auf diese Last abgestimmt ist. Eine höhere Zuladung würde keinen Vorteil bringen. Da eine höhere Zuladung konstruktiv möglich ist, bietet sich hier ein vielversprechender Ansatz für weitere Forschungsarbeiten hinsichtlich der optimalen Seilkonstruktion und Antriebsauslegung.
3. Das Gewicht der Kabine im Vergleich zu konventioneller Bauweise konnte um 55% gesenkt werden
4. Die Kabinengrundfläche konnte zu einem vergleichbaren Aufzug mit Gegengewicht um nahezu 30% erhöht werden.
5. Der erreichte Schallschutzpegel für die maschinenraumlose Antriebseinheit ist kleiner als 75 dB und entspricht damit den Anforderungen der DIN 8989:2019 für maschinenraumlose Aufzüge in Gebäuden mit schutzbedürftigen Räumen, die an den Aufzugsschacht angrenzen. Damit werden Anforderungen erfüllt, die eigentlich nur im Neubau gelten.
6. Durch den Einsatz eines Synchro-Gearless-Antriebs kann ein Antriebswirkungsgrad von bis zu 96% erreicht werden. Im Vergleich dazu läge der Wirkungsgrad bei einem Planetengetriebe bei ca. 87% und bei einem konventionellen Schneckengetriebe zwischen 70 und 82%. Der Schachtwirkungsgrad beim gewählten Aufzugskonzept (2:1) mit dem Antrieb oben und ohne geführtes Gegengewicht mit Leichtbau-Holzkabine und Gleitführungsschuhen beträgt ca. 91%. Durch den Einsatz von Rollenführungen könnten sogar Werte bis 95% erreicht werden. Im Vergleich dazu erreicht man mit einem konventionellen Treibscheibenaufzug (2:1) mit Gegengewicht lediglich Werte um die 82%. Der Gesamtwirkungsgrad der neuen Aufzugsanlage wird damit sehr hoch.
7. Der hohe Gesamtwirkungsgrad führt zu einer sehr deutlichen Energieverbrauchsreduktion.
8. Die angestrebten Schallwerte von < 65 dB für Türbewegungen, < 65 dB für fahrenden Aufzug und < 75 dB für die Antriebseinheit wurden möglicherweise erreicht, konnten im Rahmen des Projektes aber nicht überprüft werden. Diese Zielgrößen können nur an einer komplett montierten Anlage in einem konkreten Schacht gemessen werden. Im Rahmen des Projektes wurden Prototypen für die Holzkabine und die Aufzugstrommel mit entsprechenden Seilkonstruktionen gefertigt. Ein Test der Gesamtanlage in einem Schacht konnte nicht umgesetzt werden.
9. Im Rahmen des Projektes wurde für die Trommelwicklung erstmalig eine mehrlagige Wicklung für kleine Wickeldurchmesser (Durchmesser 240 mm) und hohe Wickelkraftsicherheiten (Seilsicherheit > 12) realisiert.
10. Eine Reduktion des Trommeldurchmessers auf 240 mm wurde erreicht. Die angestrebten 150 mm konnten mit den eingesetzten Seilen nicht erreicht werden. Hier muß weiter geforscht werden.
11. Eine Seilsicherheit > 12 konnte nachgewiesen werden.
12. Eine Schachtkopfhöhe zwischen 2600 – 2800 mm konnte nicht realisiert werden. Aufgrund der 2:1-Aufhängung mit obenliegender Umlenkrolle wurden nur 3400 mm erreicht.

13. Ertragbare Lastwechsel von über 600.000 Fahrten wurden im Rahmen des Projektes nicht erreicht. Erreicht wurden bisher 300.000 Lastwechsel. Dies stellt kein Hindernis für die Fortsetzung der Forschungsarbeiten dar, da durch den Einsatz geeigneter Ersatzmaßnahmen eine Konformitätsbewertung mit den Anforderungen der Aufzugsrichtlinie durch eine zugelassene Überwachungsstelle möglich ist. 300.000 Fahrten bedeutet bei Anwendungen im Wohnhausbereich mit 50 Fahrten/Tag, bei einer Nutzung von 365 Tagen/Jahr, zwischen 18 und 20 Jahre bis zur Ablegereife. Damit wird ein Großteil der Anlagen abgedeckt. Sollte in dem Bereich der höher frequentierten Anlagen mit Trommelantrieben gearbeitet werden, sind weitere Optimierungen an der Kombination Seil, Schmierung, Trommel und Rillenprofil anzustreben
14. Eine Erkennbarkeit der Ablegereife der Seile in der Aufzugsmehrlagenwicklung konnte über die klassische Methode der Drahtbruchererkennung sichergestellt werden.
15. Es konnte nachgewiesen werden, dass für den Einbau des Aufzugs keine Veränderungen der Bausubstanz notwendig ist, da weder Schachtgrube noch Maschinenraum nötig sind.
16. Gespräche mit einem Notified Body, dem TÜV Süd, hinsichtlich der Erlangung einer Konformitätsbescheinigung (CE) außerhalb der harmonisierten Norm unter Einhaltung der Schutzziele der Aufzugsrichtlinie wurden mehrmals geführt. In diesen Gesprächen wurde ein Weg ausgearbeitet, wie die kritischen Abweichungen durch geeignete Ersatzmaßnahmen, bzw. empirische Nachweise gelöst werden können.
17. Die Reduktion von Montagezeit und -kosten um 20% konnte sichergestellt werden.
18. Durch den Einsatz der Holzkabine und der Mehrlagenwicklung konnte die erforderliche Antriebsleistung wie erwartet reduziert werden. Wegen der Reduzierung der Antriebsleistung von 11,3 kW bei 31,5 A auf 8,5 kW bei 23,5 A gegenüber einem „konventionellen“ Trommelaufzug ergibt sich eine Kosteneinsparung von 25% (Basis: Listenpreise eines führenden Herstellers von Gearless-Antrieben). Die Kosten für ein Gegengewicht betragen erfahrungsgemäß ca. 40% einer hochwertigen Aufzugskabine. In Kombination mit der etwas teureren Holzkabine können so immer noch 30% eingespart werden.

Dissemination

Zertifizierung

Das neue Aufzugskonzept weicht bewusst von der harmonisierten Norm EN81-20 ab. Potenzielle Kunden, die das Aufzugssystem erwerben und vor Ort installieren möchten, müssen deshalb eine umfangreiche Einzelabnahme durch eine zugelassene Überwachungsstelle durchführen lassen, um die Anlage in Verkehr zu bringen. Es wird derzeit intensiv an der Zertifizierung des Systems gearbeitet, um dessen Vermarktung zu erleichtern.

Zertifizierung bedeutet Prüfung und Bescheinigung des Aufzugssystems hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen der europäischen Aufzugsrichtlinie 2014/33/EU durch einen Notified Body. Mit dieser Konformitätsbescheinigung kann das Aufzugssystem ohne großen Aufwand in Verkehr gebracht werden, ähnlich wie bei einer heute üblichen Standardanlage. Die Vorgehensweise zur Konformitätsprüfung wurde bereits mit dem TÜV SÜD als zugelassenem Notified Body für die Aufzugsrichtlinie abgestimmt. Eine Besichtigung der Kabine und des Antriebsprüfstandes fand in den Räumlichkeiten von Sautter Lift Components statt. Die Konformitätsprüfung wird Mitte 2024 durchgeführt.

Vermarktung

Die Vermarktung des Aufzugsystems übernimmt SLC. LiGenium und DWH werden dabei als Zulieferer für die Holzkabine und die Drahtseile wirtschaftlich an den Umsätzen partizipieren. Ein tatsächlicher Verkauf und Betrieb des entwickelten Aufzugsystems kann erst nach erfolgreicher Zertifizierung erfolgen.

Um den Zielkunden aus dem Aufzugsbau die Scheu vor dem neuen Konzept und die Angst vor möglichen Problemen bei der Montage des Aufzugs zu nehmen, strebt Sautter Lift Components Kooperationen mit Montagefirmen und Herstellern von Schachtgerüsten an, die den Aufzug dann komplett beim Kunden montieren.

Publikation

■ Fachzeitschriften und Internet/Social Media

- erfolgt: - 23. Projekttag der Bauforschung des BBSR (03/2023)
- 19. Projekttag der Bauforschung des BBSR (03/2022)
- Projektvorstellung auf den Seiten des BBSR (abzurufen unter <https://www.zukunftbau.de/projekte/forschungsfoerderung/1008187-2126>)
- geplant: LIFT Report; Liftjournal; div. Architektur- und Bauzeitschriften; logistics journal; Holztechnologie

Nach erfolgreicher Konformitätsprüfung startet Sautter Lift Components eine gezielte Marketinginitiative. Diese wird in Form von gezielter Telefonakquise bei Fachplanern und Aufzugsunternehmen durch ein externes Vertriebsbüro durchgeführt. Zusätzlich stellt SLC Informationen auf seiner Homepage und auf seinen Social-Media-Kanälen (insbesondere LinkedIn und Facebook) bereit.

■ Messen und Symposien

- erfolgt: /
- geplant: - Schwelmer Aufzugssymposium (16.-19.06.24; Vortrag zugesagt)
- Lift & Escalator Technologies Symposium Northampton: 18.+19.09.2024
- GAT-Lieferantentag, Suhl: 22.10.+23.10.2024
- VFA-Forum Interlift 2025: 14.-17.10.2025
- Tagung innoTRAC 2024

Sautter Lift Components präsentiert das neue Aufzugssystem auf den folgenden internationalen Fachmessen:

- Asansör, Istanbul: 15.05.-18.05.2025
- Liftex, London: 11.06.+12.06.2025
- Interlift 2025, Nürnberg: 14.-17.10.2025

Know-How-Transfer und -Übertrag

■ Transfer der Erkenntnisse auf andere Produkte und Anwendungsgebiete, z. B.

- Hebezeuge in Prozesskränen in der Produktionstechnik
- Seiltriebe in Scherenhubgehängen in der Automobilindustrie
- Höheneinstellung von Manipulatoren für Montagen und Fertigungsabläufe

-
- Regalbediengeräte (RGB nach EN528) für die Lagerlogistik
 - Erweitern der jeweiligen Produktportfolios der Projektpartner
 - Initiierung neuer FuE-Projekte, z. B.
 - Verwendung flacher Tragmittel (Gurte oder Flachseile)
 - Einsatz alternativer Werkstoffe (z. B. Faserseile statt Stahlseile)
 - Entwicklung einer kombinierten form- und kraftschlüssigen Verbindungstechnik für dynamisch hochbelastete Leichtbauanwendungen aus Holzwerkstoffen, z. B. für den Aufzugsbau
 - Einbinden der gewonnenen Erkenntnisse in Lehrveranstaltungen an der TU → Multiplikatorwirkung

Mitwirkende

Autoren

Dr. Sven Eichhorn (Technische Universität Chemnitz)

Benjamin Kupey (Technische Universität Chemnitz)

Klaus Sautter (Sautter Lift Components GmbH)

Dr. Wolfram Vogel (Vogel Gut Achten)

Dr. Sebastian Weise (Technische Universität Chemnitz)

Weitere Mitwirkende

Detlef Brosig (DWH – Drahtseilwerk Hemer GmbH)

Ehsan Torshizi (Sautter Lift Components GmbH)

Dr. Andreas Kretschmer (Technische Universität Chemnitz)

Sven Mauersberger (Technische Universität Chemnitz)

Tino Gruner (Technische Universität Chemnitz)

Projektpartner

Technische Universität Chemnitz; Professur Förder- und Materialflusstechnik; 09126 Chemnitz

Sautter Lift Components GmbH; 70806 Kornwestheim

Drahtseilwerke Herner GmbH & Co. Kg; 58675 Hemer

Vogel Gut Achten; 73614 Schorndorf

LiGenium GmbH; 09125 Chemnitz

Kurzbiographien

Dr.-Ing. Sven Eichhorn

Sven Eichhorn ist Maschinenbauingenieur und befasst sich an der TU Chemnitz mit der Entwicklung und Berechnung von modularen Maschinenkomponenten aus Holzwerkstoffen. Als Leiter der Forschungsgruppe Anwendungstechnik Erneuerbarer Werkstoffe möchte er ökologisch, ökonomisch und wirtschaftlich vorteilhafte Holzbauweisen in der Praxis etablieren.

M. Sc. Benjamin Kupey

Benjamin Kupey studierte zunächst Fahrzeugtechnik und Maschinenbau an der TU Chemnitz. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter forschte er dort anschließend zu Innovationen in der Förder- und Materialflusstechnik. Insbesondere arbeitete er an der Anwendung erneuerbarer Werkstoffe im Kran- und Aufzugsbau.

Dipl.-Ing. Klaus Sautter

Klaus Sautter ist Maschinenbauingenieur und hat mehrere Jahre beim Fraunhofer IPA gearbeitet. Dort hat er Erfahrungen in Industrieprojekten und einem Sonderforschungsbereich sammeln können. Seit 2001 ist er in verantwortlicher Position in verschiedenen Unternehmen der Aufzugstechnik tätig. Aktuell ist er Geschäftsführer der Sautter Lift Components GmbH.

Dr.-Ing. Wolfram Vogel

Wolfram Vogel ist Maschinenbauingenieur und hatte verschiedene leitende Funktionen inne – u. a. am Institut für Fördertechnik der Universität Stuttgart und bei einem mittelständigen Aufzugszulieferer. Er ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Aufzugs-, Seil- und Hebetchnik und langjähriges Mitglied in Fach- und Normungsgremien dieser Themenkreise.

Dr.-Ing. Sebastian Weise

Sebastian Weise hat Maschinebau an der TU Chemnitz studiert. Er lehrt und forscht dort als wissenschaftlicher Mitarbeiter zu den Themenfeldern Kunststofftribologie und Materialflusstechnik. Außerdem arbeitet er als Leiter einer Forschungsgruppe innerhalb der Professur Fördertechnik an der Integration ressourcenschonender Technologien in Logistiksysteme.

Literaturverzeichnis

- [1] Terragon; Hundt: „Aufzugsarmut – Wie altersgerecht sind Deutschlands Wohnhäuser?"; Hamburg / Berlin, 2014
- [2] <https://www.tkelevator.com/de-de/produkte/aufzuege/homelifts/h300/>; abgerufen am 12.01.24
- [3] Dispan, J.: „Aufzugs- und Fahrtreppenbranche in Deutschland - Entwicklungstrends und Herausforderungen - Branchenreport 2015"; Heft 1/2015; ISBN 978-3-934859-48; 2015
- [4] „RL 2014/33/EU". 26. Februar 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0033&from=LV>
- [5] Maschinenrichtlinie 2006/42/EG,
- [6] Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV
- [7] BGI 779 (Montage, Demontage und Instandhaltung von Aufzugsanlagen),
- [8] DIN EN 81-20, Beuth-Verlag, Juni 2020.
- [9] DIN EN 81-50, Beuth-Verlag, Juni 2020.
- [10] DIN EN 1350-1, Beuth-Verlag, Mai 2019.
- [11] VDI 2168: Aufzüge; Qualifizierung von Personal
- [12] VDI 2566: Schallschutz bei Aufzugsanlagen
- [13] VDI 3810: Betreiben und Instandhalten von gebäudetechnischen Anlagen; Aufzüge
- [14] DIN EN 81-70, Beuth-Verlag, Juni 2020.
- [15] H. Kreuzinger und B. Mohr, „Holz- und Holzverbindungen unter vorwiegend nicht ruhenden Einwirkungen“, Fraunhofer IRB, Stuttgart, Bauforschungsbericht T 2637.
- [16] P. Niemz und W. U. Sonderegger, Holzphysik: Eigenschaften, Prüfung und Kennwerte, 2., Aktualisierte Auflage. München: Hanser, 2021.
- [17] K. Weisflog, „Experimentelle Untersuchung zur Feuchtigkeitsaufnahme und Weiterleitung bei Holzfurnierlagenverbundwerkstoffen“, TU Chemnitz, Projektarbeit, Aug. 2010.
- [18] Handbuch über finnisches Sperrholz. Helsinki: Verband der finnischen Holzindustrie, 2001.
- [19] DIN EN 1995-1, Beuth-Verlag.
- [20] DIN EN 15425, Beuth-Verlag, Mai 2017.
- [21] S. Eichhorn u. a., „Substitution energieintensiver Stahl- und Aluminiumwerkstoffe durch nachwachsende Rohstoffe in der Fördertechnik - SubSTANCE“, TU Chemnitz, Chemnitz, Abschlussbericht, Okt. 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-229785>
- [22] S. Eichhorn, A. Weber, K. Feig, C. Müller, und D. Krug, „Entwicklung von Qualitätshalbzeugen aus Spezialholzwerkstoffen für Anwendungen im Maschinenbau und in der Fördertechnik“, TU Chemnitz, Chemnitz, Abschlussbericht, Nov. 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-188704>

- [23] „Werkstoffdatenblatt S235“. Zugegriffen: 13. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://de.materials4me.com/media/pdf/e77d/30/Werkstoffdatenblatt_zum_Werkstoff_S235JR.pdf
- [24] „Tragwerksentwurf II“. Zugegriffen: 18. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://block.arch.ethz.ch/eq/files/Formulary_1456840757.pdf
- [25] „Werkstoffdatenblatt EN AW-6060“. Zugegriffen: 10. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://de.materials4me.com/media/pdf/26/7e/8c/Werkstoffdatenblatt_zum_Werkstoff_EN_AW-6060.pdf
- [26] „Sperrholz schwer entflammbar“, odek.eu. <https://odek.eu/de/products/schwer-entflammbares-sperrholz/> (zugegriffen 13. März 2023).
- [27] H. Neuhaus, Ingenieurholzbau: Grundlagen - Bemessung - Nachweise - Beispiele, 4. Auflage. in Lehrbuch. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Vieweg, 2017. doi: 10.1007/978-3-658-14178-3.
- [28] W. Vogel, „Auslegung von Seiltrieben in Treibscheibenaufzügen außerhalb der EN81-1 (Baumusterprüfbescheinigung G515)“, Lift Report, Nr. 36, S. 4–6, 2010.
- [29] W. Vogel, „Design of wire ropes in traction sheave lifts falling out the EN81-1“, Lift Report, Nr. 36, S. 8–10, 2010.
- [30] W. Vogel, „Tragmittel für Treibscheibenaufzüge/Lift gear for traction sheave lifts“, Lift Journal, S. 14–15, Mai 2021.
- [31] Kretschmer, A.: „Einflussfaktoren auf die Lebensdauer laufender Faserseile“; Dissertation an der TU Chemnitz; 2017
- [32] „Hoch hinaus mit Holz“, Schindler, Apr. 2022. Zugegriffen: 10. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.schindler.de/de/medien/presse/hoch-hinaus-mit-holz.html>
- [33] „Größte Unternehmen der Branche Aufzüge und Fahrtreppen weltweit nach Umsatz im Jahr 2021“, Statista Research Department, Statistil, Feb. 2023. Zugegriffen: 13. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/245761/umfrage/wichtigste-unternehmen-im-bereich-aufzuege-und-fahrtreppen-nach-umsatz/>
- [34] K. Feyrer und K.-H. Wehking, FEYRER: Drahtseile: Bemessung, Betrieb, Sicherheit, 3. Auflage. Berlin [Heidelberg]: Springer Vieweg, 2018.
- [35] Vereet, R.: Spezialeile für mehrlagig bewickelte Krantrummeln, Casar Broschüre 2003
- [36] Firmenkatalog der DWH – Drahtseilwerk Hemer GmbH, 2021
- [37] Vogel, W.: Auslegung von Seiltrieben in Treibscheibenaufzügen außerhalb der EN81-1 (Baumusterprüfbescheinigung G515). LiftReport 36(2010)1, S.4-6
- [38] Vogel, W.: Design of wire ropes in traction sheave lifts falling out the EN81-1 LiftReport 36(2010)1, S.8-10
- [39] Vogel, W.: Tragmittel für Treibscheibenaufzüge/Lift gear for traction sheave lifts. LiftJournal 05/2021 S. 14/15
- [40] Vogel, W.: Innovative runde Tragmittel in Aufzugsanwendungen. Tagungsband Heilbronner Aufzugtage 2013,

- [41] Vogel, W.: Technologievergleich von Tragmitteln. Tagungsband Heilbronner Aufzugtage 2022
- [42] Vogel, W.: Neues Potential für Trommelantriebe im Aufzugbau. Heilbronner Aufzugtage 2018 (Tagungsband)
- [43] Vogel, W.: Steel wire ropes in miniaturized units for drum elevators. LiftReport43 (2017) 5, pg. 19-22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: nachgerüsteter Aufzug in weitläufigem Treppenhaus (links); Trommelantriebseinheit in einem Schachtkopf (rechts)	9
Abbildung 2: Fangrahmen mit aufgesteckter Bodenstruktur	20
Abbildung 3: Eckverbinder mit mehrlagigem Aufbau und verzapfter Bauweise	21
Abbildung 4: Kabinendach mit überstehenden Seitenwänden als Fußleiste	22
Abbildung 5: Aufzugskabine demontiert	23
Abbildung 6: CAD-Modell der Aufzugskabine mit allen Peripheriebauteilen	24
Abbildung 7: Prototyp der vollständigen Aufzugskabine mit einigen Anbauteilen	25
Abbildung 8: Gearlessantrieb mit doppelter Seiltrommel und spezieller Rillung (sog. Lebuschlag)	26
Abbildung 9: Entwurf des Antriebsträgers mit längs eingebauter Motorbaugruppe	27
Abbildung 10: 2:1-aufgehängte Kabine	27
Abbildung 11: Kontaktzonen Seil-Seil in Mehrlagenwicklung	28
Abbildung 12: Stahlseil Elevation 8x26 Warrington-Seale IWRC kunststoffummantelt zusatzverdichtet dnenn=8,0 mm (DWH Taurus 826 CS)	29
Abbildung 13: statischer Zugversuch mit Fangrahmenprototyp, Fall A	31
Abbildung 14: Fangrahmenprototypen mit hohlem (Fall A) und massivem (Fall B) Querträger, eingesteckt in den vertikalen Träger	32
Abbildung 15: Fangrahmen in der Prüfmaschine eingespannt Quelle: TU Chemnitz	33
Abbildung 16: Hohlprofil in der Dreipunktbiegung zur Bestimmung der Bruchkraft	34
Abbildung 17: verspannter Fangrahmen mit Ringkraftsensoren	35
Abbildung 18: Setzverhalten: normierter Vorspannkraftverlauf der Schraubverbindungen ohne externe Last (zwei Sensoren), Fall I	35
Abbildung 19: normierte Vorspannkraftverläufe während des dynamischen Dauerversuchs, Fall II, 2 Hz über 1,5 Tage, bei 2-facher Last	36
Abbildung 20: Versagen der Klebefuge am Obergurt des unteren Querträgers	37
Abbildung 21: Fangrahmenmodell in der Prüfmaschine	37
Abbildung 22: Riss Klebefuge: Steg und Gurt, weiße Markierung an Rissende	38
Abbildung 23: Fangrahmen mit azentrischer Lagerung zur Simulation der Fangvorrichtung	39
Abbildung 24: Kraft-Weg-Diagramm im Restbruchkraftversuch	40
Abbildung 25: Prüfstand für die Mehrlagenwicklung und den getriebelosen Antrieb	41
Abbildung 26: Trommel mit Mehrlagenwicklung auf dem Prüfstand	42
Abbildung 27: Dauerbiegeversuch mit dem Stahlseil im Seilprüflabor an der TU Chemnitz	43
Abbildung 28 (links): Aufzugsschacht aus Holz mit Holzverkleidung im Bereich der Schachttür [32]	44
Abbildung 29 (rechts): Aufzugsschacht in Holzbauweise mit installierter Standardperipherie [32]	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: mechanische Kennwerte im Vergleich und mechanische Eigenschaften im Verhältnis zur Werkstoffdichte 19