

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

An:

Technische Informationsbibliothek
Deutsche Forschungsberichte
Postfach 6080,

30060 Hannover

Forschungsvorhaben SMART (Phase I)

Schlussbericht 2016-10

(gemäß Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98)

Zuwendungsempfänger: FH Aachen, Gbr. Käufer GmbH, Ingenieurgemeinschaft IgH Gesellschaft für Ingenieurleistungen mbH und SII Deutschland GmbH	Förderkennzeichen: 0325738 A/B/C/E
Verbundprojekt: Wartungs- und Instandsetzungsplattform für Windenergieanlagen (SMART) Teilprojekt: Erforschung und Entwicklung eines Demonstrators des selbstkletternen Systems (SMART - Klettersystem)	
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2014 bis 30.04.2016	
Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministe- riums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325738A/B/C/E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Projektleiter Prof. Dr.-Ing. Peter Dahmann.	
Berichtszeitraum: 01.09.2014 bis 30.04.2016	
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Mohsen Bagheri, Tel.: 0241-6009 52438, E-Mail: bagheri@fh-aachen.de	

Die Verantwortung für den Inhalt dieses Dokuments liegt bei dem Projektleiter.

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzfassung der Projektdurchführung	3
1.	Aufgabenstellung.....	3
2.	Voraussetzungen der Projektdurchführung.....	4
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
4.	Stand der Technik und F&E.....	8
II.	Projektbericht	9
1.	Forschungs- und Entwicklungsziele	9
2.	Darstellung der Verwendung der Zuwendungsmittel	10
3.	Projektergebnisse.....	12
4.	Notwendigkeit der Arbeit	15
5.	Verwertung der Projektergebnisse	15
6.	Stellungnahme zum Wettbewerb	16
7.	Veröffentlichungen	18
III.	Anlage 1: Erfolgskontrollbericht	20
1.	Beitrag zum 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung.....	20
2.	Zusammenfassung wissenschaftlich-technischer Ergebnisse.....	22
IV.	Anlage 2: Berichtsblatt	52
V.	Anlage 3: Vorschlag zur weiteren Verwendung von Gegenständen im Wert über 410 €.....	53
VI.	Anlage 4: Kurzfassung zum aktuellen Verwertungsplan.....	54

I. Kurzfassung der Projektdurchführung

1. Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsprojektes SMART (SMART – Scanning, Monitoring, Repair and Transportation) ist die Entwicklung einer kletternden Plattform für Windenergieanlagen. Eine geschlossene Arbeitskabine soll die wetterunabhängige Instandhaltung der Rotorblätter von Windenergieanlagen (WEA) im On- und Offshore Bereich ermöglichen. Dadurch kann die Effektivität, im Vergleich zu heutigen konventionellen Instandhaltungsverfahren, erhöht werden.

Für Betreiber von WEA ergeben sich große wirtschaftliche Vorteile wie z.B. Reduzierung der WEA-Stillstandzeiten, Ausweitung der Zeitfenster für Instandhaltung durch die wetterunabhängige Arbeitskabine, Schaffung idealer Voraussetzungen für die Nutzung von zerstörungsfreien Messmethoden für die Detektion von Strukturschaden der Rotorblätter, sowie der Türme und Nutzung von neuartigen automatisch betriebenen Reparaturmöglichkeiten mit erhöhter Qualität.

Das Projekt wird in zwei Phasen, Phase I und Phase II realisiert. Das Ziel in der Phase I ist die Erforschung, Entwicklung und Realisierung der Kletterfunktion des SMART Roboters. Hierbei wird eine geeignete Kinematik ausgelegt, die zumindest die Bewegung laut der Patentschrift erfüllt, d.h. das vertikale Klettern an zylinderförmigen Türmen von Windkraftanlagen. Die Funktion wird im Labormaßstab getestet.



Abbildung 1: Turm-Kletterroboter für Windenergieanlagen

Phase I des Projekts ist eine Machbarkeitsstudie, um die Funktionalität des Klettersystems festzustellen, das Grundprinzip nachzuweisen und unnötige Kosten für einen 1:1 Prototypenbau in der Phase II zu vermeiden.

2. Voraussetzungen der Projektdurchführung

Die Idee für das Projekt entstand an der FH Aachen in 2010 und wird in drei Patentanmeldungen festgehalten. Die Idee wird von der Windenergieindustrie mit großem Interesse wahrgenommen. Mehrere LOIs (siehe Anhang VII) zeigen das Interesse der Industrie an der Entwicklung und Nutzung des Kletterroboters. Auf dieser Basis wird eine Skizze entwickelt und dem Projektträger Jülich vorgestellt.

Zusammen mit den Firmen gebr. Käufer GmbH für die Entwicklung der Struktur, Ingenieurgemeinschaft IgH Gesellschaft für Ingenieurleistungen mbH (IgH) für die Entwicklung der Fahrwerke und SII Deutschland GmbH für die Auslegung und Konstruktion der Verbindungsmechanik für die Fahrwerke, beginnt Ende 2014 die Umsetzung. In der folgenden Tabelle sind die Tätigkeiten der Partner in der Phase I schematisch dargestellt.

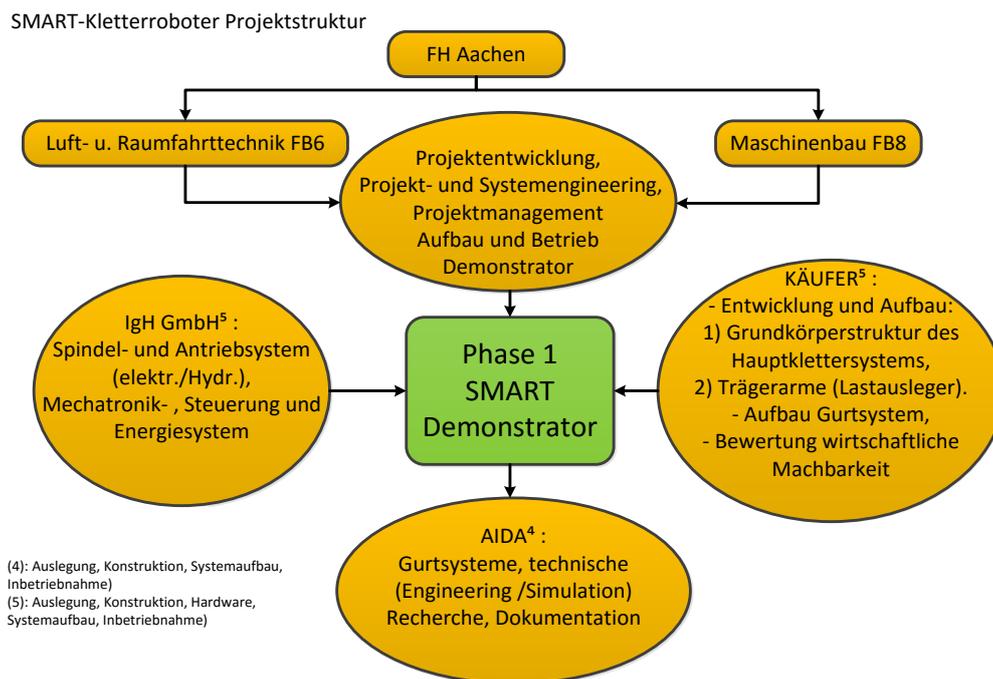


Abbildung 2: Projektstruktur, SMART Phase I

FH Aachen ist Mitglied im InteWind Netzwerk der Firma EurA Consult, das vom BMWi finanziert wird und die Zusammenarbeit mit potentiellen Projektpartnern aus der Windenergiebranche vereinfacht.

An der FH Aachen arbeiten die unterschiedlichen Fachbereiche interdisziplinär in verschiedenen Projekten miteinander. Dadurch werden unterschiedliche Kompetenzen gebündelt und für das Projekt fokussiert eingesetzt. Hierbei konnte der Fachbereich Bauingenieurwesen mit Gutachterkompetenzen, durch Herrn Prof. Dr.-

Ing. Jörg Laumann, im Bereich Windenergieanlagen bei der Berechnung der Belastungskapazitäten von WEA Türmen unterstützen. Da die Strukturdaten von den Herstellern der WEA zu Projektbeginn nicht ausreichend verfügbar waren.

Um die CE-Zertifizierung des SMART 1m Vorfeld zu überprüfen, wird mit TÜV Süd Kontakt aufgenommen. Zusätzlich wird die Firma ematec AG mit der Überprüfung der Skalierbarkeit nach Maschinenrichtlinien vom Maßstab 1:3 in den 1:1 Maßstab beauftragt.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Forschungsvorhabens SMART 1 wird durch die folgenden Phasen/Meilensteine beschrieben:

Konzeptphase

Die Konzeptphase, ausgelöst durch die Optimierung der ursprünglichen Skizze, dauert von September 2014 bis April 2015. Im Verlauf der Phase konnte im Rahmen umfangreicher Entwicklungsstudien, Machbarkeitsanalysen und Teammeetings ein neues Konzept – Kettenfahrwerke als Klettermechanismus – entwickelt werden. Das neue Konzept beschreibt einen wesentlichen Meilenstein für das gesamte Forschungsvorhaben. Die Konzepte wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern SII Deutschland GmbH, gebr. Käufer GmbH und IgH erstellt.

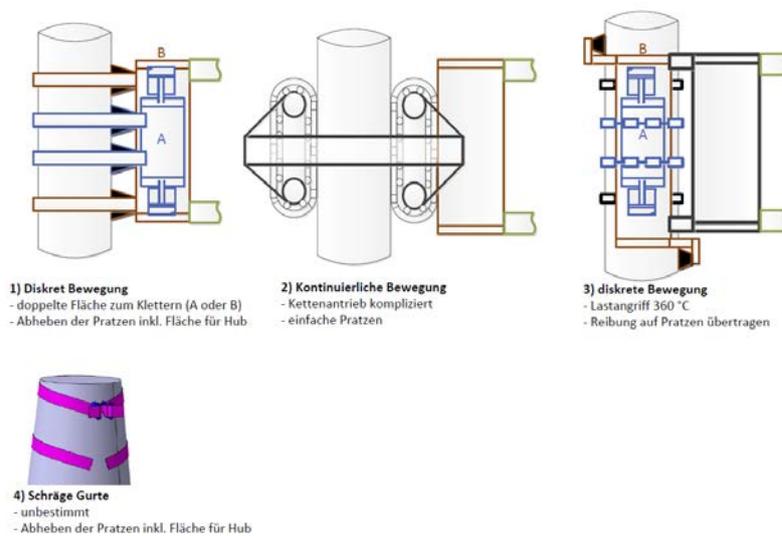


Abbildung 3: Konzeptentwicklung basierend auf Kettenfahrwerken

Lastenhefte

Um die dezentrale Zusammenarbeit zwischen den Verbundpartnern zu fördern sind Lastenhefte entstanden, die jeweils für das

- Spannsystem,
- Kettenfahrwerke und
- Grundkörper mit Ausleger

alle wesentlichen Merkmale beschreiben. Die Lastenhefte erreichten Mitte Mai den jeweiligen Partner zur weiteren Bearbeitung.

Konstruktion, Montage und Versuchsbetrieb

Der erste Versuchsbetrieb konnte erfolgreich Ende Oktober 2015 durchgeführt werden. (siehe Anlage 1, Erfolgskontrollbericht)

Testphase

Im weiteren Verlauf der Testphase bis einschließlich April 2016 konnten Messergebnisse am Demonstrator aufgenommen, sowie auch die Konstruktion im Rahmen eines 1:20 Tischmodells weiter optimiert werden.

Der Ablauf des Forschungsprojekts wurde begleitet durch Präsentationen auf drei einschlägigen Fachmessen:

- Hannover Messe 2015, NRW Stand, Halle 2, Innovationen
- Husum Messe 2015, Gebr. Käufer GmbH
- Hannover Messe 2016, BMWi Stand, Halle 2, Innovationen

Das SMART Projekt weckte großes Interesse bei Industrie und Politik (siehe LOIs im Anhang).



**Abbildung 4: Hannover Messe Industrie 2015,
Besuch des NRW Wirtschaftsministers Herr Garrelt Duin**

4. Stand der Technik und F&E

Windenergieanlagen sind stark wechselnden Belastungen durch verschiedene Wetterbedingungen ausgesetzt. Die Technologie ist noch vergleichsweise jung und der Wartungsbedarf ist hoch. Inspektionen von Windenergieanlagen werden alle zwei Jahre und gegebenenfalls nach starken Unwettern durchgeführt. Die Inspektion, Wartung und Reparatur wird in folgenden vier Stufen durchgeführt:

- I. Sichtinspektionen können vom Boden oder aus der Luft mittels hochauflösender Kameratechnik durchgeführt werden.
- II. Für die Diagnose äußerer Schäden sowie Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten werden Hochseil- und Industriekletterer eingesetzt.
- III. Größere Defekte auf der Rotorblattoberfläche erfordern den Einsatz von Seilarbeitsbühnen. Seilarbeitsbühnen gibt es in verschiedenen Variationen, welche in Bezug auf die Wetterlage nur begrenzt einsetzbar sind. Sie dürfen nur bei Temperaturen bis 10°C, Windgeschwindigkeiten unter 12 m/s und trockener, beständiger Wetterlage verwendet werden.



Abbildung 5: Seilarbeitsbühne für Rotorblatt und Turm (Käufer GmbH)

- IV. In manchen Fällen muss das Rotorblatt komplett demontiert und am Boden repariert oder ausgetauscht werden. Für die Demontage der Rotorblätter wird ein Kran benötigt.

Standard Untersuchungen beinhalten ein Verfahren, bei dem durch Klopfen am Bauteil Fehler erkannt werden. Parallel wird die Diagnose und Reparatur von Oberflächenschäden durchgeführt.

Wartungs-, Diagnose- und Instandhaltungsarbeiten werden von März bis September durchgeführt. Dies führt zu hohen wirtschaftlichen Nachteilen für die Betreiber der WEA, da Stillstandzeiten der WEA im Winter unvermeidlich sind.

II. Projektbericht

1. Forschungs- und Entwicklungsziele

In der Konzeptphase werden verschiedene Kletterprinzipien dem Gurtklettersystem gegenübergestellt, um das Konzept zu validieren. Das Ergebnis ist eine Konzeptänderung. Das ursprüngliche Gurtantriebsystem wird durch Kettenfahrwerke ersetzt.

Diese Konzeptänderung wurde von allen Projektpartnern SII Deutschland GmbH, gebr. Käufer GmbH und IgH abgestimmt und vom Projektträger Jülich in Abstimmung mit dem BMWi genehmigt.

Die F&E Ziele können der folgenden Tabelle entnommen werden. Die Tabelle fasst die Vorteile der Kettenfahrwerke gegenüber dem Gurtkletterkonzept zusammen.

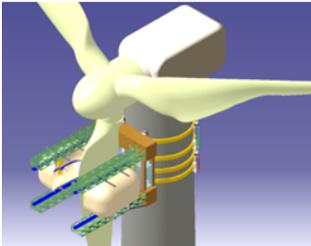
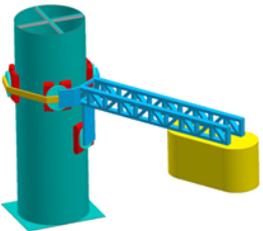
	Kletterprinzip	Klettergeschwindigkeit	Bewegung in Umfangerichtung	Bauvolumen	Turbulenzlast	Inspektion und Reparatur von Rotorblättern	Inspektion und Reparatur vom Turm	Transport von Rotorblättern	Transport von Ersatzteilen
Gurtkletterkonzept 	intermittierend	max. 3 m/min	ungelöst	*1	-	●	-	-	-
Kettenkletterkonzept 	kontinuierlich	6-15 m/min	gelöst	*2	++	●	+	*3	+

Abbildung: Bewertungsmatrix Gurte und Kettenantriebe

Weitere technische Details dieser Konzeptänderung entnehmen Sie aus dem eingereichten Zwischenbericht_FH_Juli_2015.

2. Darstellung der Verwendung der Zuwendungsmittel

Für die Forschungseinrichtung eröffnen sich durch die erfolgreiche Umsetzung des patentierten Systems verschiedene Verwertungsaussichten. Durch bereits bestehende und eventuell noch anzumeldende Patente bezüglich dieses Vorhabens werden Lizenzeinnahmen möglich. Weiterhin festigt sich mit der erfolgreichen Umsetzung die Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie, was die Akquise von Drittmitteln deutlich vereinfacht. Als zuverlässige Kompetenzpartner bei der Realisierung von Industrieprojekten wird die Forschungseinrichtung das hierdurch erlangte Wissen an deutsche Unternehmen weitergegeben. Die damit verbundenen finanziellen Zuwendungen werden auch die Position der Forschungseinrichtung weiter sichern und hochqualifizierte Arbeitsplätze in F&E und der Ausbildung schaffen. Darüber hinaus wird der erzielte Fortschritt neue Forschungsfragen aufwerfen, die als Ausgangspunkt für weitere Aktivitäten und Forschungsprojekte zu sehen sind. Mögliche Lizenzeinnahmen fließen in die Qualitätsverbesserung der Lehre und Kompetenzerweiterung der Hochschule ein. Über Veröffentlichungen in der Fachpresse und wissenschaftliche Artikel werden die Ergebnisse der Öffentlichkeit aus Forschung und Industrie zugänglich gemacht und der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt.

Als Voraussetzung für die Akzeptanz zum vermehrten Einsatz und zur Nutzung von Windkraftanlagen sowie zur kostengünstigen Stromerzeugung sind neuartige Systeme zur Kontrolle, Wartung, und Reparatur von Windkraftanlagen notwendig. Durch die Entwicklung dieser neuen, leistungsfähigen Systeme zur effizienten und wirtschaftlichen Instandhaltung kann ein neuer, zukünftig stark wachsender Markt im Windanlagenbereich bedient werden. Die entwickelten Technologien werden für den Einsatz an Windanlagen im On- und Offshore-Bereich in Zukunft national und international stark an wirtschaftlicher Bedeutung gewinnen.

Eine selbstkletternde Wartungs- und Transportplattform würde die Wartung und Reparatur von Windkraftanlagen revolutionieren, was sich in Gesprächen mit entsprechenden Firmen auf der Husum Wind-Messe 2012 bestätigt hat. Die in diesem weltweiten Markt tätigen Firmen, Gebr. Käufer GmbH und Ingenieurgemeinschaft Gesellschaft für Ingenieurleistungen mbH haben diese zukunftssträchtige Innovation erkannt und unterstreichen dies mit ihrer Beteiligung an diesem Vorhaben. Die Ergebnisse der Entwicklung und Konstruktion dieser Wartungsplattform werden in industriellen Produktentwicklungen Verwendung finden und dadurch die Wettbewerbsfähigkeit der in diesem Entwicklungsprojekt beteiligten Firmen herausragend verbessern. Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten stellen sich hervorragend dar, da mit dieser Erfindung der Stand der Technik eindeutig übertroffen und Neuland betreten wird. Eine Mitarbeit in diesem Forschungsvorhaben würde zudem die Kompetenzen der Projektbeteiligten auf diesem Zukunftsmarkt weiter stärken und somit auch eine weitere gewünschte Diversifikation vorantreiben. Zudem eröffnet sich den industriellen Projektpartnern die Möglichkeit, Zugang zu neuen Märkten und neuen Kunden zu erhalten und sich am stark wachsenden nationalen und internationalen Windenergie-Markt zu etablieren und zu positionieren. Gefördert wird zudem auch die Sicherung und Schaffung von hochqualifizierter Forschung & Entwicklung sowie von Produktions- und Ausbildungsarbeitsplätzen.

Die hier vorgestellte Technologie bietet unterschiedliche wirtschaftliche Erfolgsaussichten. Zunächst wird mit dem Demonstrationsobjekt der interessante Markt der regenerativen Energien erschlossen. Hier besteht die Aussicht in Zukunft Komponenten, Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln, die das Portfolio der beteiligten Industriepartner sinnvoll erweitern. Die anspruchsvolle Aufgabe, die insbesondere in Bezug auf Sicherheitstechnik, Robotik und Automation reizvolle Herausforderungen stellt, bietet im Sinne der Technologieentwicklung die Aussicht auf attraktive Lösungen, die auch in anderen Branchen, die von den Partnern adressiert werden, vermarktet werden können. Schließlich besteht konkret die Option auf Servicedienstleistungen im Bereich der regenerativen Energien.

Auf Basis der Ergebnisse aus dem SMART Gesamtprojekt (Phase I und Phase II) werden die Verbundpartner die Möglichkeit haben, ein serienreifes Produkt zu entwickeln, welches weltweit vermarktet werden kann. Käufer vervollständigt mit der Gesamtlösung SMART ihr derzeitiges Produkt-Portfolio auf die zukünftigen Anforderungen und erweitert somit ihre Möglichkeiten und Kompetenzen auf diesem Gebiet maßgebend. Da die Anforderungen gestiegen sind, wird derzeit bereits nach Anlagensystemen mit flexiblen Lösungsansätzen verlangt.

Die gewonnenen Kenntnisse aus der Phase I werden zunächst als Basis für die Entwicklung des 1:1 Prototyps genutzt. Die Kenntnisse aus den beiden Phasen fließen in einen detaillierten Verwertungsplan für die Beendigung der Phase II in 2019 ein.

3. Projektergebnisse

Phase I des Forschungsprojekts wird erfolgreich mit der Inbetriebnahme eines funktionalen 1:3 Demonstrators des Kletterroboters abgeschlossen.

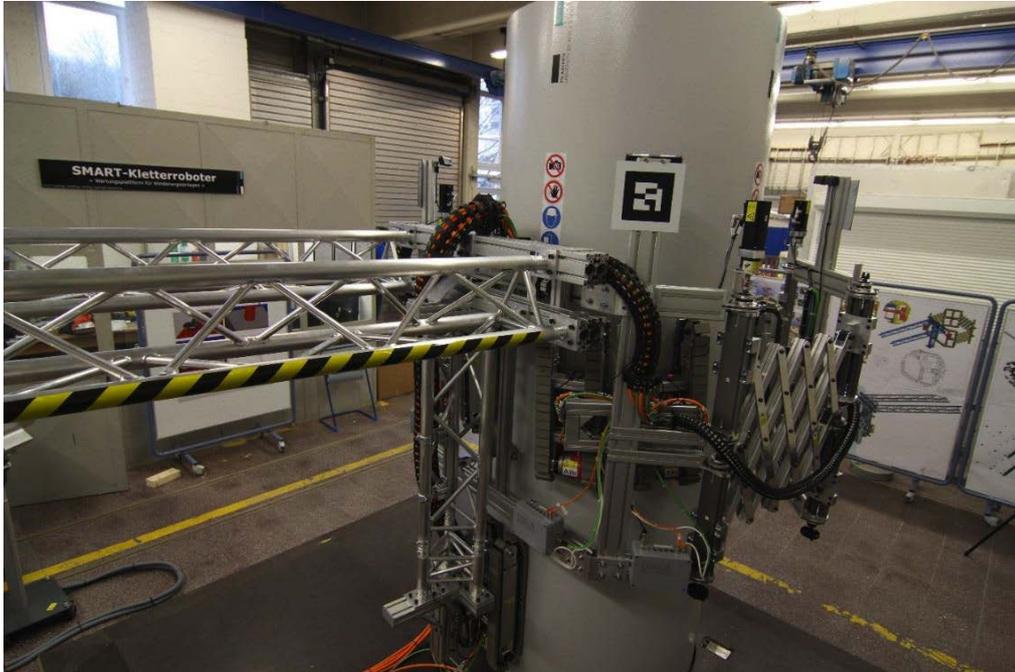


Abbildung 6: F&E Ergebnis des Forschungsprojekts, Phase I

Der Demonstrator erfüllt die Zielsetzungen des Forschungsprojekts wie im Folgenden zusammenfassend dargestellt wird:

Die meist konischen WEA Türme besitzen keine mechanisch belastbaren Elemente an ihrer Struktur, um ein formschlüssiges Klettern zu ermöglichen. So kann nur kraftschlüssig, durch Nutzung der Reibung zwischen Turmoberfläche und Klettersystem, die benötigte Haltekraft erzeugt werden. Das ursprüngliche Kletterprinzip basierte auf der Erzeugung der benötigten Normalkräfte durch Gurte, ähnlich wie beim Klettern von Industriesteigern, die z.B. auf Strommasten steigen. Es sollten dabei zwei Gurtsysteme zum Einsatz kommen, die abwechselnd im Eingriff sind. Das äußere Gurtsystem B sollte den SMART mit den Auslegern und der Arbeitskabinen fixieren, wobei das innere Gurtsystem A im System B auf einer Traversierung beweglich ist. Beide Gurtsysteme sind zeitgleich im Eingriff, wenn der SMART am Turm als Serviceplattform genutzt wird. Hier ergeben sich folgende Probleme beim Einsatz von Spanngurten, die nur schwer zu lösen sind:

- > **Spannen der Gurte,**
- > **Wickeln der Gurte und**
- > **Hohe Turmbelastung.**

Das entscheidende Kriterium gegen den Einsatz eines gurtbasierten Kletterns ist die erhöhte Turmbelastung durch die wechselnde Belastung der beiden Gurtsysteme und

die fehlende Übertragung von Querkräften. Das Spannen und Entlasten der beiden Gurtsysteme erzeugt besonders in der Übergangsphase, wenn ein Gurtsystem seinen Hub zurückgelegt hat und beide Systeme im Eingriff sind, eine doppelt so hohe Turmbelastung verglichen mit einer kontinuierlichen Kletterbewegung, wie bspw. durch Kettenantriebe. Eine starre Kopplung der Antriebe nimmt einen Teil der entstehenden Querkräfte auf und reduziert damit die Größe der zu erzeugenden Normalkräfte, die für eine kraft- bzw. reibschlüssige Verbindung von Turm und SMART genutzt werden können. Umfangreiche FEM Analysen zeigen die Vorteile einer biegesteifen, im Vergleich zu einer biegeschlaffen Kopplung hinsichtlich einer geringen Turmbelastung. Ein biegesteifes Verbindungskonzept begünstigt zusätzlich die Schwerpunktlage. Eine starre Kopplung muss sich jedoch der unterschiedlichen Geometrie der konischen WEA-Türme anpassen. Die Normalkräfte, die bei der Annahme von relativ geringen Reibungskoeffizienten von $\mu=0,2$ und einer Gewichtskraft von 50kN auftreten würden, hätten eine zu starke Verformung des Turmes erzeugt. Durch diese starke Verformung hätte ebenfalls die Gefahr des Knickens des Turms berücksichtigt werden müssen.

Ein Großteil der WEA Türme sind konisch und verjüngen sich nach oben, so dass Durchmesserhältnisse von bis zu 1:3 auftreten können. Bei der Gestaltung der Kettenfahrwerke und Kettenpratzen wurde auf geringste Turmbelastung und beste Übertragung der Kräfte in die einzelnen Elastomer-Pratzen geachtet. Das verwendete Elastomer besitzt dabei nachgewiesene Reibwerte von bis zu $\mu=2,1$ im Neuzustand bei trockener Turmoberfläche. Die biegesteifen Querverbindungen wurden als „Nürnberger Schere“ ausgebildet und können durch eine vertikale, servomotorgetriebene Gewindespindel sowohl in der Länge angepasst, als auch gespannt werden (Spannsystem). Eine Generierung der Spannkkräfte über ein Seilsystem ist möglich und wird in einem weiteren Schritt untersucht.

In Phase I des Forschungsprojektes wurde ein Demonstrator im Maßstab 1:3 entwickelt, der an einem Versuchstand verifiziert wurde. In Phase II soll der Demonstrator auf den Maßstab 1:1 hochskaliert und als Prototyp gebaut werden. Die Skalierung soll durch die Erstellung eines kinematischen Modells des Kletterroboters unterstützt werden. So wird die Kinematik des Demonstrators in der Mehrkörpersimulation (MKS) Software ADAMS abgebildet und simuliert, um verschiedene Auslegungen z.B. für die Regelung des Spannsystems und der Antriebe testen zu können. Weiterhin dient die Erweiterung als dynamisches Modell zur Abschätzung der zu erwartenden Kräfte und Momente für den Demonstrator. Bild 5a zeigt das generierte Modell. Bild 5b zeigt die Verteilung der simulierten Normalkräfte im statischen Zustand des SMART bei eingeschaltetem Spannsystem.

Die Simulation der Kettenfahrwerke wird mit dem ADAMS Tracked Vehicle Modul (ATV) durchgeführt. Die Analyse in ATV zeigt, dass riemenbasierte Kettenfahrwerke die gewölbte Turmoberfläche ungleichmäßig belasten. Vergleichende Untersuchungen haben gezeigt, dass mit Plattenketten eine nahezu gleichförmige Verteilung der Flächenpressung am Turm erreicht werden kann. Die konstruierte Kette ist eine Rollen-Laschenkette auf der Elastomerprofile montiert werden, die individuell hinsichtlich Reib- und Federeigenschaften gestaltet werden können. Die integrierten Gleitlager auf den Bolzen der Kette rollen mit einem experimentell nachgewiesenen Rollwiderstand $c_R = 0,08$ auf einer Polymer Gleitschiene ab, die eine gleichmäßige

Lastverteilung der Normalkräfte auf der Turmoberfläche sicherstellen. Die Kletterbewegung kann als kontinuierliches Schreiten beschrieben werden. Bedingt durch mögliche Rutsch- und Setzprozesse sind ein turmseitiges Aufbäumen der Kette zwischen den Umlenkrollen, sowie die Ablösung einzelner Pratzten, ausgeschlossen. Des Weiteren ermöglicht die Gleitschiene sowohl die Normalkräfte einzuleiten, als auch in Umfangsrichtung wirkende Kräfte – z.B. durch eine Lenkbewegung (Skid-Steering) - wirkungsvoll auf der gesamten Kettenlänge zu kompensieren. Dadurch wird die Torsion und Biegung der Kettenglieder auf ein Minimum reduziert.

Ferner zeigt die Simulation, dass die Fahrwerke sich bei zentrischer Lasteinleitung aufbäumen, insbesondere beim Anfahren. Bedingt wird dieses Fahrverhalten durch die hohen Kräfte, die vertikal an den Kettenfahrwerken anliegen. Dieser Effekt wird konstruktiv durch die Einleitung der Normalkräfte oberhalb des Fahrwerkszentrums kompensiert.

Der Demonstrator besitzt insgesamt zehn Kettenantriebe, die äußerst kompakt und leicht aufgebaut sind, um die Gewichtskräfte, bei gleichzeitiger Erhöhung der Tragkraft, zu reduzieren. Sowohl für die Überwindung des Losfahrmomentes als auch zur Kompensation der Walkarbeit wurden Harmonic-Drive Antriebe eingesetzt, die ein hohes Drehmoment liefern können. Zur präzisen Regelung der Antriebe werden hochauflösende Absolutencoder mit Servoverstärkern verwendet. Damit kann in der Demonstrator-Phase eine synchrone Drehzahl der einzelnen Motoren sichergestellt werden, um so möglichst auf einer Geraden den WEA-Turm hochzuklettern. Es sind aber auch Untersuchungen zum Skid-Steering möglich: die Erzeugung einer Drehung um die Turmachse durch Variation der beiden Drehzahlen jeweils eines Kettenantriebes. Die Verifikation der erstellten kinematischen Modelle erfolgt mit einem selbsterstellten Trackingsystem auf Basis der `ar_track_alvar` Algorithmen, welche mit dem Robot Operating System (ROS) implementiert wurden. Rückgeführt wurden die Messwerte mit Hilfe eines 6 Achs-Roboters – dem Mitsubishi RV-3SB - welcher über eine Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,02$ mm verfügt [4]. Hierbei wurde die Kamera am TCP des Roboters befestigt. Eine entsprechende Marke wurde parallel zur horizontalen Achse des TCPs ausgerichtet und in einer Distanz von 3,50 m zur Kamera fixiert. Bild 7 zeigt den Verlauf des systematischen Fehlers bei Variation der horizontalen Position, der durch eine Kalibrierung korrigiert wird. Die Messunsicherheit $U_{95\%}$ liegt dabei unter 0,2 mm. Zusätzlich dienen 6DOF-IMU Sensoren auf Basis des MPU6050 zur Bestimmung der Lage der Kettenantriebe im Raum und generieren zusätzlich die Winkelgeschwindigkeiten der Lagewinkel. Diese Daten dienen ebenfalls zur Überprüfung des kinematischen Modells.

Nach Verifikation des kinematischen Modells werden die Kräfte im Modell simuliert. Der Demonstrator wurde zur experimentellen Überprüfung des dynamischen Modells mit mehreren 6-Achs-Kraft- bzw. Momentensensoren ausgerüstet, die eine Erfassung des zeitlichen Verlaufs der Belastungen ermöglichen. Nach Berücksichtigung der experimentellen Ergebnisse und Abgleich mit dem kinematischen und dynamischen Modell, sollen die erstellten Modelle in Phase II des Projekts zur Skalierung des SMART Kletterroboters als 1:1 Prototyp dienen.

Als Grundlage für die Entwicklung des Demonstrators im Maßstab 1:3 wurden frühzeitig im Projekt Tischmodelle im Maßstab 1:20 gefertigt. Die beiden Tischmodelle

sind voll funktionsfähig und ermöglichen die praktische Untersuchung der kinematischen Zusammenhänge. Dadurch können die Simulationsergebnisse in einem frühen Entwicklungsstadium validiert werden. Das Tischmodell für das Kletterprinzip mit Gurten zeigte die negativen Einflüsse der Gurtdehnung: der Kletterroboter bewegt sich nach jedem Spann- und Lösezyklus nach unten. Als Konsequenz verkürzt sich der theoretische Hub des Klettermechanismus. Die Steuerung des Klettervorgangs für das Tischmodell wurde ebenfalls unter ROS implementiert.

An einem weiteren Tischmodell auf Basis von Kettenfahrwerken konnte die Antriebsregelung entwickelt und erste Erfahrungen mit dem kontinuierlichen Klettern gesammelt werden. Die gleichförmige Bewegung aller Kettenfahrwerke führt auf Grund unterschiedlicher Belastungen, Mikrogleiten bzw. Schlupf - insbesondere bei Lenkbewegungen - dazu, dass sich Spannungen in der biegesteifen Verbindung aufbauen, deren Größe und Art zukünftig am Demonstrator untersucht werden sollen.

4. Notwendigkeit der Arbeit

Die Notwendigkeit der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten begründet sich auf dem Wartungsbedarf und der steigenden Anzahl von installierten WEA weltweit. Wie im Stand der Technik dargestellt wird, ist es mit gängigen technischen Hilfsmitteln nicht möglich den Wartungsbedarf zufriedenstellend abzudecken.

5. Verwertung der Projektergebnisse

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Phase I werden zunächst als Basis für die Entwicklung des 1:1 Prototyps genutzt und verwertet. Die Kenntnisse aus den beiden Phasen insbesondere aus der Phase II werden in einem detaillierten Verwertungsplan für die Beendigung der Phase II in 2019 geplant. Ein Verwertungsplan für die Phase II wurde im Antrag beschreiben.

Die Entwicklungs- und Forschungsergebnisse können nach der Patentoffenlegung, spätestens bis März 2016, bekanntgegeben werden. Die Aufgabe, der sich SMART stellt, wird bereits großes Interesse entgegengebracht, unabhängig von der tatsächlichen Ausführung. Windenergieanlagenhersteller, -betreiber und Servicedienstleister sehen für den zukünftigen Einsatz des SMART Kletterroboters sehr großes Potential.

Deutschland steht heute mehr denn je hinter der Windenergie und die finanziellen Aussichten für eine wetterunabhängige Wartungsplattform, wie den SMART, sind sehr gut. Der erste Einsatz des Prototyps hängt maßgeblich davon ab, wann die Phase II beginnt. Das Projektteam ist hoch motiviert, die Realisierung anschließend in kürzester Zeit abzuschließen. Prognostiziert sind 24 Monate bis zum ersten Einsatz (Gesamtdauer 36 Monate), um dem positiven Druck aus Industrie und Wirtschaft, in Bezug auf dieses Projekt, nachzukommen.

6. Stellungnahme zum Wettbewerb

Auf der Webseite <http://www.gevwindpower.com/> existiert eine Veröffentlichung im Bereich wetterfeste Arbeitskabinen für WEA-Türme und Rotorblätter, die das bestehende Patent der FH-Aachen möglicherweise verletzt. Es lässt sich erahnen, dass eine Schutzhülle (Abb. 7 und Abb. 8) um den Arbeitsraum aufgespannt oder aufgeblasen wird. Die Firma GEV hat ihr Interesse bekundet ihre Zelle mit den Hebebühnen der Firma Käufer zu kombinieren.

Die Firma Käufer sieht diese Applikation kritisch, auch durch die Bestätigung aus den Forschungsergebnissen des SMART-Projekts. Bei einer Arbeitshöhe von 50 m – 120 m treten hohe Staudrücke von etwa 250 N/m^2 – 500 N/m^2 (Windgeschwindigkeit 6-10 m/s, ohne Böen) auf. Herkömmliche Seilhubsysteme können diesen Kräften nicht standhalten, da keine horizontale Fixierung am Turm existiert. Die Abspannung nach oben nimmt nur vertikale Zugkräfte auf (Gewichtskraft) und die Abstützung am Turm wirkt nur in eine Richtung. Es besteht Schwingungs- und Kippgefahr und damit ein hohes Risiko für die Besatzung. Angesichts der Tatsache, dass der Wind aus allen Richtungen kommen kann, durch Verwirbelungen z.B. auch von unten, ist eine solche Konstruktion nur bei sehr kleinen Windgeschwindigkeiten denkbar. Aus diesem Grund strebt das SMART-Projekt weiter die reibschlüssige Kopplung mit dem Turm an. Die durch Wind verursachten Kräfte können dann kompensiert werden.



Abbildung 7: GEV – Geschlossen Arbeitskabinen

Die FH Aachen hat das GEV-Zelt auf der ExCel London am 24.06.2015 besucht. Die Gespräche mit den verantwortlichen Managern am Messe-Stand ergaben, dass ein Klettern bei höheren Windgeschwindigkeiten nicht beabsichtigt wird. Die Vorteile der Einhausung sind damit sehr fragwürdig. Ein Schutz vor leichtem Regen besteht, aber dieser geht in größeren Höhen oft mit entsprechenden Windgeschwindigkeiten einher.



Abbildung 8: GEV – Systemvorstellung auf ExCel Messe in London

Die Veröffentlichung der Firma TEMBRA GbmH vom 07.05.2015 auf dem Windmesse-Symposium in Hamburg zeigt ein Simulationsbild von einem Kran am Turm mit einem Generator am Haken. Auch hierbei sind keine technischen Einzelheiten bekannt, wie der Kran entlang des Turms nach oben transportiert wird. TEMBRA geht in der Pressemitteilung explizit auf die Turmbelastung ein, was zeigt, dass Sie sich mit dem Thema ebenfalls detailliert befassen. Allerdings ist fraglich, ob das dargestellte Modell dieser Anforderung bereits gerecht wird. Basierend auf unseren Ergebnissen sind die sichtbaren Andruckflächen sehr knapp bemessen.

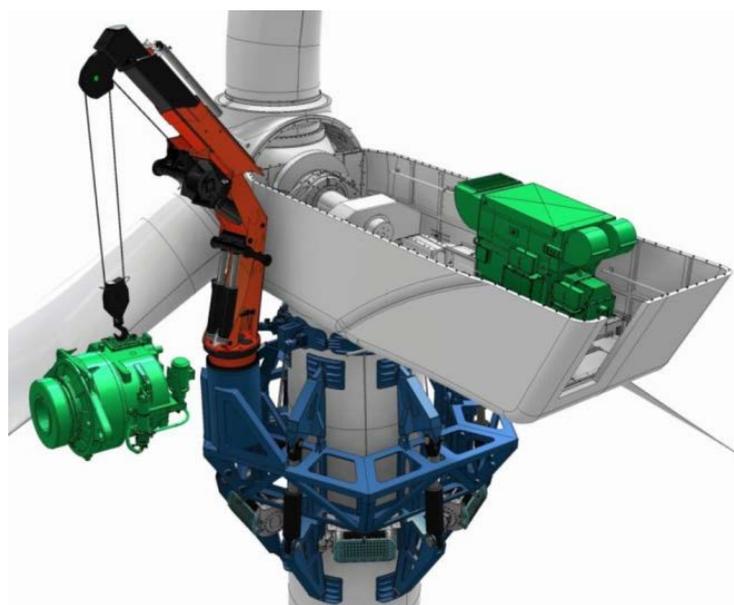


Abbildung 9: TEMBRA – Schwenkkrane

Eine weitere Veröffentlichung von der Firma WPSYSTEMS, welche auf der WindEnergy Messe Hamburg in September 2016 als ein Modell gezeigt wurde, stellt ebenfalls keinen ernstzunehmenden Wettbewerb zum SMART-Projekt dar. Das Prinzip der Kabinenführung basiert auf der konventionellen Vorgehensweise, welche von unserem Projektpartner Firma Käufer GmbH, die solche Anlagen herstellt, ebenfalls eingesetzt wird. Auch der Flyer des Produkts beinhaltet keine Details.



Abbildung 10: Wettergeschützte Kabine mit Seilaufzugsystem

7. Veröffentlichungen

Vier wissenschaftliche Veröffentlichungen:

M. Bagheri, J. Schleupen, P. Dahmann, S. Kallweit, A multi-functional device applying for the safe maintenance at high-altitude on wind turbines, 20th International Conference on Composite Materials – ICCM20, Copenhagen, Denmark (Conference Paper), 2015

J. Schleupen, H. Engemann, M. Bagheri, S. Kallweit, et. al., Developing a climbing maintenance robot for tower and rotor blade service of wind turbines, International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region – RAAD 2016, Belgrad, Serbia (Conference Paper), 2016

J. Schleupen, H. Engemann, M. Bagheri and S. Kallweit, The potential of SMART climbing robot combined with a weatherproof cabin for rotor blade maintenance, 17th European Conference on Composite Materials – ECCM, Munich, Germany (Conference Paper), 2016

S. Kallweit, P. Dahmann, M. Bagheri, J. Schleupen, et al., Development of a climbing-robot for diagnose and maintenance of wind turbines, 13th Applied Automation technology in Education and Development – AALE, Lübeck, Germany (Conference Paper), 2016

Zeitungsartikel:

Schwäbische Post, Kletterroboter für Windräder, 17.12.2015

golem.de, Windkraftwerke – Kletterroboter für Windräder, 17.04.2015

taz.de, Bagheri hat einen Kletterroboter entwickelt, 17.04.2015

heise online, Es geht aufwärts: Kletternder Roboter soll Windräder direkt vor Ort reparieren, 14.04.2015

technikjournal.de, Neue Wartungstechnik für Windräder – Kletterroboter für Windkraftanlagen, 20.12.2014

Wirtschaftlichen Nachrichten IHK, FH-Forscher entwickeln weltweit einzigartigen Kletterroboter für Windkraftanlagen (S.38), Oktober 2014

Wirtschaftszeitung AKTIV, Innovation: Kletter-Roboter, 15.10.2014

Aachener Nachrichten, Aachener Idee bringt die Aufsteiger voran, 24.9.2014

Weitere:

WDR Fernsehen, Aachen: Kletterroboter für Windräder, 25.09.2014

Universitätsbibliothek RWTH-Aachen, Patent des Monats, 1.10.2014

III. Anlage 1: Erfolgskontrollbericht

1. Beitrag zum 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

Es gilt die übergreifenden Ziele der Energiewende der Bundesregierung zu erfüllen. Im Rahmen einer Weiterentwicklung des 6. Energieforschungsprogramms wird bei den jetzt beabsichtigten Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen die zu erwartende hohe Komplexität des künftigen Energiesystems noch stärker als bisher berücksichtigt. Gefördert werden vorwiegend Vorhaben der anwendungsorientierten industriellen Forschung und der vorwettbewerblichen Entwicklung sowie Vorhaben mit einem interdisziplinären bzw. systemorientierten Ansatz. Hierbei soll die technologieübergreifende Kopplung von weitestgehend entwickelten Einzelkomponenten zu einem Gesamtsystem im Vordergrund stehen. Die Weiterentwicklung und Integration von neuen Informations- und Kommunikationstechnologien, Fragen der Systemsicherheit und Systemzuverlässigkeit sowie der Akzeptanz sind hierbei von zentraler Bedeutung. Gegenstand der Förderung sind Windenergie, Photovoltaik, tiefe Geothermie, Solarthermische Kraftwerke, Wasserkraft und Meeresenergie, Kraftwerkstechnik sowie CO₂-Abscheidung und -speicherung, Brennstoffzellen und Wasserstofftechnologien, Energiespeicher, Stromnetze, Systemintegration erneuerbarer Energien, Energieoptimierte Gebäude und Quartiere – dezentrale und solare Energieversorgung, Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen, Energiewirtschaftliche Schlüsselemente der Elektromobilität, Systemanalyse und Systemübergreifende Technologieansätze für die Energiewende.

Die Nutzung der Windenergie kann in Deutschland kurz- und mittelfristig den größten und wirtschaftlichsten Beitrag zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energiequellen bei der Elektrizitätserzeugung liefern. Um die Potenziale an Land (onshore) wie auf See (offshore) schnell, kostengünstig und umweltverträglich erschließen zu können, sind weitere technische Innovationen und neue Strategien notwendig. Schwerpunkte der Forschungsförderung stellen die Technologieentwicklung für die Windenergienutzung auf See und an Land sowie der umweltverträgliche und wirtschaftliche Ausbau der Windenergie dar.

Um die spezifischen Kosten zu senken, den Stromertrag zu steigern sowie die Verfügbarkeit und Umweltverträglichkeit von Windenergieanlagen zu erhöhen, werden z. B. die im Folgenden aufgelisteten Förderschwerpunkte gesehen:

- Optimierung und Kostensenkung der Bau- und Logistikprozesse on-/offshore,
- Innerparkverkabelung offshore inklusive der Entwicklung von Verlegekonzepten,
- Entwicklung von innovativen und praxistauglichen Offshore-Zugangssystemen,
- Condition Monitoring Systeme für die gesamte Anlage oder deren Komponenten,
- Optimierung und Kostensenkung bei Wartung und Betriebsführung von Windenergieanlagen inklusive langlebiger Betriebs- und Verbrauchsmittel sowie geeigneter Überwachungssysteme,
- Entwicklung innovativer Anlagensteuerungs- und –regelungskonzepte, z.B. zur Lastreduzierung im Triebstrang.

Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen (aus dem Antrag)

Das Vorhaben wird im Rahmen der Fördermaßnahme „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ beantragt. Der Bezug besteht darin, dass vier Unternehmen und eine Forschungseinrichtung ein risikobehaftetes Vorhaben mit Aspekten der industriellen Forschung und der vorwettbewerblichen Entwicklung **im Bereich der Windenergie (3.1)** durchführen möchten.

Inhaltlich wird das Vorhaben dem Bereich **„Logistik, Anlageninstallation, Instandhaltung und Betriebsführung (3.1.6)“** zugeordnet. Das Vorhaben zielt auf die Optimierung und Kostensenkung bei Wartung und Betriebsführung von Windenergieanlagen ab. Nach einer Studie der Deutschen WindGuard GmbH [3] entfallen in den ersten 10 Jahren 44% der mittleren Betriebskosten auf diesen Bereich. Erfahrungsgemäß steigen die Kosten für Wartung und Reparatur in der zweiten Dekade der Anlagenlebensdauer von etwas über 1,05 ct/kWh (44%) auf 1,47 (55%) ct/kWh und machen damit den mit Abstand größten Betriebskostenanteil aus.

Durch die Kooperation von Industriepartnern und Forschungseinrichtungen ist sichergestellt, dass zunächst Ansätze und Ergebnisse der Grundlagenforschung mit in die technologischen Entwicklungen einfließen und nachfolgend eine Rückkopplung der Ergebnisse der Praxistests in die Grundlagenforschung erfolgt.

2. Zusammenfassung wissenschaftlich-technischer Ergebnisse

Die Machbarkeit für einen Textilgurt als Antriebsfahrwerk im Zuge der Grobauslegung wurde als „zu aufwändig“ bewertet. Zudem beansprucht das Gurtprinzip die WEA-Türme bis zu ihrer statischen Belastungsgrenze, da mehrere Gurte gleichzeitig im Eingriff sein müssen und sich so die aufzubringenden Kräfte vervielfachen. Eine detaillierte Studie konnte nachweisen, dass andere Prinzipien besser geeignet sind, die eine geringere Belastung der WEA-Türme erzeugen. Gegenstand der Studie ist eine Vielzahl von verschiedenen Lastfällen, die für eine bestimmte Turmgeometrie mit dem FEM-Programm ANSYS analysiert wurden. Die Ergebnisse sind von externer Stelle, durch Prof. Laumann vom Fachbereich Bauingenieurwesen, der Fachhochschule Aachen, bestätigt. Weitere Betrachtungen der Turmbelastung werden dynamische Lasten, lokales Beulen und Knickung einschließen. Diese Vorgehensweise wird mit den angeschafften Tools für alle weiteren Entwicklungen am SMART wiederholt, da die Turmbelastung ein kritischer Faktor ist.

Eine durchgeführte Nutzwertanalyse zeigt, dass kontinuierlich bewegende Systeme den intermittierend kletternden Systemen vorzuziehen sind.

Der Aufbau eines vorläufigen CAD-Modells zur Berechnung des Gewichts für einen durch Ketten angetriebenen SMART 1 ist abgeschlossen. Anhand dieser abschätzenden Konstruktion konnten Kernprobleme und grundsätzliche Fragestellungen definiert werden, die im Rahmen von neuen Arbeitsplänen zusammen mit den Partnern bearbeitet werden.

Der SMART erfordert eine Leichtbauvariante mit besonderem Fokus auf eine gleichmäßige Flächenpressung zwischen Kettenfahrwerken und Untergrund. Zu diesem Zweck soll eine Sonderlösung entwickelt werden. Zentrale Fragestellungen sind: welche Materialien und welche Geometrien sind für einen Kettenantrieb geeignet, der WEA-Türme befahren soll? Eine Möglichkeit besteht u.a. darin, eine Kette aus einzelnen Reibsegmenten aufzubauen, die eine gleichmäßige Kraftübertragung auf den Turm besitzen. Des Weiteren spielt die Profilierung eine wichtige Rolle, da diese sowohl einen Einfluss auf den Reibbeiwert als auch auf die lokale Turmbelastung hat.

Ein wichtiger Teil der SMART-Entwicklung stellt die Gestaltung des Auslegers für die Bearbeitungsplattform dar. Es wurde die Möglichkeit untersucht, den SMART modular zu gestalten, sodass die Auslegerlänge zwischen 8 und 18 Meter variieren kann. Dies ermöglicht es, die Wartungsplattform für verschiedene WEA-Leistungsklassen anzupassen. In Kombination mit den Kettenantrieben besitzt dieses Konzept den Vorteil, dass die Anzahl der Kettenantriebe auf das Fördergewicht anpassbar ist. Die Skalierung eines Gurtsystems ist deutlich komplexer.

Weitere Überlegungen schließen eine mechanisch steife Verbindung der Antriebselemente als eine Art „Rahmen“ um den Turm ein. Dies erzeugt ein redundantes Sicherheitskonzept und eine gleichmäßigere Verteilung der Reibkräfte entlang des Turmumfangs. Die FEM-Analyse bestätigt diese Vermutung: ein symmetrischer Belastungsfall mit mehr als vier Eingriffspunkten ist günstiger für die Turmbelastung als einseitige Überlasten.

Parallel konnten zwei Tischmodelle der verschiedenen SMART-Konzepte während des Berichtszeitraums fertiggestellt werden. Diese dienen der Veranschaulichung und Präsentation der grundlegenden Kletterprinzipien auf der Hannover-Messe im April 2015.

Der Projektplan hat am 26.03.2015, zum Ende der Konzeptphase, eine umfangreiche Aktualisierung erfahren und ist für das neue Konzept „Kettenfahrwerk mit Platten-/Pratzenketten“ angepasst worden. Umfangreiche technische Fragestellungen wurden im Rahmen ganztägiger Workshops von der Projektleitung und den Partnern bearbeitet z.B. Walk-/Rollwiderstand von Kettenfahrwerken, resultierende Lagerkräfte im Gesamtsystem.

Die offenen Punkte im Lastenheft können nur mittels Vorversuchen und Versuchen am Gesamtsystem abschließend beantwortet werden. Dazu gehören:

- > Roll-/Walkwiderstand von Kettenantrieben,
- > Anfahr-/Losbrechmoment für Kettenantriebe,
- > Reib-/Haftreibwert für verschiedene Gummiarten,
- > Intrinsische Verluste bzw. Wirkungsgrad von Kettenantrieben,
- > Querkräfte in Umfangsrichtung um den Turm bei dynamischer Bewegung, insbesondere durch schwingende Massen am Auslegerende und Skid-Steering, mit der Gefahr, das Kettenantriebe verkippen/rollen könnten und,
- > die Turmbelastung bei der Lenkbewegung in Umfangsrichtung (siehe Abb. 11), da sich die Kontaktfläche beim Lenken verkleinert.

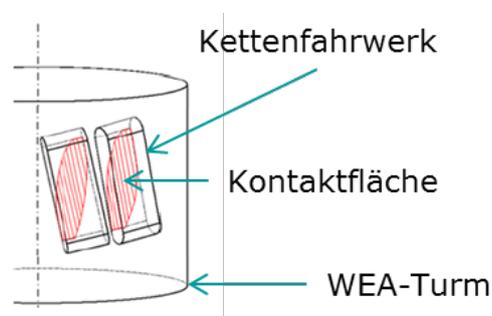


Abbildung 11: Kontaktflächen zwischen SMART und Turm (Lenkbewegung)

Bezüglich dieser Risiken und Probleme sind umfangreiche theoretische Überlegungen angestellt worden, jedoch kann zurzeit aufgrund der Komplexität des Problems kein

analytisches Modell generiert werden. Das generierte MKS Modell stellt aber den Betrieb in der Testphase sicher.

Simultan hat sich die Projektleitung dafür ausgesprochen zwei verschiedene Spannsysteme zu entwickeln, um die Risiken auf ein Minimum zu reduzieren. Ebenso werden die Fahrtriebe zunächst im Rahmen einer Pilotserie, zwei Stück, umgesetzt.

Für jeden Partner SII Deutschland GmbH, gebr. Käufer GmbH und IgH wurde individuell ein separater Teil im Lastenheft angelegt („Kettenantriebe AP 5000“, „Verbindungsmechanik AP 3000“, „Grundkörper AP 2000 und Trägerarme/Lastausleger AP 4000“). Im Lastenheft wurden die Eigenschaften und Ziele des neuen Konzepts definiert und Funktionen, Lasten und Belastungen für die Entwicklung und Konstruktion festgelegt. Ferner wurden Schnittstellen definiert über welche die Teilsysteme der Partner im September bis Dezember 2015 zusammengeführt werden (siehe Abb. 12).

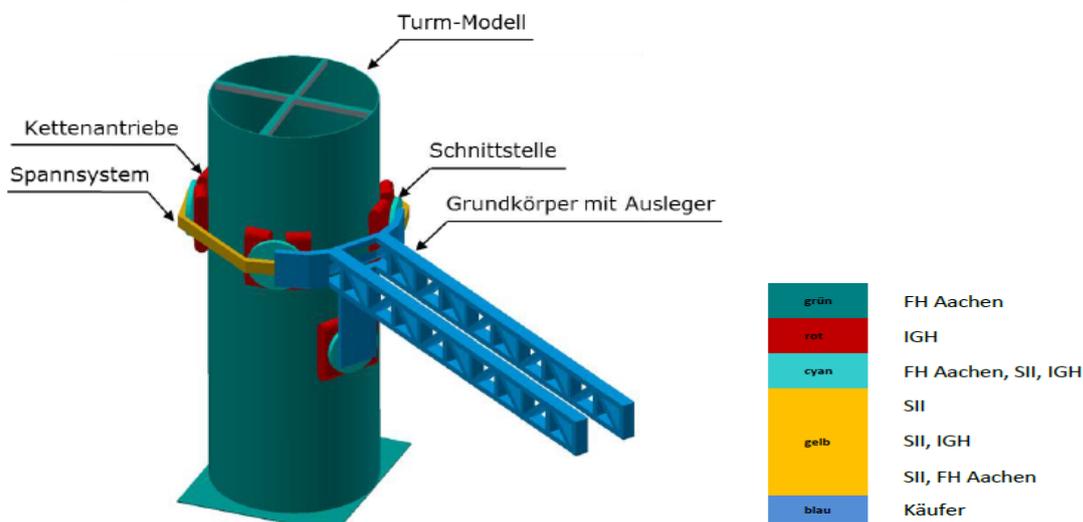


Abbildung 12: Übersicht Gesamtkonzept

Die Lastenhefte liegen den Partnern seit Ende Mai 2015 zur Ausführung vor. Es wurden weitere umfassende Berechnungen- und Analyseiterationen, mit den zur Verfügung stehenden FEM- und Modellierungs-Tools ANSYS" und "ADAMS, durchgeführt. Die Lastenberechnung und die Lasttragfähigkeit der Türme wurden auf Grundlage der neu definierten Rahmenbedingungen optimiert.

Auf die Erstellung von Pflichtenheften wurde im Rahmen der partnerschaftlichen Zusammenarbeit verzichtet. Die Firma Käufer erstellt die Risikoanalyse für das Gesamtsystem. Simultan hat die FH Aachen die Prüfstandsicherheit, auf Basis der internen Laborsicherheitsverordnung, bearbeitet und eine Sicherheitsunterweisung vorbereitet.

Es wurde eine umfassende statistische Recherche von Turm Daten, wie Oberflächenbeschaffenheit, Konizität, Material, Struktur und Leistungsklassen durchgeführt. Die Ergebnisse sind die Grundlage für die Oberfläche des Turmmodells

des Demonstrators, die Reibplatte des Reibversuchsstands und die Trommel für die Verschleißprüfung.

Verlässliche Daten über die mechanische Belastbarkeit eines Windkraftturms wurden von keinem Hersteller bereitgestellt. Diese Angaben sind jedoch von höchster Wichtigkeit für das SMART-Projekt. Die horizontale Belastung mit hohen statischen und dynamischen Punktlasten ist unter bestimmten Umständen sehr kritisch für dünnwandige Stahlrohre, wie sie für WEA-Türme verwendet werden. Im Rahmen einer Studie, die an der FH Aachen von den Fachbereichen „Maschinenbau und Mechatronik“ und „Bauwesen“ durchgeführt wurde, konnte ein digitales Turmmodell generiert und analysiert werden. Die ermittelten Ergebnisse und Kennzahlen haben sich mit den Erfahrungen aus der Praxis gedeckt. Das Modell wurde für jeden Entwicklungsschritt des SMART-Kletterroboters zu Grunde gelegt. Der SMART konnte über einen Iterationsprozess hinsichtlich einer möglichst geringen Turmbelastung optimiert werden. Die Turmbelastbarkeitsberechnungen und Simulationen wurden für jeden neuen beziehungsweise geänderten Belastungsfall wiederholt, da die Turmbelastung ein kritischer Faktor ist.

Der Fahrtrieb wird über Reifen und Rollen bis hin zu Kettenantrieben schrittweise optimiert. Hinsichtlich Reifen und Rollen wurden „Omni-Wheels“ als funktionell beste Lösung erkannt. Die Punktlasten auf den Turm waren jedoch zu hoch und würden die Einsatzmöglichkeiten des SMART 1 im Hinblick auf den Transport hoher Lasten reduzieren. Das finale System sieht vor, die Kettenantriebe mechanisch miteinander zu koppeln, wodurch die Turmbelastung noch weiter gesenkt werden kann. Dieses System weist jedoch einen hohen Grad an Komplexität auf und wird daher zum aktuellen Zeitpunkt nicht favorisiert.

Die Anbindungsbelastungen sind für die verschiedenen Systeme bekannt. Es wurde ein Berechnungswerkzeug erstellt, welche für jedes System die erforderliche Baugröße berechnet, basierend auf der Masse des Gesamtsystems, den angenommenen Haftbeiwert und der maximalen Flächenpressung am Turm (Abb. 13).

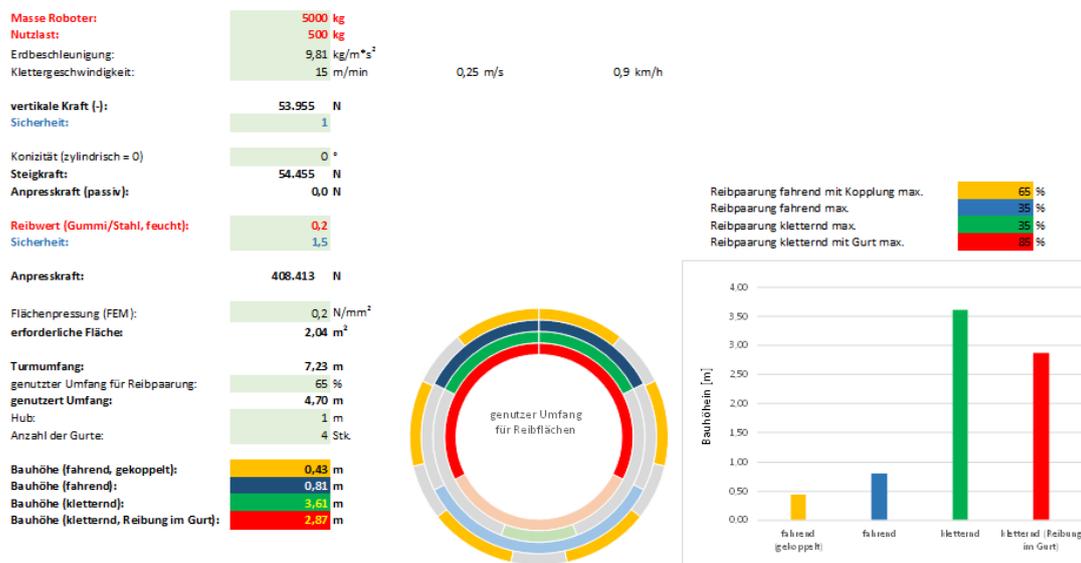


Abbildung 13: Baugrößenvergleich der Systemvarianten

Aus Abb. 13 geht hervor, dass die fahrenden Systeme (gelb/blau) deutlich kleinere Baugrößen besitzen, bei gleicher Belastung, gegenüber kletternden Systemen (grün/rot).

Ähnliche Werkzeuge wurden erzeugt um die anderen Parameter im Rahmen der Vorauslegung zu variieren und zu optimieren.

Abschließend wurden verschiedene Gummi-Puffer ausgewählt, darunter ein EPDM 40 Werkstoff, der nach aktuellem Kenntnisstand die besten Eigenschaften für diese Anwendung bietet. Die verschiedenen Varianten werden im Laufe der nächsten Wochen in Phase II auf dem Prüfstand in Paarung mit turmähnlichen Oberflächen getestet und bewertet.

Parallel zu den rechner- und softwaregestützten Belastungsuntersuchungen an der FH Aachen wurden zwei Tischmodelle während des Berichtszeitraums fertiggestellt - für den Gurt- sowie für das Kettenkonzept. Unabhängig vom Kletterkonzept hat das erste Modell eine sehr leichte Auslegerstruktur, die mit Seilen unterstützt wird. Die Masse am Ende des Auslegers schwingt im Betrieb sichtbar und wirkt damit bei jedem Hub auf die dünnwandige Turmschale.

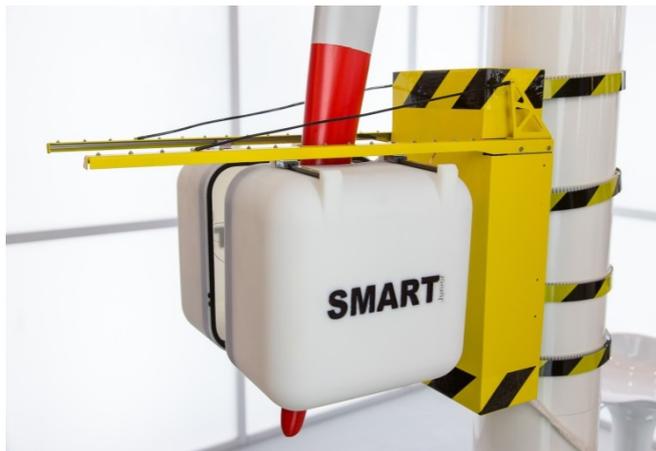
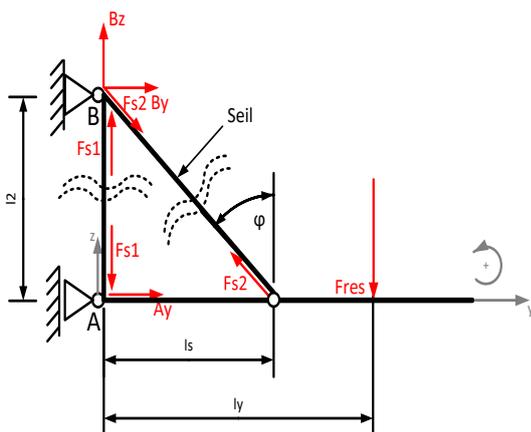


Abbildung 14: Tischmodell 1

Das fertiggestellte Gurt-Konzept-Tischmodell, als Teil einer Bachelorarbeit, wurde schon auf der Hannover-Messe im April 2015 präsentiert. Das Tischmodell zog eine große Aufmerksamkeit auf sich.

Das zweite Modell für das Kettenantriebskonzept wurde im Rahmen einer Masterarbeit entwickelt. Dieses Modell realisiert die Krafteinleitung auf den Turm über eine starre Schere. Es wurde im September 2015 auf der Husum-Messe präsentiert. Das Modell ermöglicht die kinematische Situation, sowie die vorhandenen Lasten näher zu untersuchen. Insbesondere wird diesmal darauf geachtet die schwingenden Massen am Auslegerende zu dämpfen bzw. zu eliminieren. Die Auslegerstruktur wurde deutlich versteift.

Im Teilsystem Kettenfahrwerke wurden folgende Freiheitsgrade festgelegt:

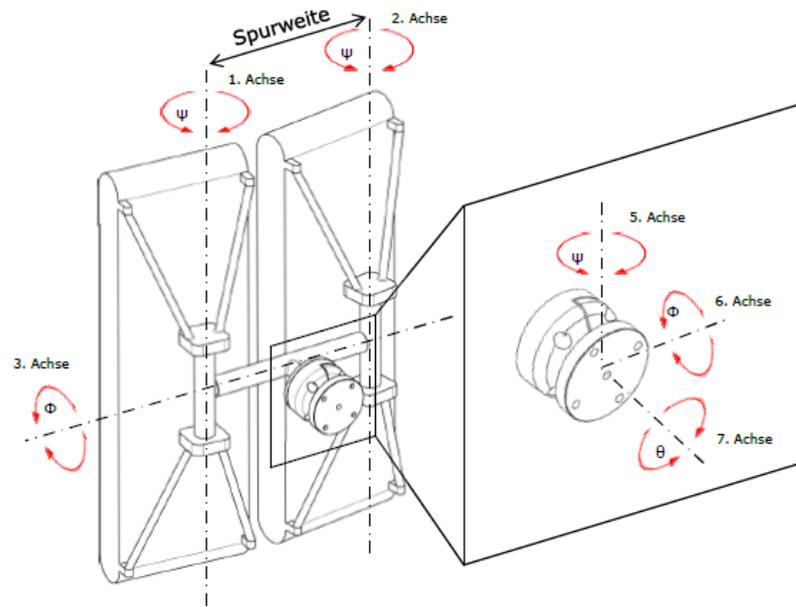


Abbildung 15: Freiheitsgrade im Kettenfahrwerk

Im Teilsystem Spannmechanismus sind folgende Freiheitsgrade vorhanden:

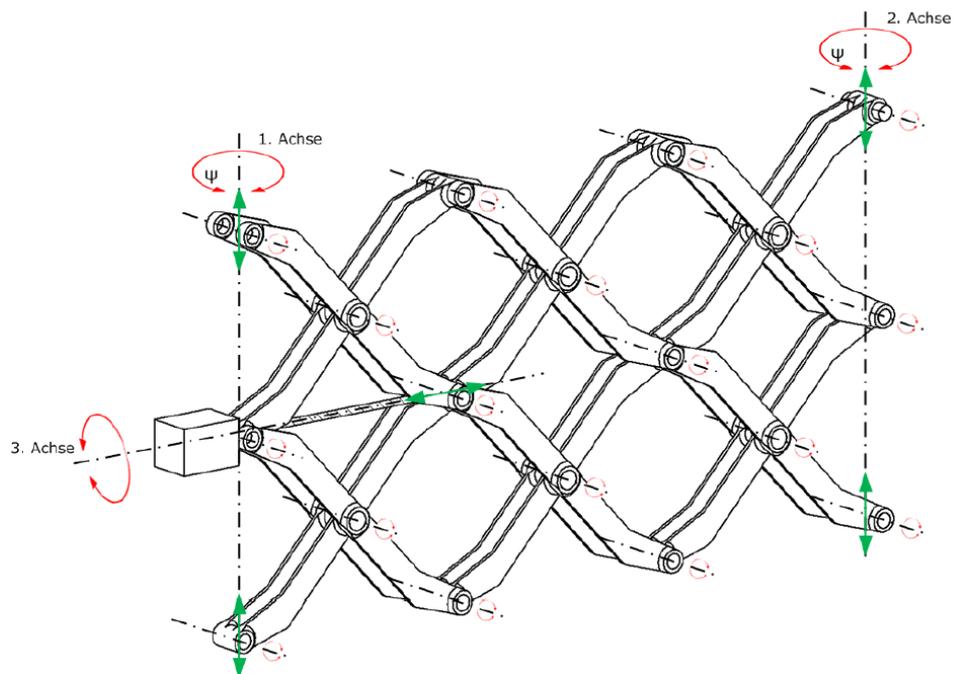


Abbildung 16: Freiheitsgrade im Spannsystem

Hinzu kommen zehn Kettenantriebe, welche Drehzahl geregelt, vor- und rückwärtsfahren können. Das Gesamtsystem soll hingegen nur zwei Freiheitsgrade haben: Translation und Rotation um die vertikale Turmachse. Der Umstand, dass

intern viele Schub- und Drehgelenke erforderlich sind, macht die Berechnung aller auftretenden Kräfte sehr komplex.

Der Versuchsstand wurde nach den Belastungsangaben des Lastenhefts und den 1:3 Volumeneckdaten ausgelegt, konstruiert und gefertigt.

Zusätzlich zum Demonstrator - Teststand wird ein Reibteststand an der FH Aachen aufgebaut, um die Reibwerte der Beschichtungsbeläge EPDM/NR/NBR u.a. im Einzelnen zu ermitteln. Auf diesem Teststand (Abb. 18) sollen die Vorversuche durchgeführt werden. Die Ergebnisse fließen in die laufende Kettenentwicklung ein.

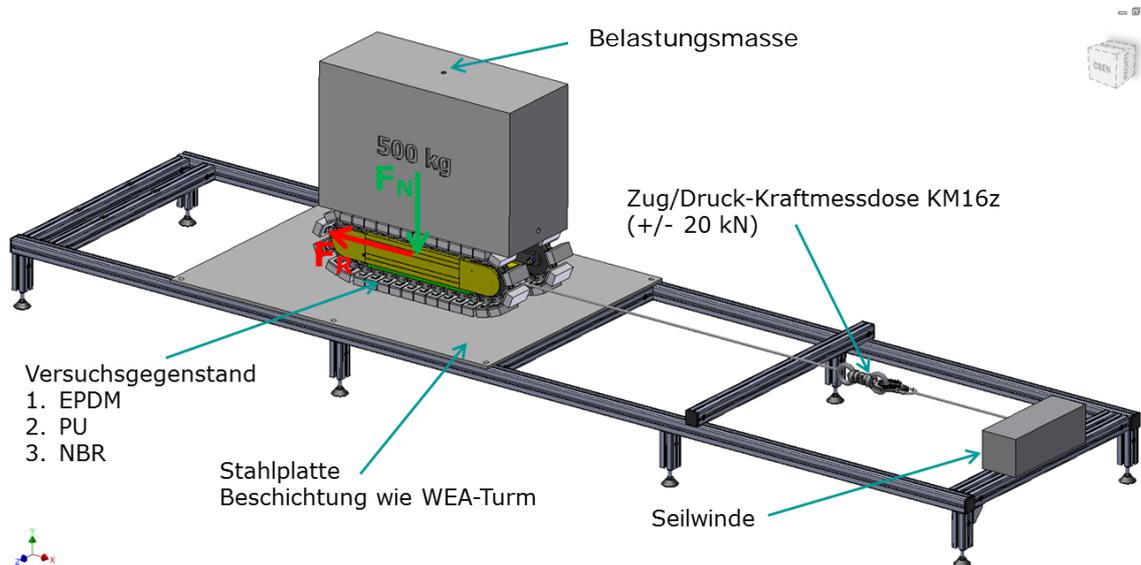


Abbildung 17: Reibversuchsstand

Der Großteil der WEA Türme ist konisch und verjüngt sich nach oben, so dass Durchmesser-Verhältnisse von bis zu 1:3 auftreten können. Bei der Gestaltung der Kettenfahrwerke und Kettenplatten wurde auf geringste Turmbelastung und beste Übertragung der Kräfte in die einzelnen Elastomer-Pratzen/Platten geachtet. Die o.g. Reibversuche ergaben für das verwendete Elastomer (EPDM) einen Reibwert von bis zu $\mu = 2,1$ (Neuzustand, trockene Turmoberfläche). Die biegesteifen Querverbindungen wurden als „Nürnberger Schere“ ausgebildet und können durch eine vertikale Gewindespindel sowohl in der Länge angepasst, als auch gespannt werden (Spannsystem). Die Spannkraft über ein Seilsystem zu generieren ist möglich und wird in einem weiteren Schritt untersucht (s. Zwischenbericht SII Engineering).

Ziel des Verschleißprüfstandes ist die Optimierung der Abriebfestigkeit bei optimalen Reibeigenschaften. Herstellerangaben in diesem Bereich sind nicht vorhanden.

Parallel wird in der Versuchshalle ein optisches Messsystem installiert, welches die Bahnkurve des SMART-Kletterroboters erfassen soll. Dazu werden auf beliebig vielen Elementen am System sog. „Marker“ angebracht und deren Bewegung verfolgt. Dieser Versuch ist wesentlich um das MKS Modell der Simulation an das reale Modell anzupassen.

Schlupf ist im System zu erwarten, da die Ketten auch bei gerader Fahrt parallel zur Turmachse eine feste Spurweite haben werden, siehe Abb. 19.

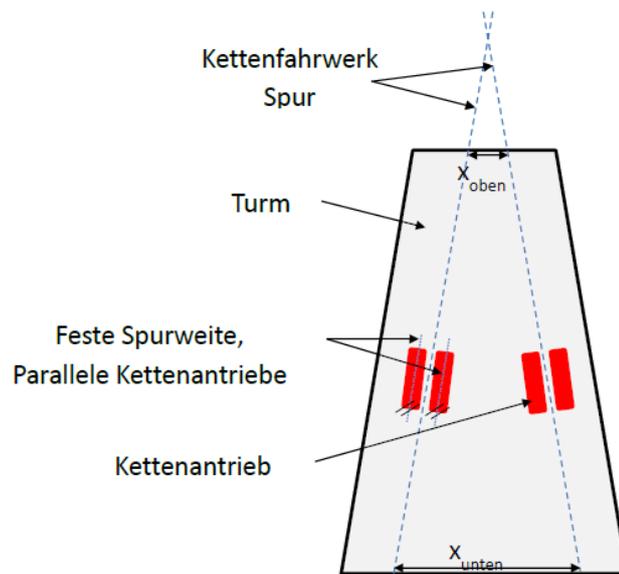


Abbildung 18: Spurverhalten des SMART

Die 6D-Kraftmessdose (siehe Abb. 20, dunkelrot) ermöglicht es, alle intrinsischen Lasten zu erfassen. Die Auswertung erfolgt in LabView.

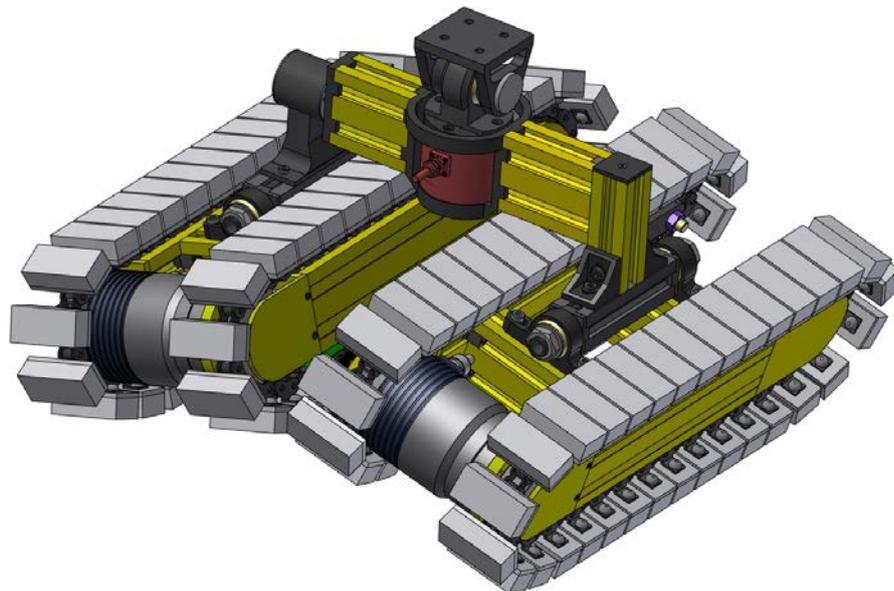


Abbildung 19: Konstruktionsentwurf Kettenfahrwerk

Insbesondere für den Spezialfall der Lenkbewegung um den Turm, wie in Abbildung 21 dargestellt wird, können die auftretenden Kräfte und Momente erfasst und analysiert werden.

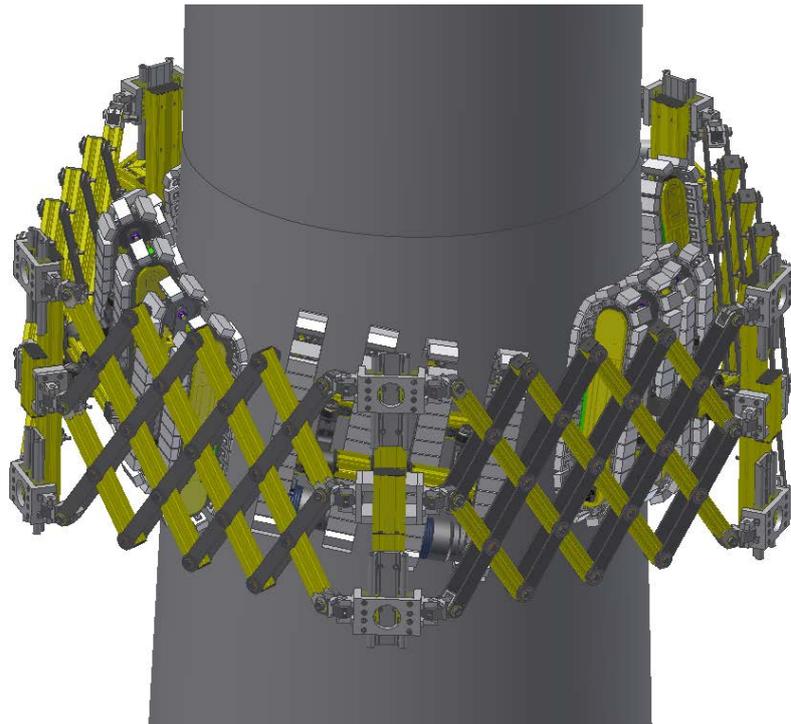


Abbildung 20: Darstellung der Lenkbewegung (10° Schrägstellung)

Ein Kettenfahrwerk besteht aus jeweils zwei Kettenantrieben, welche unterschiedlichen Lasten ausgesetzt sind, aber baugleich gestaltet werden.

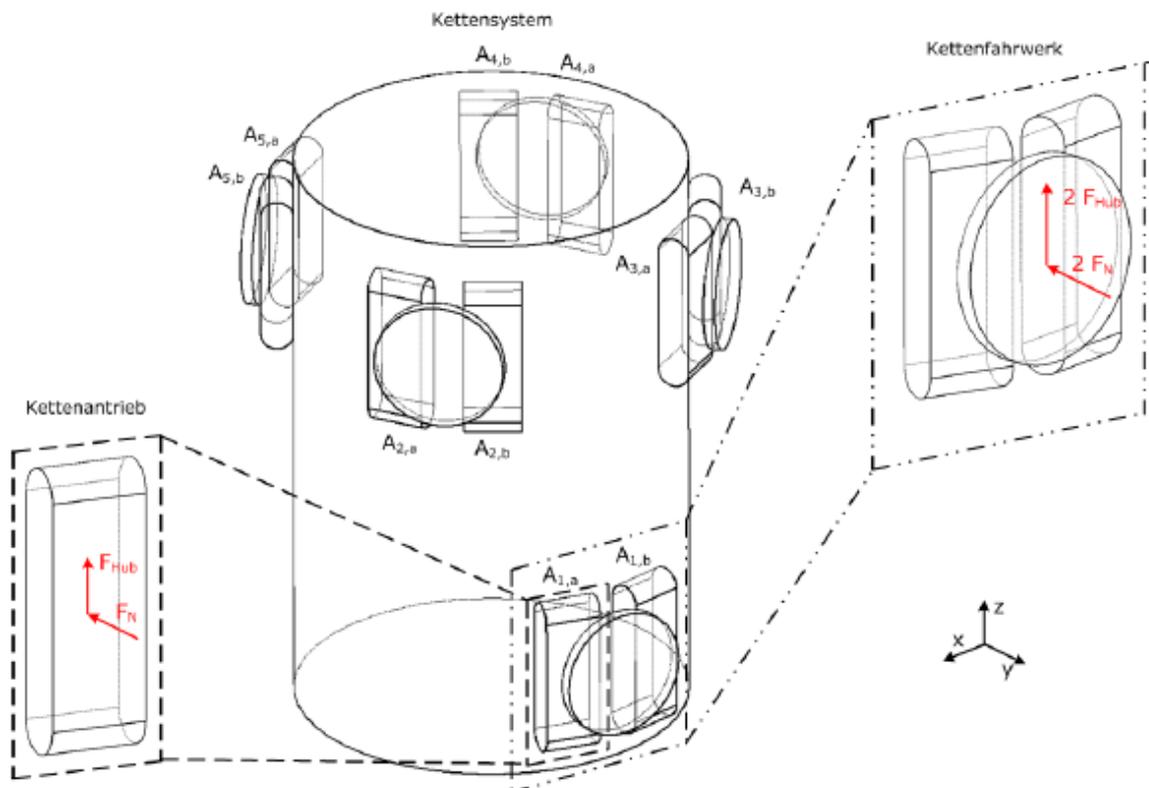


Abbildung 21: Übersicht Kettensystem

Die Verbindungsmechanik zum Turm wurde in verschiedenen Varianten konzipiert.

Variante 1: Seilspannsystem

- > Die Kettenfahrwerke A1, A2 und A3 erzeugen den Hub für das System
- > Erforderliche Spannkraft mindestens 12 kN
- > Systemgewicht voraussichtlich 750 kg
- > Exzentrische Lage des Schwerpunkts 1518 mm (Stützlast 9 kN)

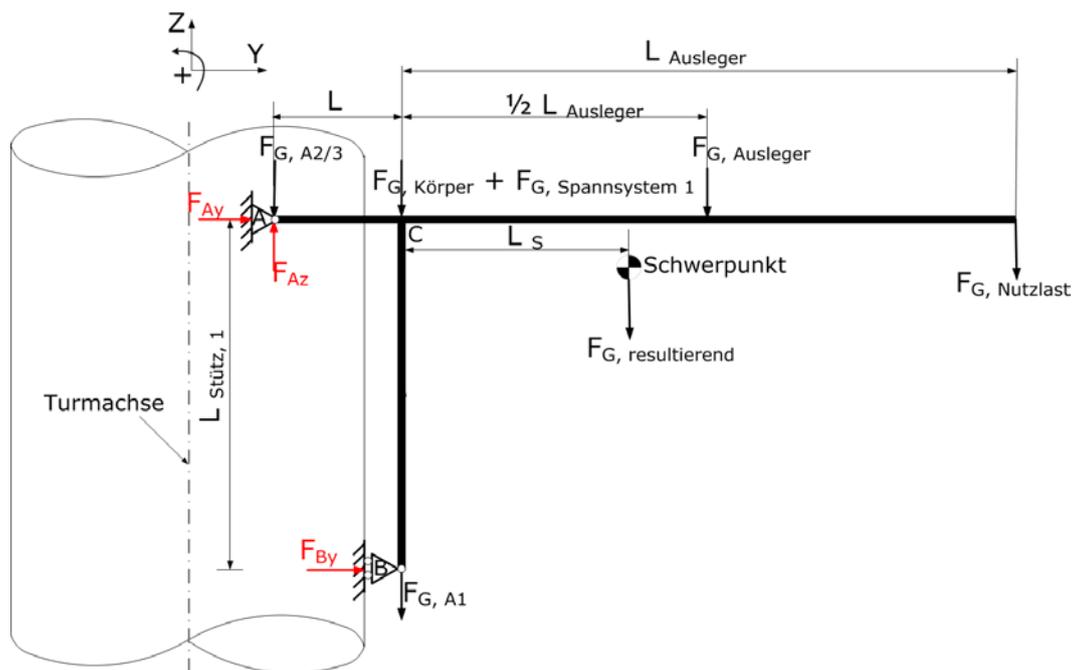


Abbildung 22: Lastfall für Seilspannsystem

Variante 2: Mechanische Kopplung

- > Alle Kettenfahrwerke A1, A2, A3, A4 und A5 erzeugen Hub
- > Erforderliche Spannkraft mindestens 8 kN
- > Systemgewicht voraussichtlich 770 kg
- > Exzentrische Lage des Schwerpunkts 1003 mm (Stützlast 6,6 kN)

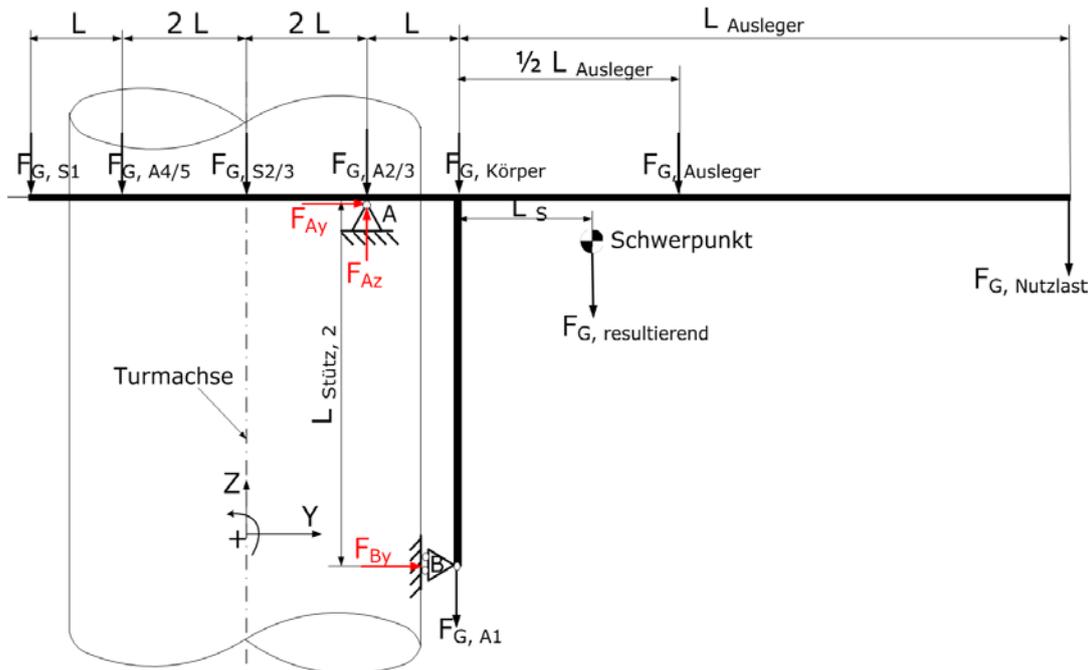


Abbildung 23: Lastfall für mechanische Kopplung

Die maximale Normalkraft pro Kettenfahrwerk beträgt 16,8 kN. Die daraus resultierende Hubkraft pro Kettenantrieb beträgt 1026 N bei einem Reibwert von 0,2.

Um die Belastung auf den Turm gleichmäßig einleiten zu können, wurden im Vorfeld mehrere unterschiedliche Konstruktionsvarianten in Betracht gezogen, die im Einzelnen in rechnerunterstützter Simulation untersucht wurden. Daraus resultierte das Konzept der „Pratzen- bzw. Plattenkette“, die mit einzelnen Reibsegmenten ausgestattet ist, welche die Fähigkeit einer gleichmäßigen Kraftübertragung auf den Turm aufweisen.

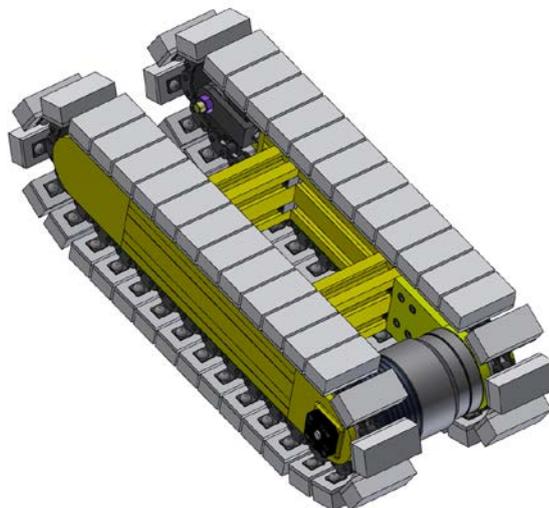


Abbildung 24: Konstruktionsentwurf Kettenantrieb

Im Rahmen der Projektpräsentation (s. Abb. 26) wurde Herrn Simon Hackhofer (PTJ) am 01.12.2015 der SMART dreidimensional auf einer Leinwand vorgeführt. Die stereoskopische Projektion ermöglicht es die Funktionalität des Demonstrators zu überprüfen. Das digitale Mock-Up kann verschiedene Konzepte, wie zum Beispiel das Seilspannsystem oder den Scheren-Spannmechanismus, einzeln, oder in Kombination simulieren.

Ingenieure können am digitalen Mock-Up Kollisionen von Teilsystemen erkennen.



Abbildung 25: Präsentation des digitalen Mock-Ups

Eine Beschreibung kann den vorangegangenen Projektberichten entnommen werden. Die Abbildung zeigt von links nach rechts: die Arbeitskabine, zwei Ausleger, den Grundkörper, Kabelführungen, Kettenfahrwerke und den Spannmechanismus in Form der Nürnberger-Schere. Die Arbeitskabine wird in Phase II des SMART Projekts entwickelt und in Phase I durch eine 100-200 kg schwere Gewichtsmasse simuliert.

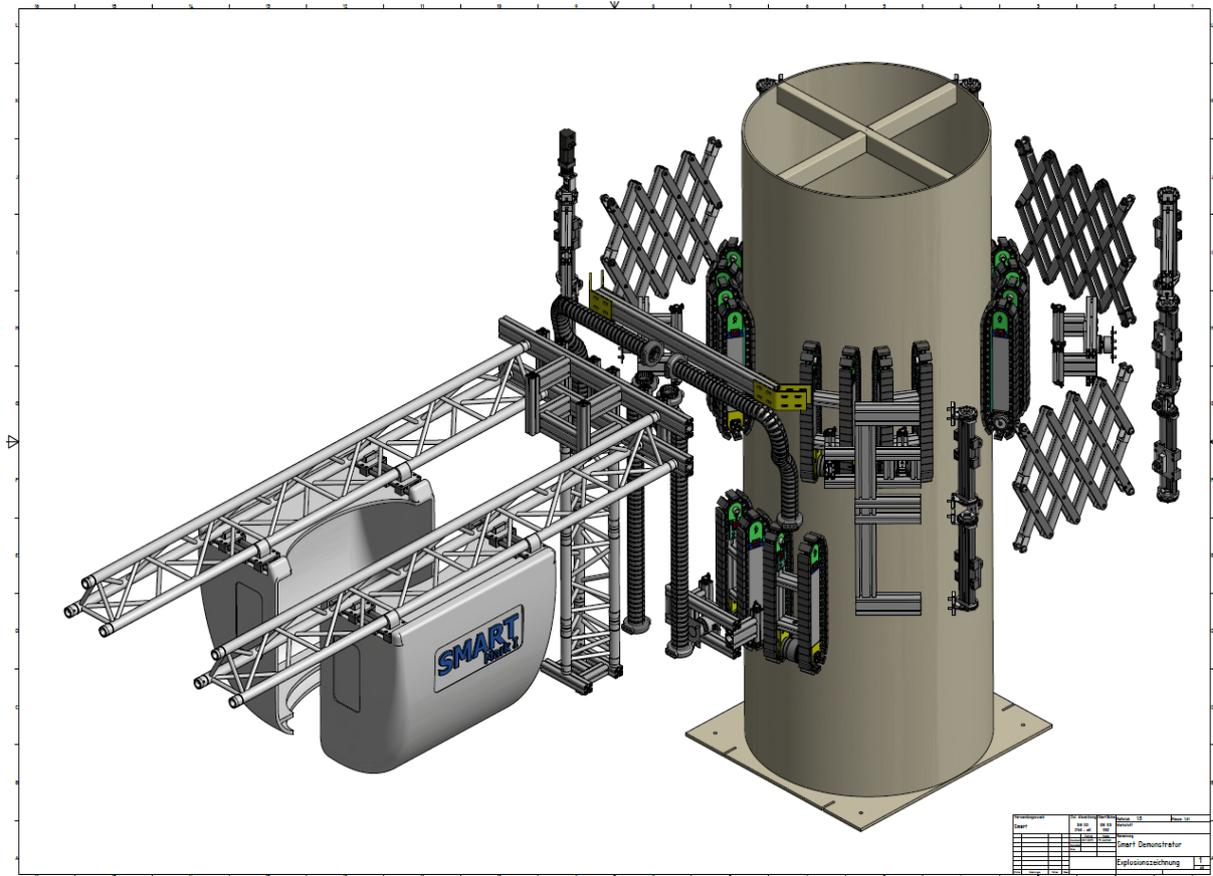


Abbildung 26: Explosionsdarstellung SMART Demonstrator

Das kinematische Modell des Demonstrators erfasst alle Freiheitsgrade und die Bahnkurven der Gelenke und Körper. Es kann anschließend in ADAMS mit Kräften und Momenten belastet werden, die realen Antriebskräften entsprechen. Im Ergebnis werden u.a. die Kontaktkräfte zum Turm (s. Abb. 28) und die Gelenkkkräfte im Spannsystem statisch berechnet.

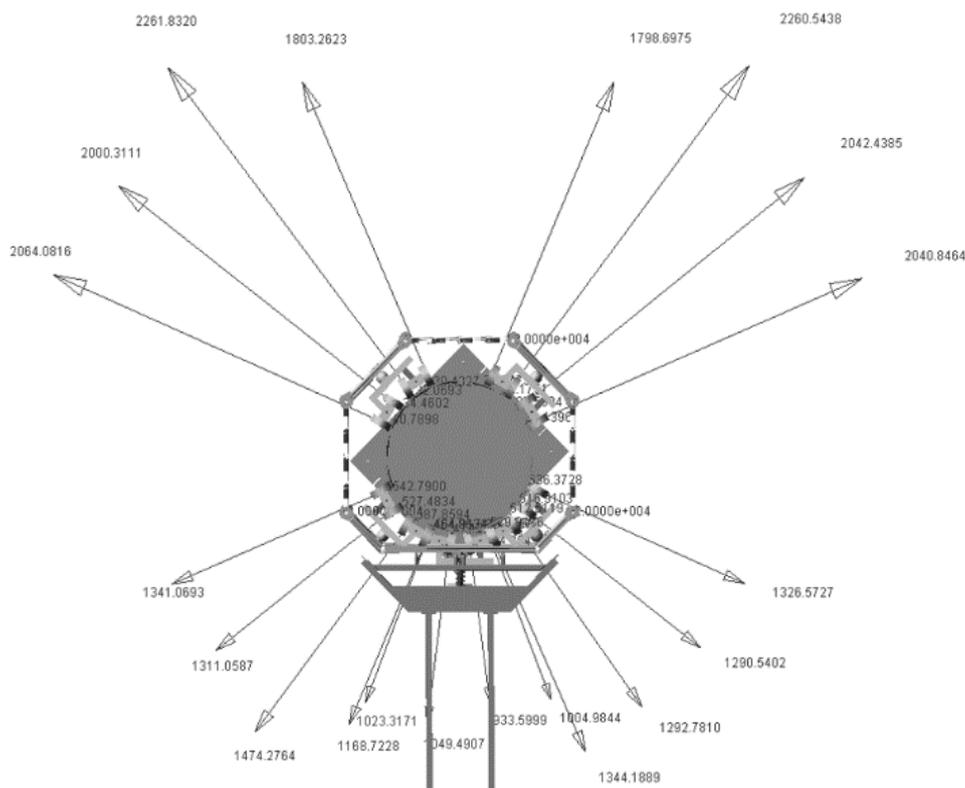


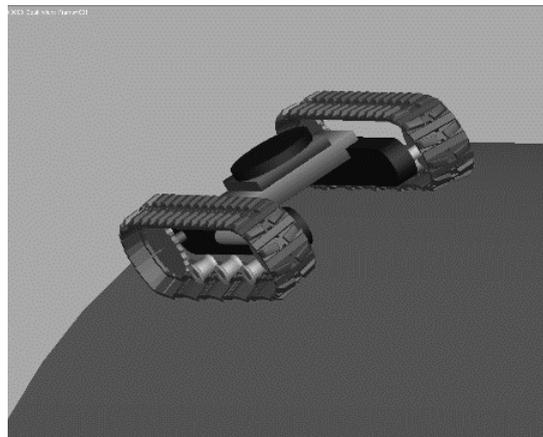
Abbildung 27: Kinematisches Modell SMART (Normalkräfte zwischen Turm und Kettenfahrwerken)

Das dynamische Modell des SMART wird gemeinsam mit der Entwicklungsabteilung von ADAMS ATV aufgebaut. ADAMS ATV (Adams Tracked Vehicle) wurde speziell für das SMART-Projekt erweitert, um die Gleitschienen innerhalb der Kettenfahrwerke richtig modellieren und simulieren zu können (s. Abb. 30). Die Simulationsergebnisse dienen zur Planung der Krafteinleitung und zur Verifikation der Kraftverteilung bei Lenkbewegungen der Kettenfahrwerke. Versuche am Demonstrator zeigen, dass die Lenkbewegung möglich ist und dabei keine kritischen Belastungen auftreten (s. Abb. 29).



**Abbildung 28: Lenkbewegung des
SMART Demonstrators**

Die Messergebnisse sollen möglichst in der Simulation nachgebildet werden können. Die verifizierte Simulation ist die Basis für die Skalierung in den Prototypenmaßstab 1:1 in Projekt Phase II.



**Abbildung 29: SMART-Kettenfahrwerk
in ADAMS ATV (Gummi-Kette)**

Die Analyse in ATV zeigt, dass riemenbasierte Kettenfahrwerke die gewölbte Turmoberfläche ungleichmäßig belasten (s. Abb. 31). In ADAMS ATV ist deutlich zu erkennen, dass Gummi-Ketten eine hohe punktuelle Belastung auf den Turm ausüben. Die wenigen Führungsrollen der Gummi-Kette können die Flächenlast nicht gleichmäßig auf die Kontaktfläche verteilen.

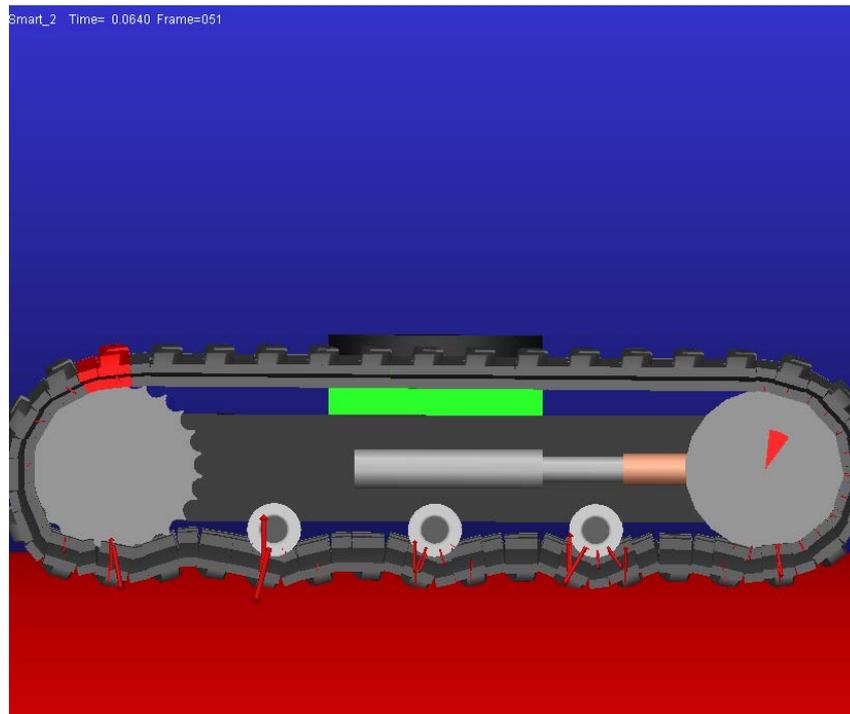


Abbildung 30: Analyse der Anpresskräfte (Gummi-Kette)

Vergleichende Untersuchungen haben gezeigt, dass mit Plattenketten eine nahezu gleichförmige Verteilung der Flächenpressung am Turm erreicht werden kann. Die Plattenkette verfügt über Rollen, die auf einer Gleitschiene abrollen. Die Gleitschiene überträgt die Kraft gleichmäßig über die gesamte Schienenlänge. Die Analyse in ADAMS soll u.a. zeigen, welche Einflüsse die leichte Verformung der Turmoberfläche auf die Kraftverteilung hat. Dadurch kann die erforderliche Steifigkeit der Kettenfahrwerke ermittelt werden.

Die konstruierte Kette ist eine Rollen-Laschenkette auf der Elastomerprofile montiert werden. Die Elastomerprofile können hinsichtlich Reib- und Federeigenschaften individuell gestaltet werden. Die integrierten Gleitlager auf den Bolzen der Kette rollen mit einem experimentell nachgewiesenen Rollwiderstand $c_R = 0,08$ auf einer Polymer Gleitschiene ab, die eine gleichmäßige Lastverteilung der Normalkräfte auf die Turmoberfläche sicherstellt.

Der Demonstrator verfügt derzeit über sieben Antriebe. Dennoch war der Klettertest erfolgreich. Damit Lenkbewegung in allen Details untersucht werden können, müssen weitere Antriebe integriert werden. Dann ist der SMART Demonstrator Planung voll funktionsfähig. (vgl. Stellungnahme zur Präsentation vom 02.12.2015)

Die Manta G609B der Firma Allied Vision ist eine GigE-Vision basierte Kamera und besitzt eine Auflösung von 2752x2206 Pixeln (s. Tabelle 1 und Abb. 34). Durch ihre hohe Empfindlichkeit bei geringem Rauschen und der relativ hohen Auflösung ist sie zur Detektion von Objekten unter schlechten Lichtbedingungen und in relativ großer Entfernung gut geeignet.



Abbildung 31: G906 Manta Kamera mit Objektiv

Folgend sind wichtige technische Spezifikationen aufgeführt:

Interface	IEEE 802.3 1000BASE-T
Auflösung	2752 x 2206
Sensor	Sony ICX694
Sensor Typ	CCD Progressiv (Mono)
Max. Bildrate bei max. Auflösung	15 FPS (Frames per Second)
Belichtungszeit	41 μ s – 38 s
Mono Modi	Mono8, Mono12, Mono12Packed, Mono14
A/D	14 bit
Versorgung	8V – 30V
Leistung (bei 12V)	3.9W

Tabelle 1: Technische Spezifikationen Manta Kamera

Die Kamera kann in den Modi: *Streaming*, *Polled* und *Triggerd* betrieben werden. Im Modus *Streaming* sind die Kameraaufnahmen nicht zu bestimmten Ereignissen synchronisiert. Im Modus *Polled* wird die Aufnahme softwareseitig – im Modus *Triggered* mit einem TTL-kompatiblen Signal ausgelöst. Verwendet wird die Kamera in Kombination mit dem Objektiv FL-BC2514D-VG, welches eine Brennweite von 25 mm besitzt. Als Stativ für das Kamerasystem wird das Modell 161 MK 2B, in Kombination mit dem Getriebeneiger 410, der Firma Manfrotto verwendet. Diese Kombination zeichnet sich durch eine präzise Einstellmöglichkeit der vibrationsdämpfenden Halterung aus. Hinzu kommt die Höhenverstellbarkeit des Stativs, die in der Anwendung beim SMART Tracking System zwingend erforderlich ist.

Das ROS Tool `ar_track_alvar` ist eine Wrapper Anwendung für Alvar - eine Open Source Bibliothek zur Erkennung von Augmented Reality (AR) Marken (s. Abb. 35). Alvar unterstützt adaptives Thresholding, was einen Einsatz unter variierendem Umgebungslicht ermöglicht. Durch die verwendete Methodik zur Identifikation der einzelnen Marken, nimmt die Auswertezeit des Algorithmus auch bei zunehmender Markenanzahl innerhalb eines Bildes kaum zu.

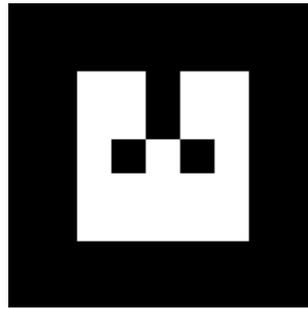


Abbildung 32: AR Marke

Das ROS Tool ar_track_alvar bietet vier Hauptfunktionalitäten:

- > Generierung von AR Marken verschiedener Größe, Auflösung und Codierung,
- > Identifizierung und Bestimmung der 6D Pose von AR Marken,
- > Identifizierung und Bestimmung der 6D Pose von ganzen AR Marken Sets, welche fest definierte Transformationen untereinander aufweisen und
- > Automatisierte Bestimmung der Transformationen innerhalb eines AR Marken Sets.

Die Kernaufgabe des Tools, die Rekonstruktion der 6D Pose einer AR Marke, basiert auf der Bestimmung der Eckpunkte der Marker. Anhand der vier Eckpunkte und unter Einbeziehung hinterlegter Kameraparameter wird unter Verwendung von Methoden der Bildverarbeitung die 6D Pose bestimmt. Die Codierung der Marke dient dabei lediglich zur Identifikation.

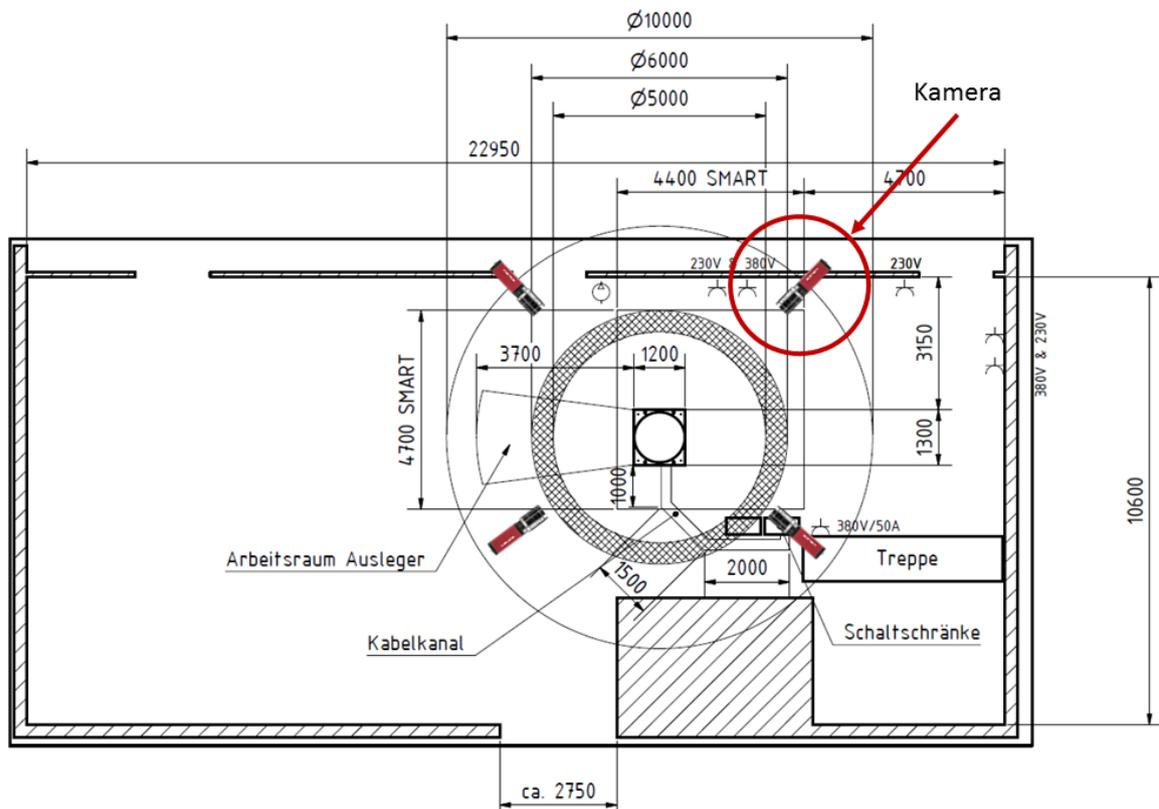


Abbildung 33: Hallenplanung und räumliche Anordnung des Tracking Systems

Das für den SMART entwickelte Tracking System basiert auf dem ROS Tool `ar_track_alvar`. Entsprechende AR Marken sind an vorher festgelegten Stellen am SMART angebracht und werden mit Hilfe von vier Manta G609B Kameras mit entsprechenden Objektiven erfasst. Dabei sind die Kameras so im Raum verteilt, dass die Sichtfelder der einzelnen Kameras zusammengefasst den kompletten SMART abbilden (s. Abb. 36).

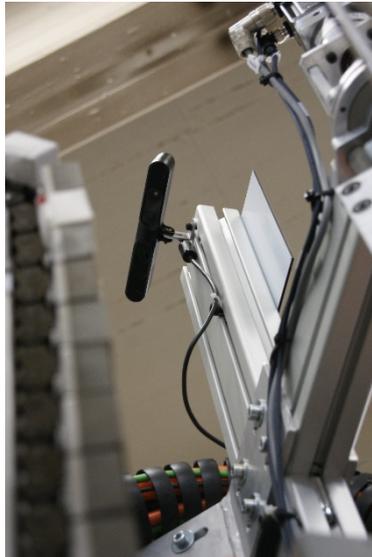
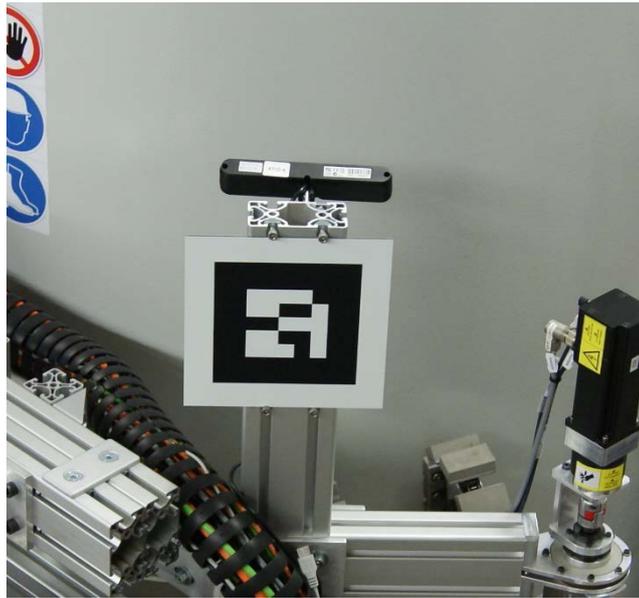
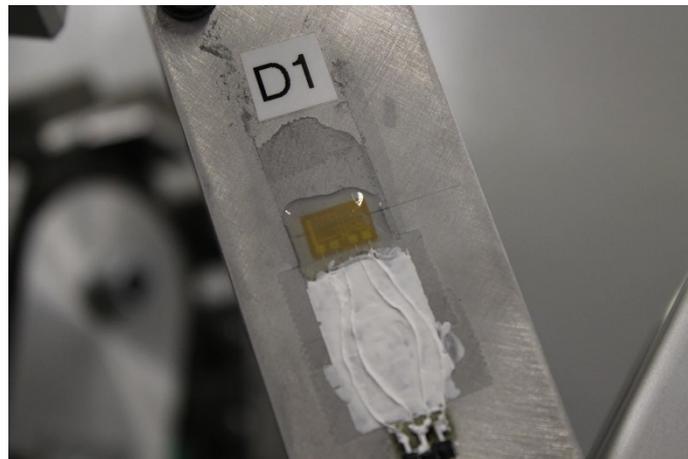


Abbildung 34: 3D-Stereo-Infrarot Vision System

Ergänzt wird das globale Trackingsystem durch die lokale Referenzierung des SMART durch Tiefenbildkameras (RGB-Depth). Vier RGBD-Kameras generieren eine Punktwolke des SMART, die mit Hilfe der AR Marken zum globalen Koordinatensystem referenziert werden können (s. Abb. 37). Dadurch können beliebige Points of Interest gemessen und verfolgt werden. Es wird das Farbbild der RGB-D Kameras für die Überwachung der Fahrwerke auf der Rückseite des Turms verwendet. Das Farbbild unterstützt den Prüfstandbediener bei der sicheren Durchführung im Testbetrieb.



**Abbildung 35: Messkette RGBD-Kamera zu AR
Marke**



**Abbildung 36: Dehnungsmesstreifen auf dem
Spannsystem**



Abbildung 38: SMART Demonstrator 1:3 (aktueller Stand)

Das Moment, welches der Ausleger auf den Turm ausübt, kann über die Kraftmessdose am unteren Kettenfahrwerke gemessen werden. Gleichzeitig ist ein Bewegungstracking des Auslegers und des Grundkörpers über die QR-Targets, sog. „Marker“, möglich. Im Weiteren ist geplant die Schwingungen der Ausleger beim Anfahren und Bremsen optisch zu überwachen, um die Beschleunigungsrampen des Reglers zu optimieren. Außerdem wird der Ausleger mit Gewichten bis zu 200 kg belastet, sobald alle Antriebe (10-16 Stück) in den SMART Demonstrator eingebaut wurden.

Der Grundkörper wurde aus ITEM-Profilen zusammengesetzt. Der Grundkörper wiegt derzeit ca. 35 kg. Bei gleichem Gewicht könnte mit maßgeschneiderten Blechkörpern die Tragfähigkeit und Steifigkeit verdreifacht werden. Diese Optimierung soll ggf. noch im Rahmen der Phase II im SMART Projekt durchgeführt und getestet werden, damit eine solide Basis für die Skalierung in den 1:1 Maßstab geschaffen wird.

Die FH Aachen hat einen großen Teil der Antriebsaufgaben übernommen und erfolgreich sowie fristgerecht zum Abschluss geführt. Die übernommenen Aufgaben beinhalten den Abschluss der Entwicklungsarbeiten des Klettersystems.

Die FH Aachen hat die Aufgabe des Systemengineerings für die Kettenfahrwerke übernommen und das folgende Design (Abb. 42) entwickelt. Ein Kettenfahrwerk besteht aus zwei Kettenantrieben. Jeder Kettenantrieb verfügt über zwei Plattenketten die mit einem Harmonic Drive Motor angetrieben werden. Der Grundkörper besteht aus ITEM Profilen. Die Kraftübertragung auf die Turmoberfläche wurde mit sog. Gleitschienen und einer Rollenlaschenkette realisiert. Ein Kettenantrieb wiegt ca. 25 kg, inkl. Motor und entwickelt eine max. Hubkraft von bis zu 1250 N. Die tatsächliche Hubkraft ist abhängig von dem Anpressdruck auf die Turmoberfläche. Der SMART Demonstrator ist daher deutlich überdimensioniert. Die Ziele von Phase I und für das SMART Klettersystem werden mit diesem Design erreicht. Eine

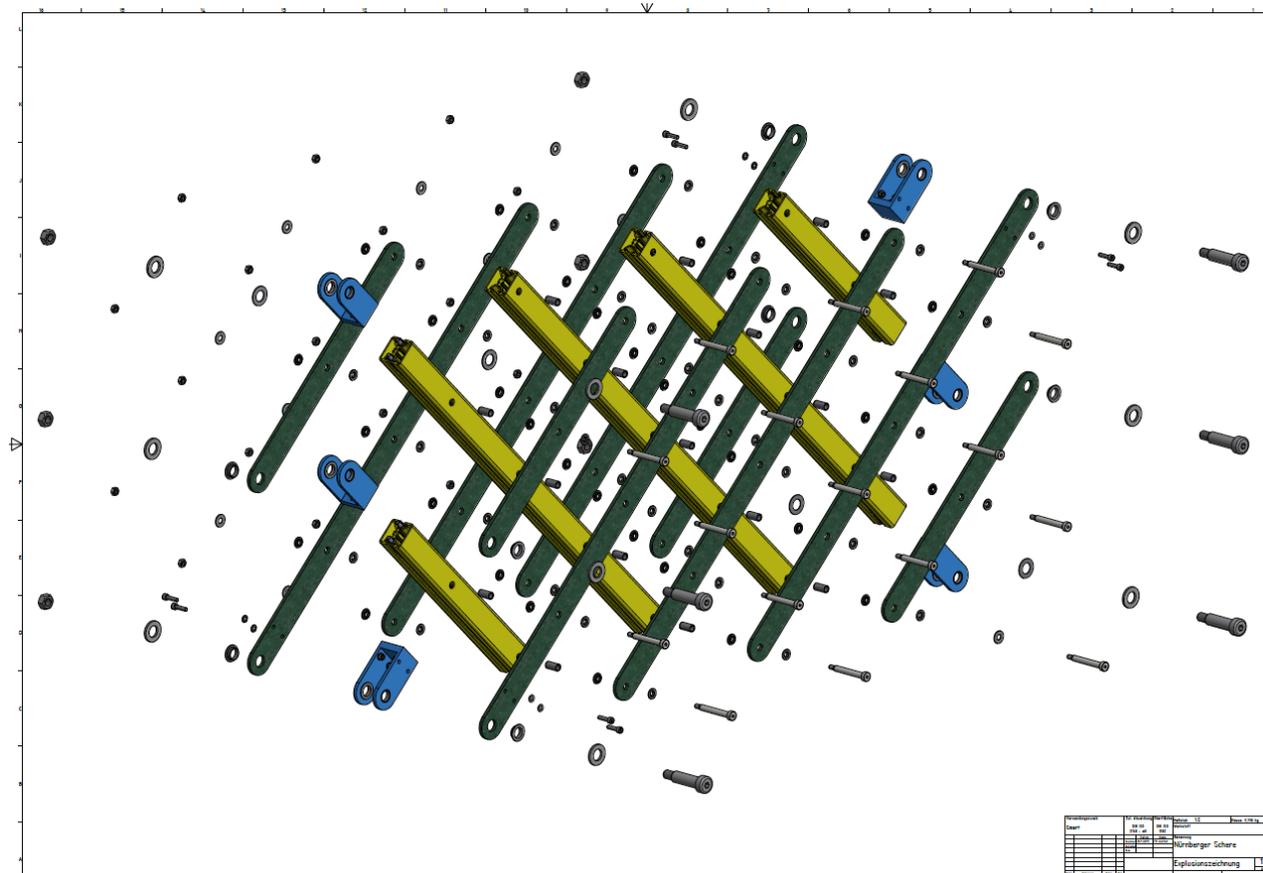


Abbildung 40: Explosionsdarstellung Spannmechanik

Im Rahmen der FMEA sind die erforderlichen Warnhinweise (s. Abb. 44) am SMART angebracht worden, um einen sicheren Laborbetrieb mit dem Prototyp zu gewährleisten.



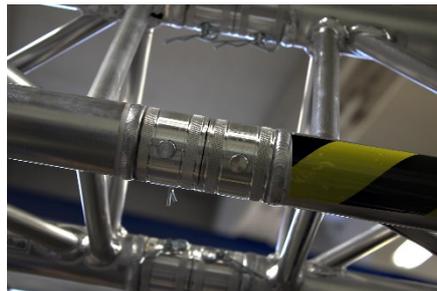
Abbildung 41: Kettenfahrwerk mit Warnhinweis

Der Ausleger besteht aus mehreren Segmenten. Die Länge kann flexibel zwischen 1,5 m und 5 m gesteckt werden. Dadurch ist es möglich, die Belastungsgrenzen des Systems zu validieren. Die Last kann ebenso flexibel an verschiedenen Punkten, einseitig oder beidseitig, mit einem Ringflansch montiert werden.



Abbildung 42: Dreipunkt-Aluminiumprofilfachwerk-Ausleger

Die konstruktive Gestaltung des Lastauslegers, aus Dreipunkt-Aluminiumprofilen (s. Abb. 45), ermöglicht sehr hohe Traglasten. Die Verbindungen sind spielfrei mit Keilen ausgeführt (s. Abb. 46). Die Ausleger haben jeweils ein Eigengewicht von 15 kg.



**Abbildung 43: Schnittstelle
Ausleger**

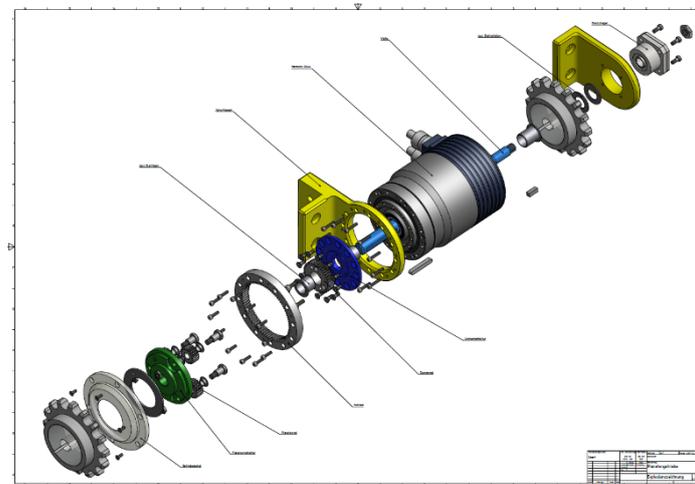
Die Entwicklung der Antriebstechnik wurde größtenteils durch die FH Aachen übernommen. IgH hat die erforderliche Hardware beschafft.

Entwicklung einer kompakten Planetengetriebe

- > Entwicklung und Prototypenfertigung an der FH Aachen
- > Serien-Fertigung durch Firma Gebr. Käufer GmbH

Das kompakte Planetengetriebe der FH Aachen wird in Abbildung 47 dargestellt. Mit Hilfe des Planetengetriebes wird das Drehmoment der verwendeten Harmonic Drive Motoren von 52 Nm auf ca. 140 Nm erhöht. Diese Entwicklung war notwendig, da die Lieferzeit geeigneter Motoren die Laufzeit von Phase I überschritten hätte. Die im Verlauf von Phase II geplanten Motoren verfügen über ein höheres Drehmoment von ca. 120 Nm und können ohne Planetengetriebe verwendet werden. Zusätzlich verfügen sie über eine integrierte Bremse, die dem SMART Demonstrator derzeit fehlt. Ein sicherer Betrieb ist daher erst möglich, wenn die neuen Harmonic Drive Motoren eintreffen. Durch den Einsatz dieser Zwischenlösung konnte das Projekt ohne

Unterbrechung durchgeführt werden und bereits im November mit der Testphase begonnen werden.



**Abbildung 44: Explosionsdarstellung
Planetengetriebe**

Projektierung und Aufbau von Schaltschränken für Servoverstärker

FH Aachen hat die Schaltschränke für den SMART Demonstrator projektiert und ausgelegt. Abbildung 48 zeigt den Schaltschrank S2 der die Servoverstärker für die Harmonic Drive Motoren beinhaltet.



Abbildung 45: Schaltschrank S2 (Servoverstärker)

Test des Demonstrators am Turmsegment

- Klettertest sehr erfolgreich abgeschlossen (siehe ggf. Video)
- Test und Validierung der Lenkbewegungen positiv und in Arbeit

Abbildung 49 zeigt den Lenkausschlag eines Kettenantriebs von 10° . Die weißen Klebestreifen auf einigen Gummi-Platten markieren die Messpunkte der Druckmessfolie.



Abbildung 46:
Lenkbewegung 10°

Steuerungs- und Regelungstechnik für den SMART Demonstrator

Die Entwicklung des Steuerungssystems wird fortgeführt. Das Projektziel wurde mit der manuellen Steuerung und der Präsentation des Klettervorgangs erreicht. Das SMART-Team beginnt bereits mit der Entwicklung einer teilweise automatischen Steuerung basierend auf dem kinematischen Modell des Roboters.

Die Programmierung des SMART Demonstrators wird durch die FH Aachen durchgeführt. Alle Layer der Steuerung werden berücksichtigt. Die Treiber der Motoren werden in TwinCat III mit einer Beckhoff PLC abgebildet. Die Sensoren werden teilweise ebenfalls in der PLC ausgewertet. Ein weiterer Teil wird in ROS und in LabView erfasst. Die übergeordnete Steuerung wird in C++ umgesetzt.

Der SMART wird derzeit von Hand gesteuert. Alle Motoren innerhalb der Kettenfahrwerke können über die Bedieneroberfläche von TwinCat III, sowohl synchron, als auch einzeln angesteuert werden. Die Entwicklung der Regler für das Kettenfahrwerk und den Spanmechanismus wird durchgeführt. Die Regelung ermöglicht den teilautomatischen Betrieb.

Abbildung 50 zeigt den Schaltschrank S1 mit der Primärsteuerung und der Hauptstromversorgung.

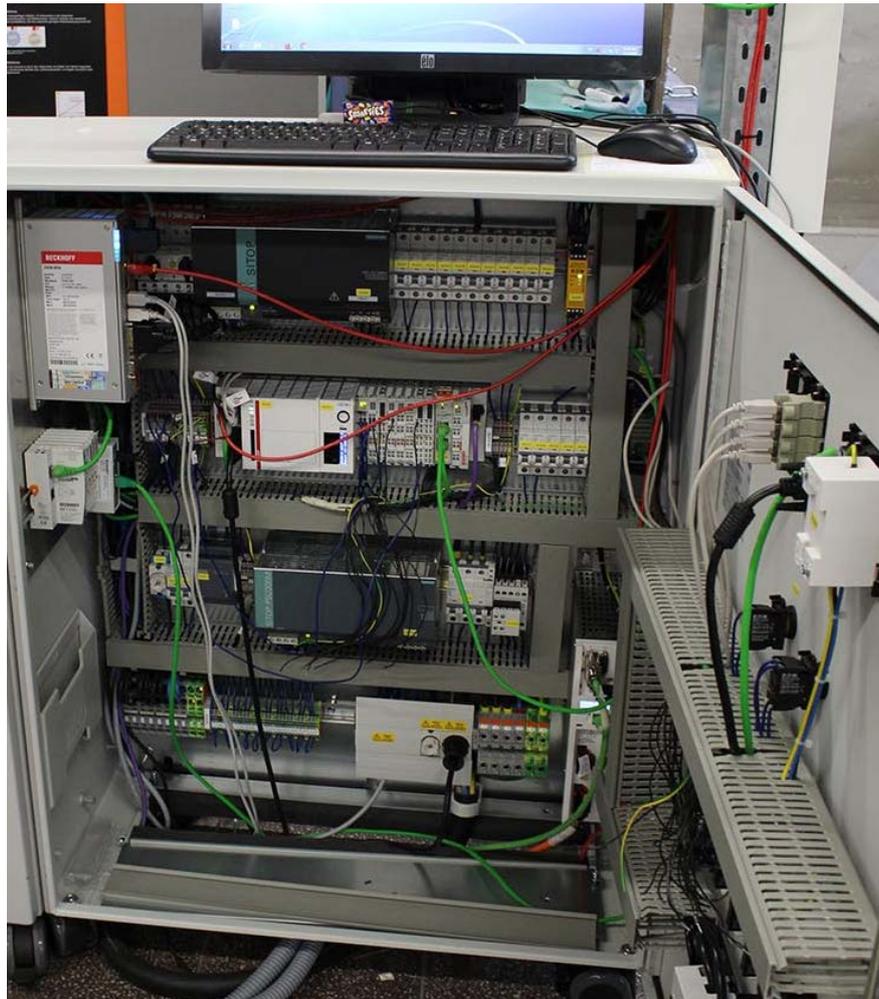


Abbildung 47: Schaltschrank S1 (Steuerung)

In Abbildung 51 wird einer der mobilen Schaltschränke auf dem SMART Demonstrator dargestellt, indem die lokalen Aktuatoren vom Spannmehanismus und die Sensoren zusammengeführt werden. Alle Schaltschränke kommunizieren via EtherCat Bus.

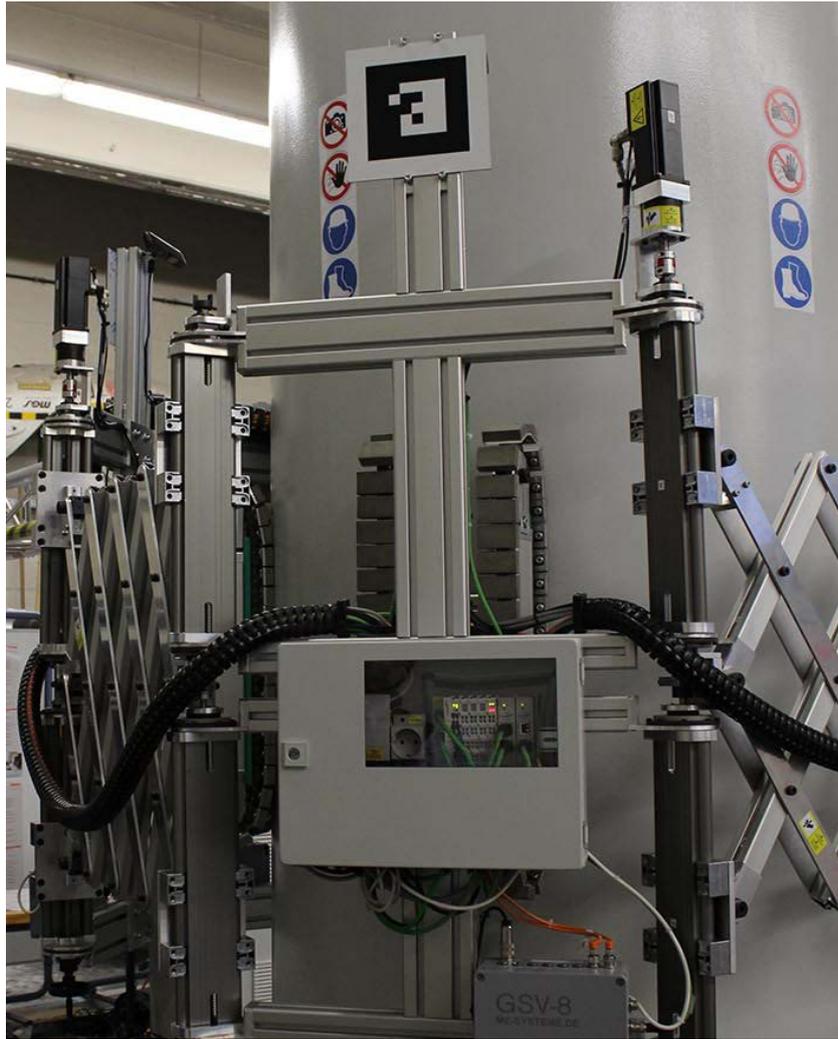


Abbildung 48: Schaltschrank S3 (On-Board)

Der SMART Demonstrator verfügt über eine stationäre Energieversorgung. Eine mobile Energieversorgung ist möglich und wurde in Phase II beantragt.



Abbildung 49: Haupt-Energiezuleitung SMART

Die FH Aachen hat die gesamte Verkabelung und die Integration der Sensoren und der Messtechnik durchgeführt.

IV. Anlage 2: Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN t.b.d.	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Forschungsvorhaben SMART (Phase I), Schlussbericht 2016-10		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Bagheri, Mohsen Schleupen, Josef Prüfer: Dahmann, Peter (FH Aachen), Projektleiter Werner Käufer (gebr. Käufer GmbH) Torsten Finke (Igh) Peter Miehke (SII Deutschland GmbH)		5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.04.2016
		6. Veröffentlichungsdatum t.b.d.
		7. Form der Publikation t.b.d.
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fachhochschule Aachen, Fachbereich Luft-und Raumfahrttechnik Hohenstaufenallee 6 52064 Aachen		9. Ber. Nr. Durchführende Institution keine
		10. Förderkennzeichen 0325738A/B/C/E
		11. Seitenzahl Siehe Bericht
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn		13. Literaturangaben keine
		14. Tabellen keine
		15. Abbildungen Siehe Bericht
16. Zusätzliche Angaben keine		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projekträger Jülich		
18. Kurzfassung Entwicklung einer wetterunabhängigen Wartungsplattform für Windenergieanlagen. Das Forschungsprojekt SMART, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, beschäftigt sich seit Ende 2014 mit der Entwicklung einer Plattform für die Inspektion und Reparatur von Rotorblättern.		
19. Schlagwörter Kletterroboter, Instandhaltung, Windenergieanlagen, Windkraftanlagen, Rotorblätter		
20. Verlag t.b.d.	21. Preis	

V. **Anlage 3: Vorschlag zur weiteren Verwendung von Gegenständen im Wert über 410 €**

Hiermit wird bestätigt, dass die im Rahmen des SMART Projekts, Förderkennzeichen 0325738A, beschafften Gegenstände über 410 €, nicht für wirtschaftliche Tätigkeiten, sondern weiterhin zu Lehr- und Forschungszwecken im hoheitlichen Bereich eingesetzt werden. Alle Gegenstände werden für den Zeitraum des Folgeprojekts, Förderkennzeichen 0324067A, im Vorhaben SMART (Phase II) weiterverwendet.

Gegenstände, die für die erfolgreiche Durchführung der Phase II erforderlich sind, jedoch von einem Projektpartner aus Phase I beschafft wurden, sollen bis zum Abschluss des SMART Forschungsprojekts und ggf. weiterer Folgeprojekte der FH Aachen zur Verfügung gestellt werden.

VI. Anlage 4: Kurzfassung zum aktuellen Verwertungsplan

Zuwendungsempfänger: Fachhochschule Aachen

Verbundprojekt: Wartungs- und Instandsetzungsplattform für Windenergieanlagen (SMART Phase I)

Förderkennzeichen: 0325738A/B/C/E

Bewilligungszeitraum: 01.09.2014 bis 30.04.2016

Alle Ergebnisse, z.B. Patente, aus diesem Forschungsprojekt werden im Rahmen des Folgeprojekts für die Prototypenentwicklung, SMART Phase II, verwertet. Darüber hinaus beschreibt der Verwertungsplan das Vorgehen.

Hiermit kommt der Zuwendungsempfänger seiner Verwertungspflicht nach.



(Datum, Unterschrift)