

Entwicklung eines Kletterroboters zur Diagnose und Instandsetzung von Windenergieanlagen (SMART)

Von S. Kallweit¹, P. Dahmann², M. Bagheri³, J. Schleupen⁴, H. Engemann⁵

1 Motivation

Mit einer momentan installierten Gesamtleistung von ca. 30 GW sind Windenergieanlagen (WEA) maßgeblich an der Energieversorgung in Deutschland beteiligt. Jährlich werden ca. 2000 neue Anlagen installiert – ein Wachstum von ~12% [1]. Die Technologie zur Erzeugung elektrischer Energie aus Windenergie ist noch vergleichsweise jung und erfuhr in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung. Daher wurde der späteren Instandhaltung wie Inspektionen oder gar Reparaturarbeiten zunächst wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Als diese Instandhaltungsarbeiten

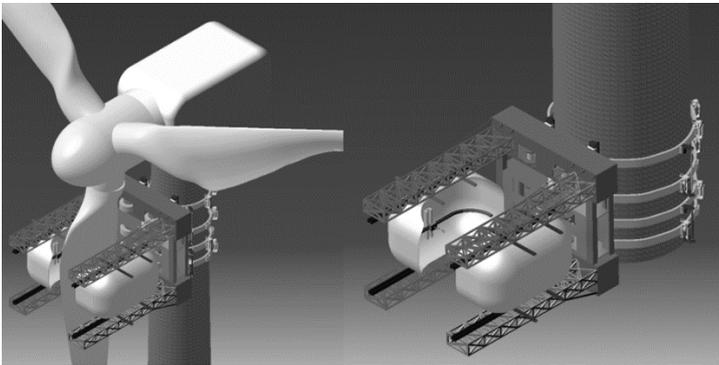


Bild 1: Ursprüngliches Konzept des SMART als Gurtkletterer

mit der Laufzeit der WEA immer häufiger anfielen, wurden sie anfänglich mit einfachen Hilfsmitteln wie z.B. Kränen oder Industrieabseilern durchgeführt. Als die Ausfälle der WEA auf Grund von Schäden durch Blitzeinschlag oder Materialversagen an den Rotorblättern und der dadurch verursachte wirtschaftliche Schaden sprunghaft stiegen, wurde der Bedarf der nachhaltigen Instandhaltung erkannt. Seit Oktober 2014 wird das Forschungsprojekt SMART (**S**canning, **M**onitoring, **A**nalysis, **R**epair and **T**ransportation), in dem eine kletternde Plattform für WEA entwickelt werden soll, vom BMWi gefördert. Das Konsortium besteht aus drei Firmen und einer Hochschule, die zusammen einen Kletterroboter entwickeln, der als Diagnose und Instandhaltungsplattform für WEA dienen soll. Die bisherigen Ergebnisse der Phase I des Forschungsprojektes werden nachfolgend geschildert.

2 Reibschlüssiges Klettern

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 (Bild 1) basierte auf der Erzeugung der benötigten Normalkräfte durch Gurte, ähnlich wie beim Kletttervorgang von Industriesteigern, die z.B. auf Strommasten steigen. Es sollten dabei - wie in Bild 2a gezeigt - zwei Gurtsysteme zum Einsatz kommen, die abwechselnd im Eingriff sind. Das äußere Gurtsystem B sollte den SMART mit

¹ Prof. Dr.-Ing. Stephan Kallweit, FH Aachen, FB Maschinenbau und Mechatronik, MASKOR Institut, Aachen

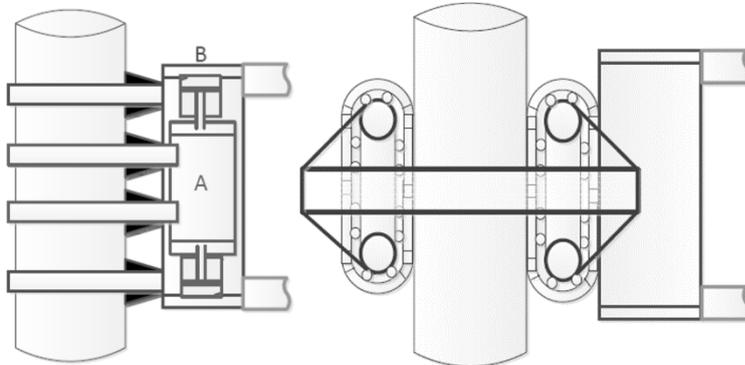
² Prof. Dr.-Ing. Peter Dahmann, FH Aachen, FB Luft- und Raumfahrttechnik, Aachen

³ Dipl.-Ing. Mohsen Bagheri, FH Aachen, FB Luft- und Raumfahrttechnik, Aachen

⁴ M.Sc. Josef Schleupen, FH Aachen, FB Maschinenbau und Mechatronik, MASKOR Institut, Aachen

⁵ M.Sc. Heiko Engemann, FH Aachen, FB Maschinenbau und Mechatronik, MASKOR Institut, Aachen

den Auslegern und der Arbeitskabine 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 (Bild 2a) ist die erhöhte Turmbelastung durch die wechselnde Belastung der beiden Gurtsysteme und die fehlende Übertragung von Querkräften. Das Spannen und Entlasten der beiden Gurtsysteme A und B (Bild 2a) erzeugt besonders in der Übergangsphase, wenn ein Gurtsystem seinen Hub zurückgelegt hat und beide Systeme im Eingriff sind, eine doppelt so hohe Turmbelastung (Bild 3) verglichen mit einer kontinuierlichen Kletterbewegung, wie bspw. durch Kettenantriebe (Bild 2b). 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,

Bild 2: a) Gurtkletterprinzip

b) Kettenantrieb

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,

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,

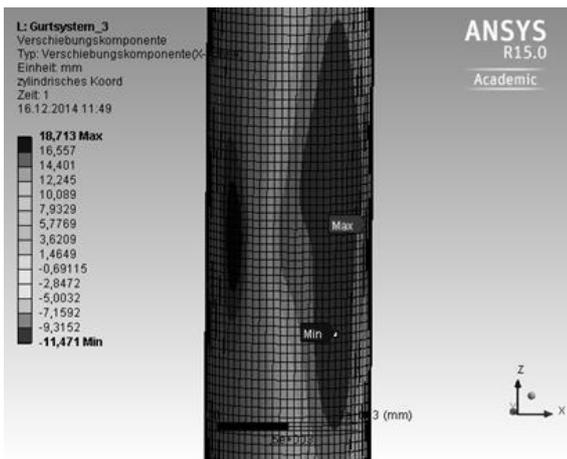


Bild 3: Belastungsanalyse des Gurtkletterprinzips

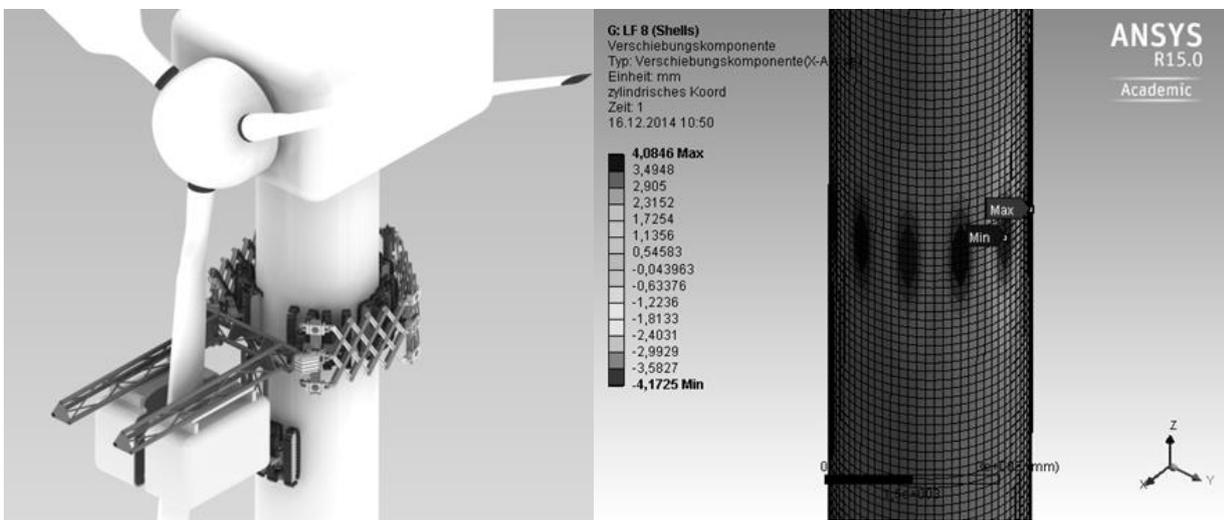


Bild 4: a) Kettenfahrwerke

b) Turmbelastung durch Kettenfahrwerk

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 (Bild 5b) auf die Turmoberfläche sicherstellen (Bild 6b). 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 Pratten, 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.

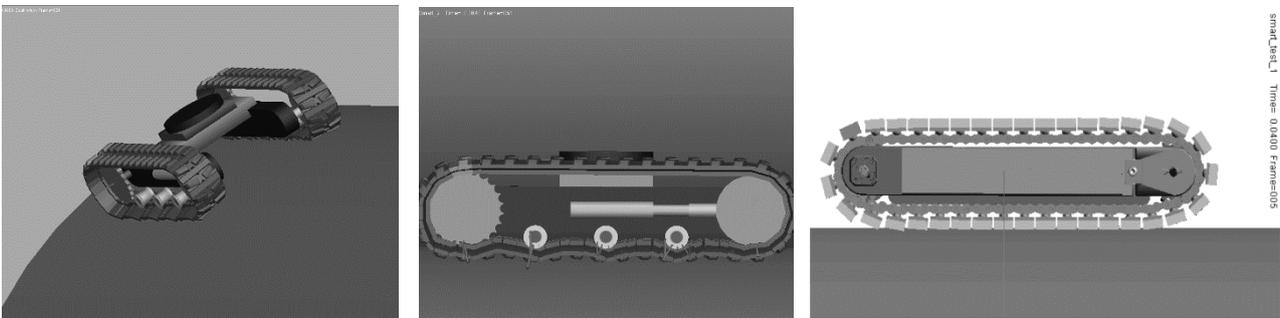


Bild 6: a) Riemen-Kettenfahrwerk auf Turmoberfläche (ATV)

b) Platten-Kettenfahrwerk (ATV)

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.

5 Demonstrator

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 [2], welche mit dem Robot Operating System ROS [3] 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

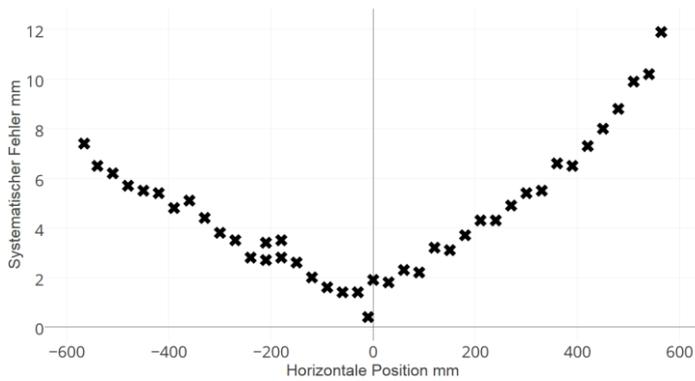


Bild 7: Systematischer Fehler des Trackingsystems

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 [5] 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.

6 Tischmodelle und Skalierung

Als Grundlage für die Entwicklung des Demonstrators im Maßstab 1:3 wurden frühzeitig im Projekt Tischmodelle im Maßstab 1:20 gefertigt (Bild 8a). 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

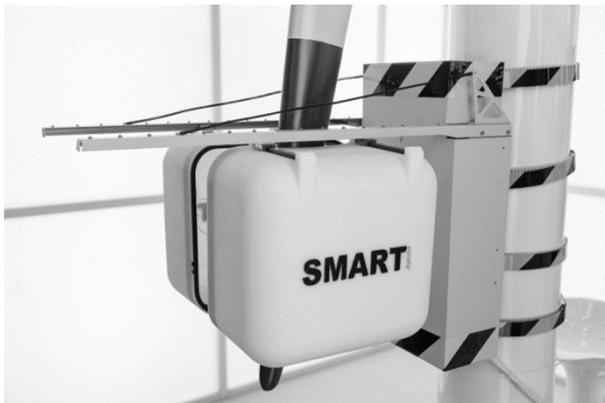
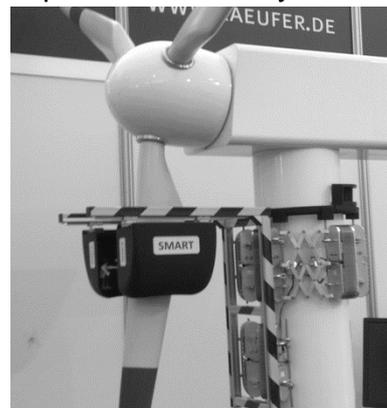


Bild 8: a) Tischmodell Gurtkletterer



b) Tischmodell Kettenfahrwerk

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 (Bild 8b) 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.

7 Literatur

- [1] <http://www.welt.de/wirtschaft/article136927637/Windkraftausbau-uebertrifft-alle-Erwartungen.html>
- [2] Wiki: ar_track_alvar, http://wiki.ros.org/ar_track_alvar, Oktober 2015
- [3] Robot Operating System, <http://www.ros.org/>, 2015
- [4] MELFA Industrial Robots, Mitsubishi Electric Europe, 01.2007, Ratingen, Deutschland
- [5] MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4, InvenSense, 19.08.2013